

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Civil

Influencia de la relación entre rigideces de arco y tablero bajo cargas excéntricas y transversales en puentes arco

Autor: Antonio Domínguez López

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Influencia de la relación entre rigideces de arco y tablero bajo cargas excéntricas y transversales en puentes arco

Autor:

Antonio Domínguez López

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, 2019

Trabajo Fin de Grado: Influencia de la relación entre rigideces de arco y tablero bajo cargas excéntricas y transversales en puentes arco

Autor: Antonio Domínguez López

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, 2018

El Secretario del Tribunal

Resumen

El presente trabajo trata sobre el comportamiento de los puentes arco. En un primer lugar, se ha estudiado el comportamiento de un puente que se ha tomado como modelo de referencia, reproduciendo el estudio que realiza D. Javier Manterola en su libro 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II [1]'.
Posteriormente, una vez corroborados los resultados obtenidos en el modelo de referencia con los obtenidos por el autor en su estudio, se ha procedido al análisis de varios puentes, definiendo tres casos: variación de las rigideces a torsión relativas de arco y tablero, variación de la relación flecha-luz, variación de la fijación de los pilares. En cada caso, se han estudiado diversos modelos en los que se han ido variando, progresivamente, cada una de las propiedades mencionadas anteriormente. Por último, se han extraído las conclusiones más relevantes sobre el comportamiento de este tipo de puentes al variar sus propiedades.

El objetivo de este documento no es otro que el conocer cómo influye en el comportamiento del puente arco la variación de algunas de sus propiedades.

Índice

Resumen	VII
Índice	IX
Índice de Tablas	XI
Índice de Figuras	XIII
1 Introducción: el puente arco	1
1.1. Objeto	2
2 Modelo de Javier Manterola	3
2.1. Geometría	3
2.1.1 Modelización de la estructura	3
2.1.2 Secciones transversales	3
2.2. Materiales	4
2.3. Apoyos y condiciones de contorno	5
2.4. Cargas	5
2.5. Resultados	5
2.5.1. Análisis de resultados	9
3. Influencia de la rigidez a torsión de arco y tablero	13
3.1. Cálculo de las secciones	13
3.2. Resultados	14
3.2.1. Rigidez a torsión predominante en el arco	14
3.2.2. Rigidez a torsión predominante en el tablero	14
3.3. Análisis de resultados	18
3.3.1. Carga excéntrica:	18
3.3.2. Carga transversal:	21
3.4. Conclusiones	25
4. Influencia de la relación flecha-luz	27
4.1. Cálculo de las secciones	27
4.2. Resultados	30
4.2.1. Caso 0: $f = L6.6$	30
4.2.2. Caso I: $f = L5$	34
4.2.3. Caso II: $f = L10$	38
4.2.4. Caso III: $f = L16$	42
4.3. Análisis de resultados	45
4.3.1. Carga excéntrica:	45
4.3.2. Carga transversal:	49
4.4. Conclusiones	54
5. Variación de la fijación de los pilares	55

5.1. Resultados	55
5.1.1. Pilares biempotrados	55
5.1.2. Pilares biarticulados	55
5.2. Análisis de resultados	59
5.2.1. Carga excéntrica:	59
5.2.2. Carga transversal:	61
5.3. Conclusiones	63
6. Conclusiones y desarrollos futuros	65
6.1. Conclusiones	65
6.2. Desarrollos futuros	65
Referencias	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de las secciones	13
Tabla 2 Comparación del efecto del esfuerzo cortante según la relación entre rigideces a torsión de arco y tablero	20
Tabla 3 Solicitación torsora $x = 26.25$ m	24
Tabla 4 Solicitación torsora $x = 32.5$ m	24
Tabla 5 Solicitación torsora $x = 45$ m	24
Tabla 6 Solicitación torsora $x = 57.5$ m	24
Tabla 7 Comparación del efecto del esfuerzo cortante según la relación flecha-luz	48
Tabla 8 Evaluación de la variación de la solicitación torsora y del esfuerzo de torsión según la relación flecha-luz	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1 Viaducto Martín Gil de Torroja	1
Imagen 2 Puente de Krk, Croacia	1
Imagen 3 Vista en perspectiva de la estructura	3
Imagen 4 Sección tipo, modelo de J. Manterola	4
Imagen 5 Secciones tipo, modelo propuesto (arco, pilares y tablero)	4
Imagen 6 Sección transversal del puente	4
Imagen 7 Carga excéntrica y transversal	5
Imagen 8 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola	6
Imagen 9 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica modelo propuesto	6
Imagen 10 Momento torsor ante carga excéntrica modelo J. Manterola	6
Imagen 11 Momento torsor ante carga excéntrica modelo propuesto	6
Imagen 12 Cortante transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola	7
Imagen 13 Cortante transversal ante carga excéntrica modelo propuesto	7
Imagen 14 Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola	7
Imagen 15 Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo propuesto	7
Imagen 16 Desplazamiento transversal ante carga transversal modelo J. Manterola	8
Imagen 17 Desplazamiento transversal ante carga transversal modelo propuesto	8
Imagen 18 Momento torsor ante carga transversal modelo J. Manterola	8
Imagen 19 Momento torsor ante carga transversal modelo propuesto	8
Imagen 20 Cortante transversal ante carga transversal modelo J. Manterola	9
Imagen 21 Cortante transversal ante carga transversal modelo propuesto	9
Imagen 22 Momento flector transversal ante carga transversal modelo J. Manterola	9
Imagen 23 Momento flector transversal ante carga transversal modelo propuesto	9
Imagen 24 Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica	10
Imagen 25 Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica (Modelo MIDAS Civil [3])	11
Imagen 26 Sección transversal del puente con rigidez a torsión predominante en tablero	14
Imagen 27 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero	14
Imagen 28 Momento torsor ante carga excéntrica, rigidez en tablero	15
Imagen 29 Cortante transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero	15
Imagen 30 Momento flector transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero	16
Imagen 31 Desplazamiento transversal ante carga transversal, rigidez en tablero	16

Imagen 32 Momento torsor ante carga transversal, rigidez en tablero	17
Imagen 33 Cortante transversal ante carga transversal, rigidez en tablero	17
Imagen 34 Momento flector transversal ante carga transversal, rigidez en tablero	18
Imagen 35 Comparación de efecto generado por carga excéntrica (Sección: $x = 98.75$ m)	18
Imagen 36 Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica	19
Imagen 37 Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga excéntrica	19
Imagen 38 Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica	21
Imagen 39 Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica	21
Imagen 40 Comparación de desplazamiento transversal según rigidez predominante ante carga transversal	22
Imagen 41 Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga transversal	22
Imagen 42 Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga transversal	23
Imagen 43 Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga transversal	25
Imagen 44 Sección transversal del puente ($f = L/5$)	29
Imagen 45 Sección transversal del puente ($f = L/10$)	29
Imagen 46 Sección transversal del puente ($f = L/16$)	30
Imagen 47 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$	30
Imagen 48 Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/6.6$	31
Imagen 49 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$	31
Imagen 50 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$	31
Imagen 51 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/6.6$	32
Imagen 52 Momento torsor ante carga transversal $f=L/6.6$	32
Imagen 53 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/6.6$	33
Imagen 54 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/6.6$	33
Imagen 55 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica $f=L/5$	34
Imagen 56 Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/5$	34
Imagen 57 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/5$	35
Imagen 58 Momentor flector transversal ante carga excéntrica $f=L/5$	35
Imagen 59 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/5$	36
Imagen 60 Momento torsor ante carga transversal $f=L/5$	36
Imagen 61 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/5$	37
Imagen 62 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/5$	37
Imagen 63 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica $f=L/10$	38
Imagen 64 Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/10$	38
Imagen 65 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/10$	39
Imagen 66 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/10$	39
Imagen 67 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/10$	40
Imagen 68 Momento torsor ante carga transversal $f=L/10$	40

Imagen 69 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/10$	41
Imagen 70 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/10$	41
Imagen 71 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica $f=L/16$	42
Imagen 72 Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/16$	42
Imagen 73 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/16$	43
Imagen 74 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/16$	43
Imagen 75 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/16$	44
Imagen 76 Momento torsor ante carga transversal $f=L/16$	44
Imagen 77 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/16$	45
Imagen 78 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/16$	45
Imagen 79 Comparación de desplazamiento transversal según f/L ante carga excéntrica	46
Imagen 80 Comparación de momento torsor según f/L ante carga excéntrica	46
Imagen 81 Comparación de cortante transversal según f/L ante carga excéntrica	47
Imagen 82 Comparación de momento transversal según f/L ante carga excéntrica	49
Imagen 83 Comparación de desplazamiento transversal según f/L ante carga transversal	50
Imagen 84 Evolución de la sollicitación torsora y del esfuerzo de torsión en el arco según la relación flecha-luz	51
Imagen 85 Comparación de momento torsor según f/L ante carga transversal	52
Imagen 86 Comparación de cortante transversal según f/L ante carga transversal	53
Imagen 87 Comparación de momento transversal según f/L ante carga transversal	53
Imagen 88 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica con pilares biarticulados	55
Imagen 89 Momento torsor ante carga excéntrica con pilares biarticulados	56
Imagen 90 Cortante transversal ante carga excéntrica con pilares biarticulados	56
Imagen 91 Momento flector transversal ante carga excéntrica con pilares biarticulados	57
Imagen 92 Desplazamiento transversal ante carga transversal con pilares biarticulados	57
Imagen 93 Momento torsor ante carga transversal con pilares biarticulados	58
Imagen 94 Cortante transversal ante carga transversal con pilares biarticulados	58
Imagen 95 Momento flector transversal ante carga transversal con pilares biarticulados	59
Imagen 96 Comparación de desplazamiento transversal según fijación de pilares ante carga excéntrica	59
Imagen 97 Comparación de momento torsor según fijación de pilares ante carga excéntrica	60
Imagen 98 Comparación de cortante transversal según fijación de pilares ante carga excéntrica	60
Imagen 99 Comparación de momento transversal según fijación de pilares ante carga excéntrica	61
Imagen 100 Comparación de desplazamiento transversal según fijación de pilares ante carga transversal	61
Imagen 101 Comparación de momento torsor según fijación de pilares ante carga transversal	62
Imagen 102 Comparación de cortante transversal según fijación de pilares ante carga transversal	62
Imagen 103 Comparación de momento transversal según fijación de pilares ante carga transversal	63

1 INTRODUCCIÓN: EL PUENTE ARCO

HA sido el puente arco la morfología más común – y casi única – desde la aparición de los primeros puentes y prácticamente hasta el siglo XIX. La irrupción de las estructuras de fundición, y posteriormente de hormigón y de hormigón armado, desbancaron la hegemonía del puente arco, dando paso a la estructura recta. Más aun, con la aparición del hormigón pretensado en los años 40 y de los puentes atirantados en los 60.

El desuso del arco durante dichas épocas se debe a tres razones principales (Artículo Manterola). En primer lugar, la necesidad de grandes cimbras que soportasen la estructura durante la construcción suponía un gran lastre económico, llegando a superar en ocasiones el coste del propio arco. Otro motivo es las características resistentes del terreno, que asegurasen la ausencia de asientos diferenciales, puesto que éstos son mucho más perjudiciales en puentes arco que en puentes rectos. Por último, la ventaja de que las estructuras de los puentes rectos constituyen por sí mismas las plataformas de paso, mientras que en los puentes arcos se necesitan dos estructuras: arco y tablero.

Siendo el método constructivo el principal problema de los puentes arcos frente a los puentes rectos, diferentes ingenieros plantearon métodos constructivos alternativos a las costosas cimbras. La construcción con autocimbra



Imagen 1 Viaducto Martín Gil de Torroja

se utilizó para construir algún puente como el Martín Gil de Torroja, sin embargo, la lentitud de la construcción no permitió la consolidación de este método constructivo. Otro intento fue el de Morandi, quien optó por la construcción de dos semi-arcos en posición vertical e ir girándolos hasta colocarlos en su posición definitiva mediante un sistema de atirantamiento y apuntalamiento. Este método, sin embargo, no era el más adecuado para puentes de grandes luces.

Pero hasta la aplicación del método de construcción de arcos por avance en voladizo no se consiguió la consagración de esta tipología de puentes con luces de mayor magnitud, entre los 100 y los 400 metros. Un ejemplo de ello es el puente de la isla Krk, Croacia.

Otro de los causantes de que los puentes arcos estuviesen olvidados durante algún tiempo, era las características resistentes del terreno. Estos problemas se vieron solucionados con la elección de disposiciones estructurales necesarias para impedir que la carga horizontal que exige el arco en arranques se transmita al suelo. De esta forma se solicita al suelo simplemente con cargas verticales, mucho más asumibles para terrenos no óptimos, que las cargas horizontales.

Otra solución a este problema fue el uso de arcos con tablero inferior, pues es evidente que en estos casos es el tablero el que recoge la componente horizontal del empuje del arco.



Imagen 2 Puente de Krk, Croacia

Por último, y al hilo de lo que se desarrollará en adelante, Javier Manterola afirmaba en un artículo de la revista Informes de la Construcción, que: *“Un puente arco resolvía el problema transversal de todo tablero, disponiendo varios arcos o uno solo, suficientemente ancho, que recogiese la presencia de la excentricidad de la sobrecarga a la manera de una viga transversal soportada en dos o más puntos que eran los arcos”*. [2]

1.1. Objeto

El óptimo comportamiento de los puentes arco frente a cargas excéntricas ha sido una de las razones por las que esta tipología ha sido una de las más usadas a lo largo de la historia. J. Manterola, en Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II [1], realiza un estudio de puentes arco sometido a cargas excéntricas – y también a transversales – en el que analiza el comportamiento en base a la relación entre las rigideces de tablero y arco.

El primer objetivo de este trabajo será la realización de un modelo que verifique el estudio de J. Manterola, para poder así corroborar sus conclusiones, con un software más actualizado, usando elementos finitos (MIDAS Civil [3]). El tratado de los datos obtenidos se realizará con el software Microsoft Excel [4]. Dicho modelo servirá como punto de partida para el estudio paramétrico que se realizará posteriormente.

El segundo objetivo será, desde la ampliación de dicho estudio, extraer conclusiones que permitan comprender mejor el comportamiento de la estructura arco-tablero. Para ello centraremos la ampliación de dicho estudio en tres fases principales:

- Una primera fase consistirá en realizar el análisis primitivo invirtiendo la relación entre las rigideces a torsión de arco y tablero.
- En la segunda fase se estudiará cómo evoluciona la respuesta resistente de la estructura en función de la relación flecha-luz del arco.
- Por último, se estudiará la diferencia de comportamiento cuando los pilares se encuentran biempotrados o biarticulados.

Todos estos estudios se harán por duplicado, ya que por un lado analizaremos el comportamiento de la estructura frente a cargas excéntricas, y por otro frente a carga transversal (viento).

2 MODELO DE JAVIER MANTEROLA

A lo largo de este apartado describiremos el modelo que J. Manterola usa en su estudio. Además, reproduciremos un modelo similar utilizando el método de los elementos finitos en el software MIDAS Civil [3], ya que servirá como punto de partida para los estudios que se realizarán a posteriori.

2.1. Geometría

2.1.1 Modelización de la estructura

La estructura se ha reproducido mediante un modelo de barras, la discretización del modelo y las características de arco, tablero y pilas se detallan en adelante. Por la naturaleza del problema, y los resultados que obtenemos posteriormente, puede deducirse que el modelo de barras fue el que usó J. Manterola en su estudio.

El arco que vamos a estudiar tiene una longitud de 100 metros y una flecha de 15 metros, con un trazado parabólico. La relación flecha-luz es de 6.6, valor dentro de lo común en puentes de este tipo. Está discretizado con 80 elementos barra, de 1.25 metros de longitud cada una, lo que supone cuatro barras entre cada dos pilares.

El tablero tiene una longitud total de 140 metros, alargándose 20 metros por cada lado, desde los apoyos del arco, hasta los estribos. La discretización del tablero consiste en 112 barras de 1,25 metros de longitud. Al igual que en el arco tenemos cuatro barras entre cada dos pilares.

Los pilares se han discretizado con un solo elemento, encontramos pilares cada 5 metros, por tanto, tenemos 21 pilares de unión arco-tablero, más otros tres pilares por cada lado del arco, empotrados en el terreno.

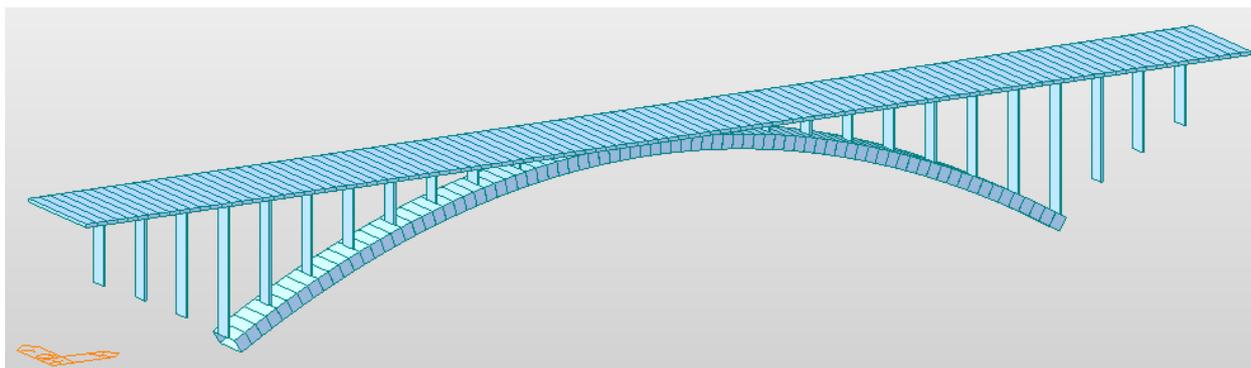


Imagen 3 Vista en perspectiva de la estructura

2.1.2 Secciones transversales

En el estudio de J. Manterola no se detalla con precisión las secciones de los tres elementos que componen el arco: tablero, pilares y arco, por lo que algunas dimensiones se han estimado en base a las figuras e intentando ajustar los resultados obtenido en MIDAS Civil [3] con los obtenido por J. Manterola.

- Tablero: sección rectangular de 12m x 0.4m
- Arco: sección rectangular hueca, con dimensiones de 4.5mx1.6m. El espesor no es detallado en el estudio, por lo que se ha considerado un espesor de 0.2m.

- Pilares: se sabe que comienzan con una sección rectangular (de la que conocemos una dimensión) en el arco, variando esa dimensión cuando se acerca al tablero desde 2m hasta los 12m del tablero. En nuestro estudio se ha considerado que la sección no varía al llegar al tablero, ya que la influencia de esta variación de la sección no es significativa en cuanto a resultados. En la modelización de MIDAS Civil [3] se ha usado una sección rectangular constante de 2m x 0.2m.

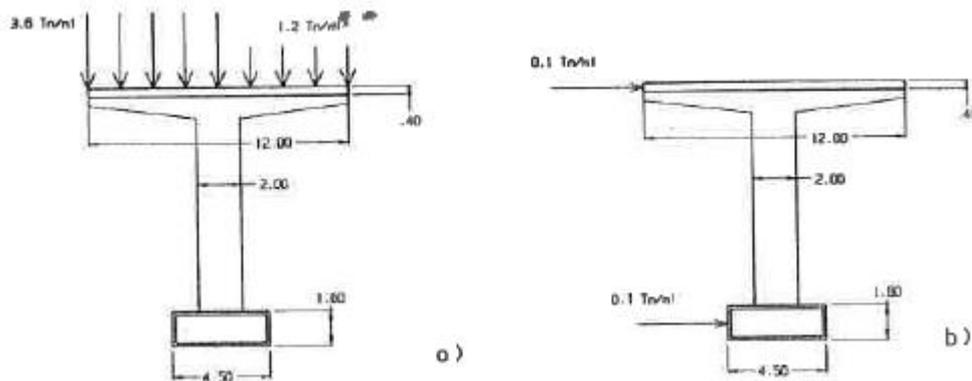


Imagen 4 Sección tipo, modelo de J. Manterola

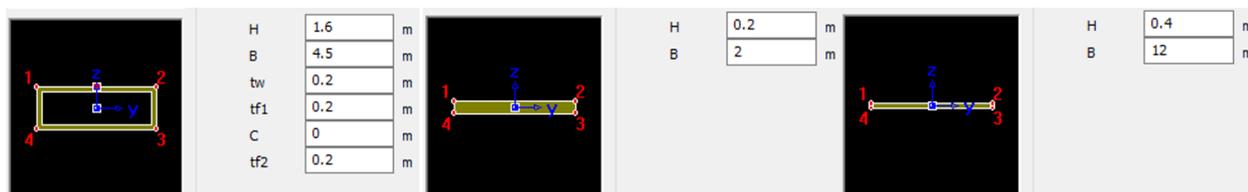


Imagen 5 Secciones tipo, modelo propuesto (arco, pilares y tablero)

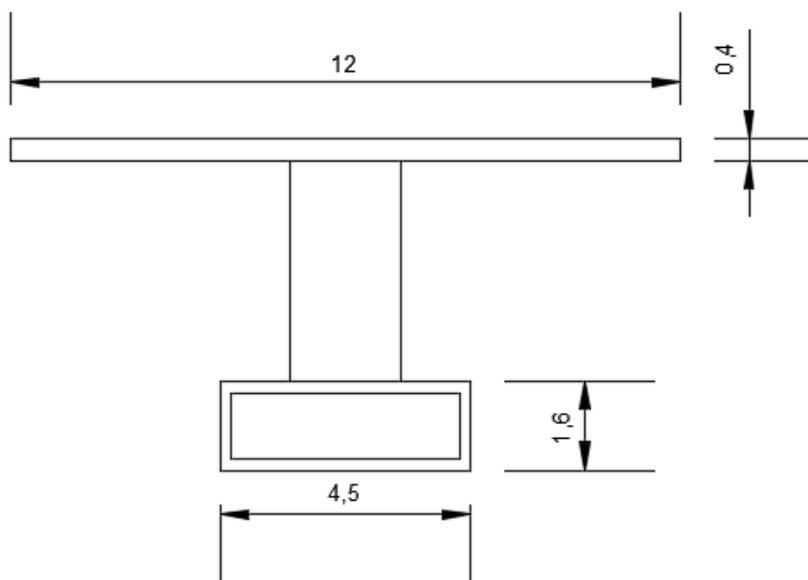


Imagen 6 Sección transversal del puente

2.2. Materiales

El material usado en la modelización del puente ha sido un hormigón con un módulo de elasticidad de $3.2836 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, un módulo de Poisson de 0.2 y una densidad de 25 kN/m^3 . J. Manterola no detalla cuales son las características del hormigón, pero se han supuesto los valores aquí expuestos.

2.3. Apoyos y condiciones de contorno

La unión del arco al terreno es biempotrada. Además, también tenemos condiciones de contorno de empotramiento en los pilares que encontramos desde el fin del arco hasta los estribos.

En los estribos está permitido tanto el desplazamiento longitudinal, como el giro transversal.

La unión de los pilares a arco y tablero es biempotrada, en la clave la unión entre arco y tablero se hace mediante un pilar de 1 metro de longitud.

Se concluye que son estas las condiciones de contorno que define J. Manterola por la similitud de los resultados obtenidos. Previamente se probó con otras condiciones hasta dar con la solución más próxima.

2.4. Cargas

Siguiendo el esquema de J. Manterola en su estudio, distinguimos dos casos de carga:

- La excentricidad de carga, concretada por la presencia de una sobrecarga en una mitad transversal del puente dispuesta a lo largo de toda su longitud. El valor de esta sobrecarga es de 23.5 kN/m (400 kg/m²), considerándose además carga correspondiente al peso propio de la losa en toda la sección transversal del puente, de valor 11.8 kN/m (100 kg/m²).
- Una carga transversal de viento, que será idéntica sobre arco y sobre el dintel, con un valor de 0.98 kN/m.

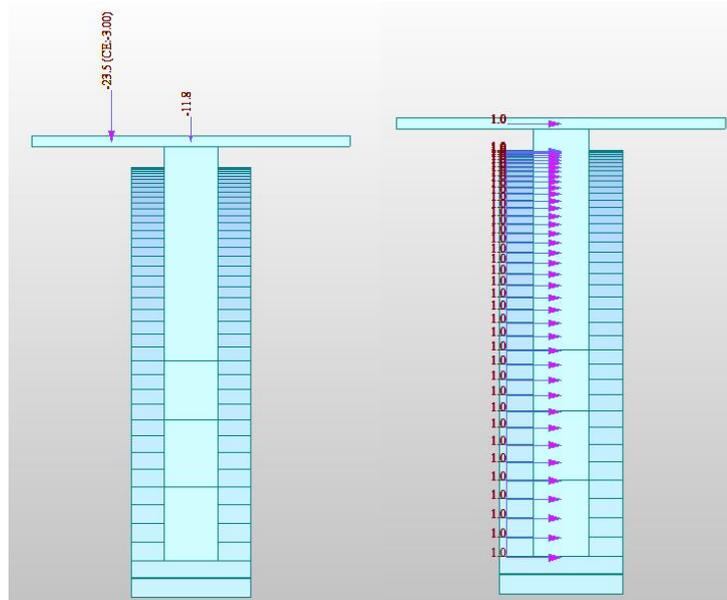


Imagen 7 Carga excéntrica y transversal

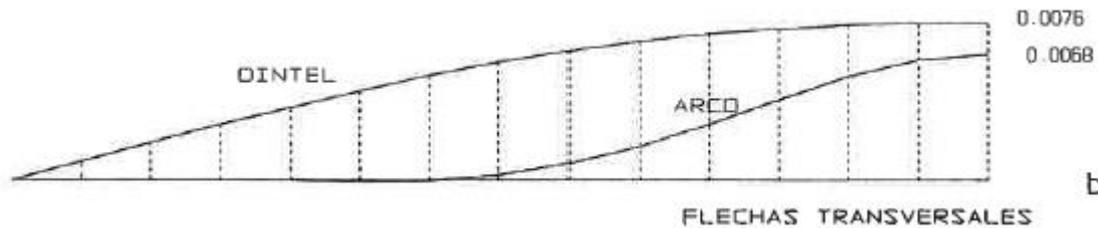
2.5. Resultados

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos por J. Manterola en su estudio en comparación con los obtenidos durante el desarrollo del trabajo con el software MIDAS Civil [3]. Posteriormente, se explicarán brevemente las conclusiones a las que llegó J. Manterola en su estudio.

Los resultados del estudio de J. Manterola han sido tomados de: Puentes II: Apuntes para su diseño y construcción [1, pp. 960-962].

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:



b)

Imagen 8 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola

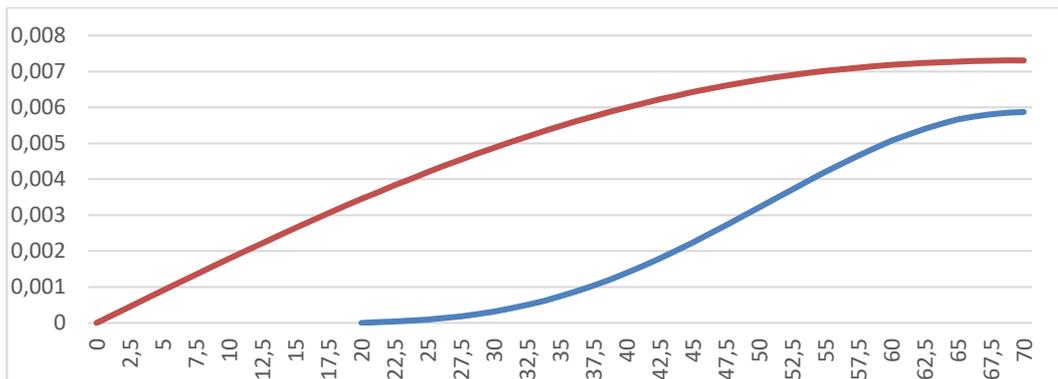


Imagen 9 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica modelo propuesto

- Momentos torsores:

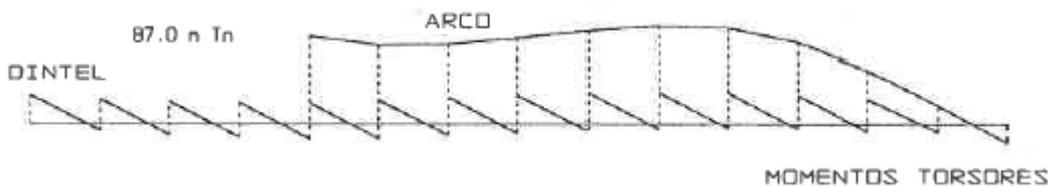


Imagen 10 Momento torsor ante carga excéntrica modelo J. Manterola

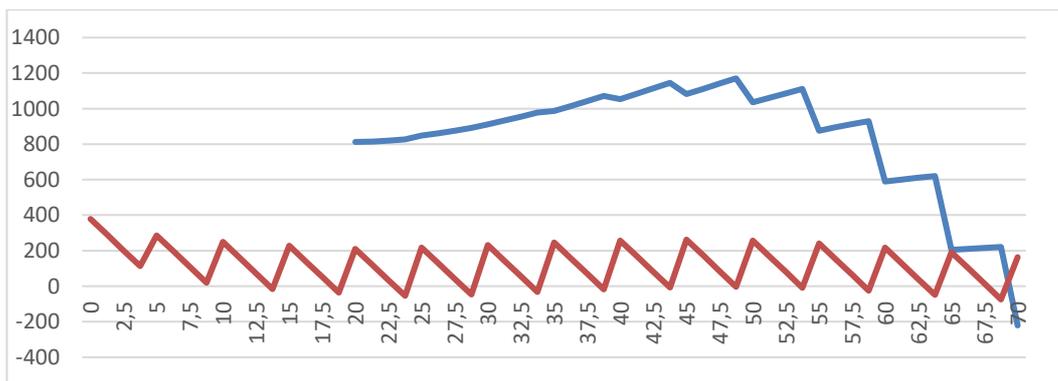


Imagen 11 Momento torsor ante carga excéntrica modelo propuesto

- Cortantes transversales:

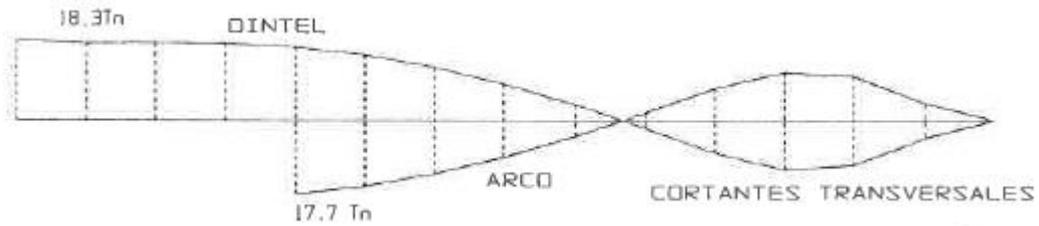


Imagen 12 Cortante transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola

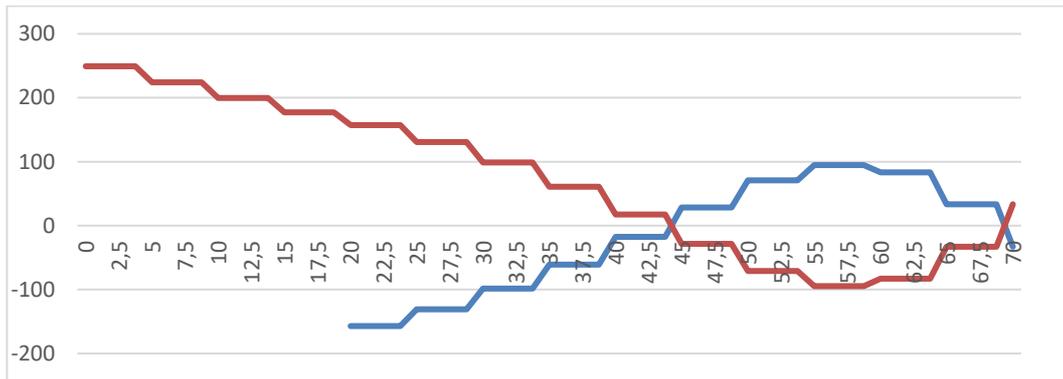


Imagen 13 Cortante transversal ante carga excéntrica modelo propuesto

- Flectores transversales:

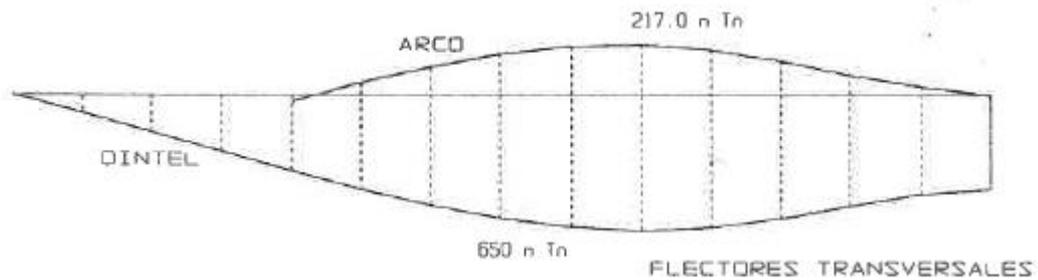


Imagen 14 Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola

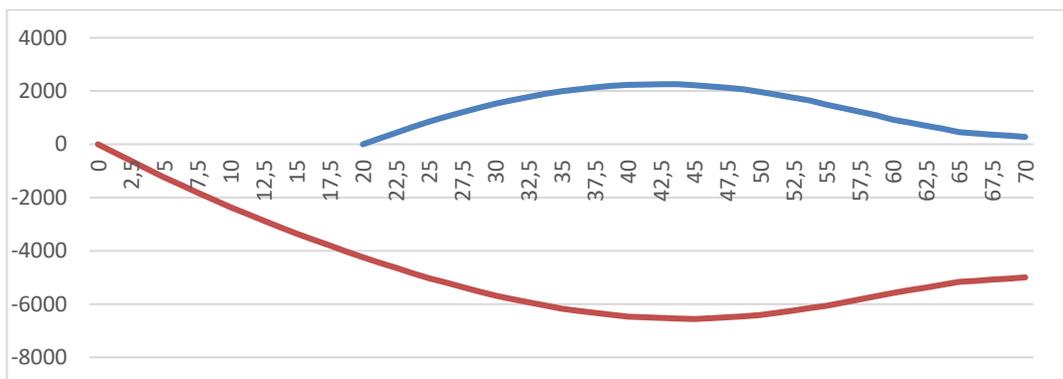


Imagen 15 Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo propuesto

Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

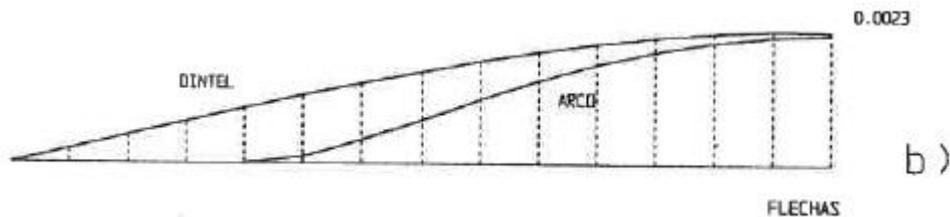


Imagen 16 Desplazamiento transversal ante carga transversal modelo J. Manterola

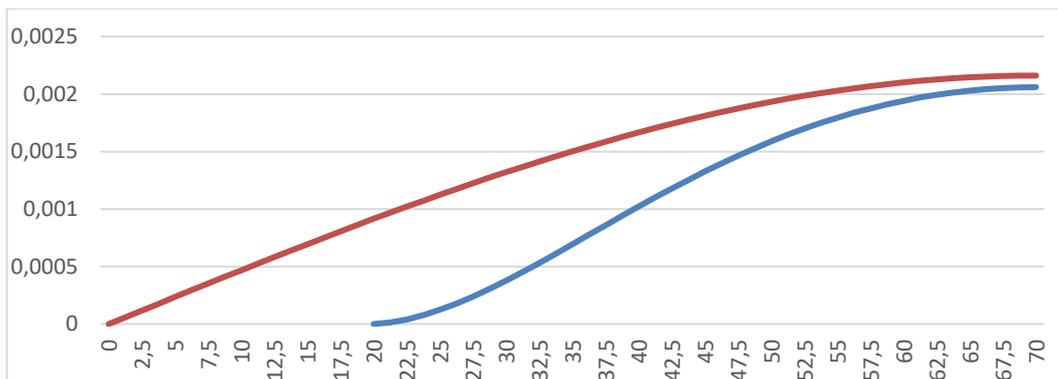


Imagen 17 Desplazamiento transversal ante carga transversal modelo propuesto

- Momentos torsores:

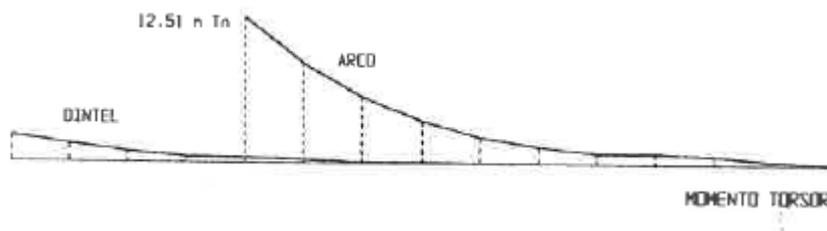


Imagen 18 Momento torsor ante carga transversal modelo J. Manterola

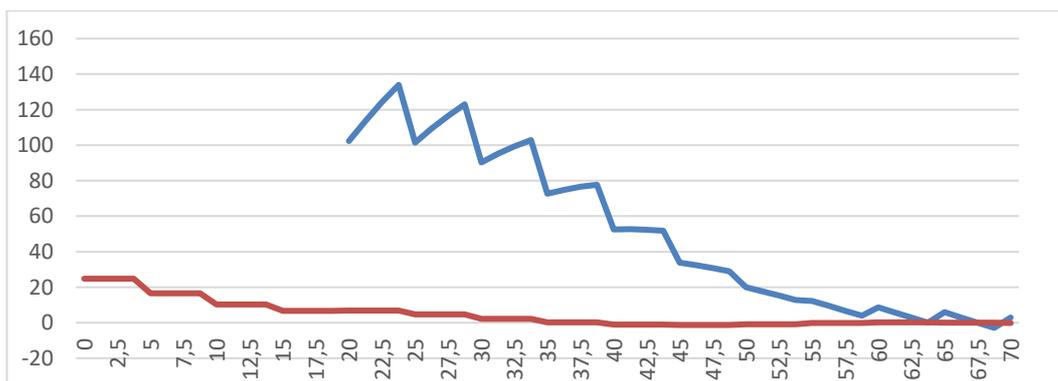


Imagen 19 Momento torsor ante carga transversal modelo propuesto

- Cortantes transversales:

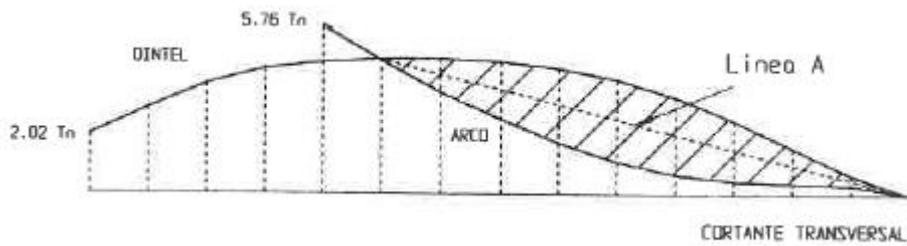


Imagen 20 Cortante transversal ante carga transversal modelo J. Manterola

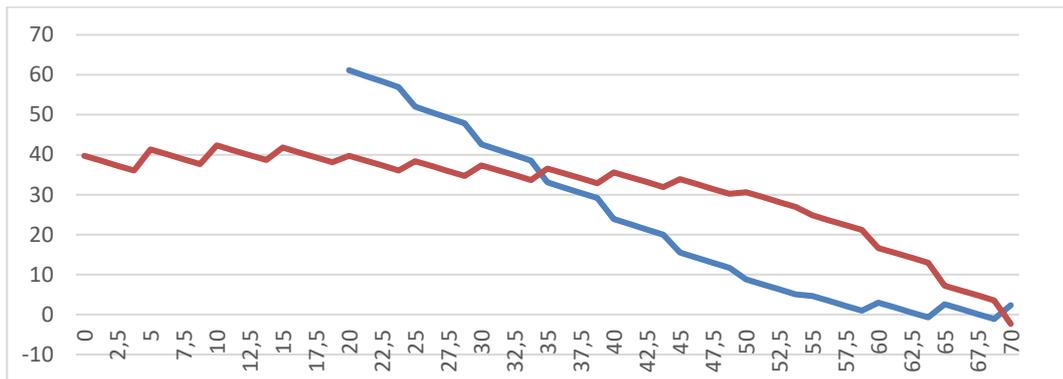


Imagen 21 Cortante transversal ante carga transversal modelo propuesto

- Flectores transversales:

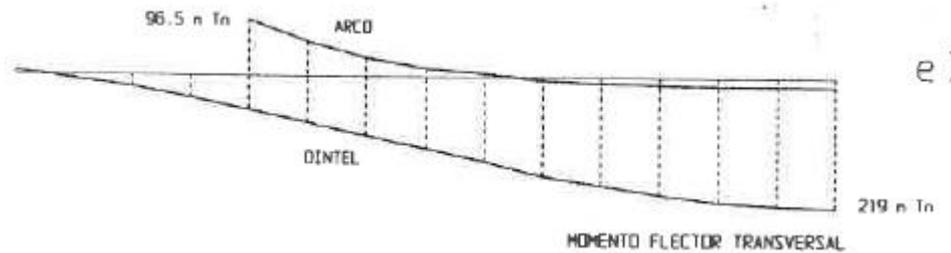


Imagen 22 Momento flector transversal ante carga transversal modelo J. Manterola

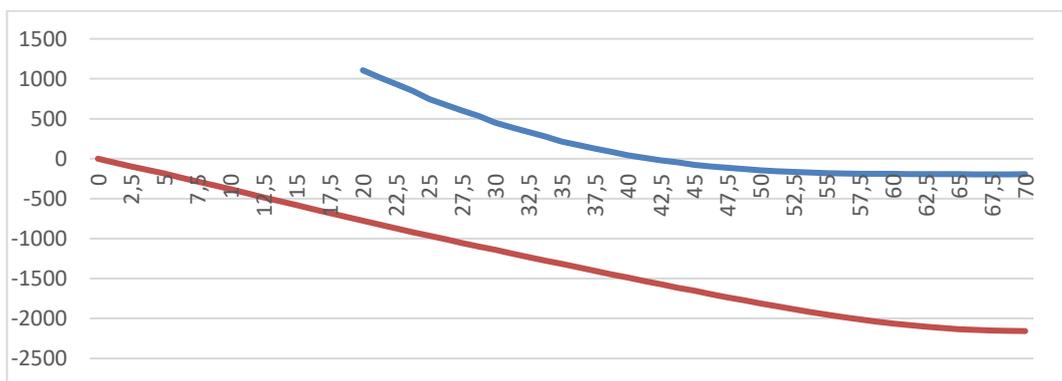


Imagen 23 Momento flector transversal ante carga transversal modelo propuesto

Los resultados obtenidos se aproximan bastante a los que obtiene J. Manterola, lo que nos permite validar las conclusiones que se extraen durante su estudio. En el siguiente apartado se ponen de manifiesto.

2.5.1. Análisis de resultados

Las conclusiones a las que llega J. Manterola en este análisis servirán como punto de partida de todos los análisis

que se realizarán en adelante.

Carga excéntrica:

La presencia de los pilares cada 5 metros, se traduce en una gran rigidización del cajón del arco, por lo que nos podemos centrar únicamente en la sollicitación torsora que introduce la sobrecarga actuando en una única mitad transversal del tablero. Por tanto, el problema se reduce a estudiar el comportamiento de la estructura arco-tablero a torsión longitudinal.

La respuesta del conjunto de la estructura ante la sollicitación torsora exterior se convierte en un par de fuerzas (cortante transversal) actuando en arco y tablero, y dos momentos torsores, también sobre arco y tablero.

Los valores de dichas fuerzas y momentos dependerán de las rigideces relativas de arco y tablero. Para ello debemos conocer las condiciones de contorno de las pilas fuera del arco y los estribos. También la vinculación del arco en el apoyo y su rigidez transversal. De esto dependerá tanto el valor de las fuerzas como el de los momentos.

Como vemos en los resultados mostrados en este apartado, el arco tiene unos momentos torsores muy considerables respecto a los del tablero. A continuación, vamos a ver el porqué del curioso comportamiento con el que actúa el sistema, generado por la relación entre rigideces (mucho mayor en arco que en tablero) y por la variación de altura de las pilas desde arranque hasta clave.

Los cortantes transversales son iguales y contrarios en arco y tablero, respondiendo así al par torsor que se produce entre arco y dintel, presentando un cambio de signo a cuartos de la luz del arco. Esto se explica porque tanto arco como tablero giran en la dirección de la excentricidad de carga, desplazándose ambos en la misma dirección. El acortamiento de las pilas conforme nos acercamos a la clave, determina que las fuerzas deben invertirse a lo largo de la luz para que los desplazamientos transversales del dintel puedan seguir a los del arco en las zonas más próximas a medios de la luz.

Este fenómeno puede comprobarse si vemos los diagramas de flecha y momento transversal. En la zona cercana a los arranques la curvatura de arco y dintel son de signo contrario, como es de esperar por el mecanismo que vemos en la imagen. En la zona cercana al centro de la luz, las fuerzas que responden al par torsor se invierten, por lo que el momento torsor crece muy rápidamente, debiendo resistir el torsor exterior más el que generan los esfuerzos cortantes. Cuando, a cuartos de la luz, las fuerzas transversales se invierten enfrentando al torsor exterior, el esfuerzo torsor en el arco deja de crecer. Este mecanismo es tan efectivo que se comprueba que el 72% de la sollicitación torsora total es resistido por el par de fuerzas, mientras que el 28% está resistido por torsión en el arco.

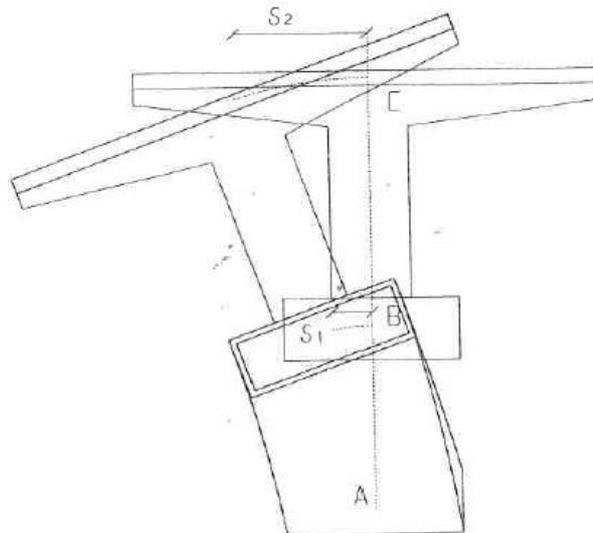


Imagen 24 Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica

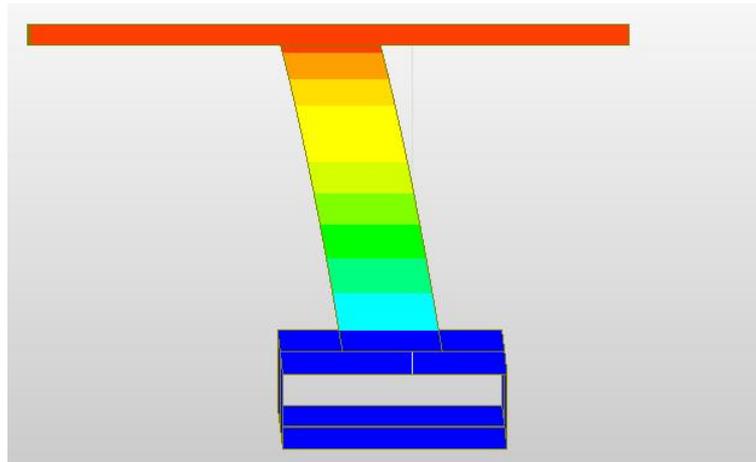


Imagen 25 Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica (Modelo MIDAS Civil [3])

Carga transversal:

La carga transversal, que representa las fuerzas de viento, equivale a una sollicitación general transversal más una sollicitación torsora.

Los cortantes transversales en arco y tablero son la suma del efecto generado por ambas sollicitaciones. En contraposición de la sollicitación transversal, se genera una respuesta de igual valor en arco y tablero, que J. Manterola representa con la línea A. Pero el efecto de la sollicitación torsora genera un par de fuerzas que tiende a reducir el cortante en el arco y a aumentarlo en el dintel. Esto es más visible, si observamos las leyes de momentos torsores; mientras actúan las fuerzas, el torsor del arco es muy pequeño.

Si nos centramos en la flexión transversal, vemos un comportamiento similar, la pérdida de carga transversal en el arco para resistir la torsión que produce la sollicitación exterior, hace que las flexiones en el mismo sean muy pequeñas en el arco, a diferencia de en el dintel, en el que ocurre lo contrario.

3. INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ A TORSIÓN DE ARCO Y TABLERO

El comportamiento del puente arco estudiado depende principalmente de las rigideces relativas entre arco y tablero. Por ello, en este apartado estudiaremos cómo varía la respuesta del puente cuando la rigidez a torsión predomina en el tablero frente a la del arco.

Para hacer un estudio comparativo entre un caso y otro, se han calculado las nuevas secciones del puente de forma que la rigidez conjunta sea aproximadamente la misma, esto se consigue manteniendo constante la relación entre inercias de las secciones de arco y tablero y manteniendo constante el área de las secciones.

Partiendo del estudio original de J. Manterola, en el que la rigidez a torsión es predominante en el arco, se calculan las nuevas secciones, con las que la rigidez predominante se ubicará en el dintel.

3.1. Cálculo de las secciones

La relación entre rigideces a torsión, calculada a partir de los valores obtenidos en el software MIDAS Civil [3], que existe entre arco y dintel es:

$$\frac{I_{arco}}{I_{dintel}} \approx 10$$

Para invertir la relación entre rigideces, la sección del tablero en este caso será una viga cajón, mientras que la del arco pasará de ser una sección rectangular de pared delgada cerrada, a una sección rectangular llena. Con esto se buscará las secciones que cumplan que:

$$\frac{I_{dintel}}{I_{arco}} \approx 10$$

Se cuidará que la rigidez transversal de la sección en el tablero se mantenga constante con la idea de poder comparar los resultados de uno y otro modelo.

Rigidez predominante en tablero				Rigidez predominante en arco			
	Arco	Tablero			Arco	Tablero	
Área	2.28E+00	5.40E+00	m ²	Área	2.28E+00	4.80E+00	m ²
Asy	1.90E+00	4.14E+00	m ²	Asy	1.80E+00	4.00E+00	m ²
Asz	1.90E+00	1.78E-01	m ²	Asz	6.40E-01	4.00E+00	m ²
Ixx	1.36E-01	1.41E+00	m ⁴	Ixx	2.54E+00	2.51E-01	m ⁴
Iyy	3.58E-02	4.47E-01	m ⁴	Iyy	9.46E-01	6.40E-02	m ⁴
Izz	5.24E+00	5.44E+01	m ⁴	Izz	5.26E+00	5.76E+01	m ⁴

Tabla 1 Características de las secciones

A continuación, mostramos una imagen de la nueva sección del puente acotada. Los pilares no se han acotado ya que se mantienen exactamente igual que en el anterior modelo. Su sección transversal es de 0,2x2 metros y su longitud varía a lo largo del arco (en la Imagen su longitud es de 4 metros).

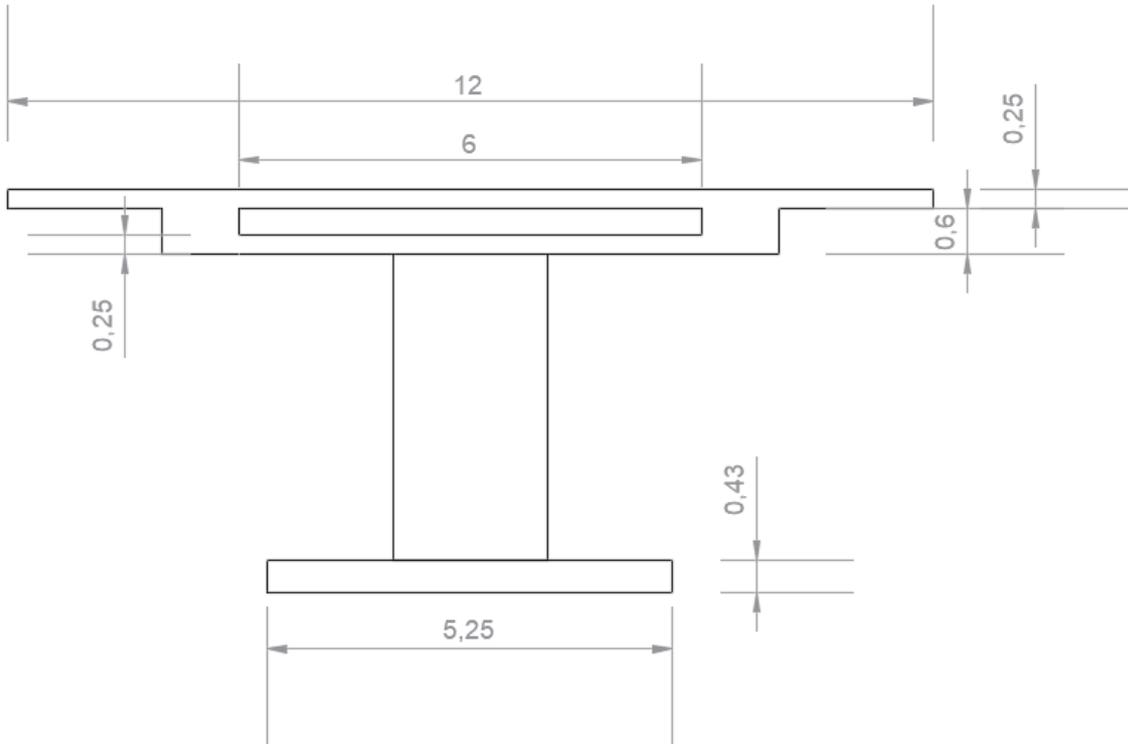


Imagen 26 Sección transversal del puente con rigidez a torsión predominante en tablero

3.2. Resultados

3.2.1. Rigidez a torsión predominante en el arco

Los resultados correspondientes a este caso son idénticos a los mostrados en el apartado 2.5.2. *Resultados del modelo propuesto*, ya que en el estudio original predomina la rigidez del arco sobre la del dintel.

3.2.2. Rigidez a torsión predominante en el tablero

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

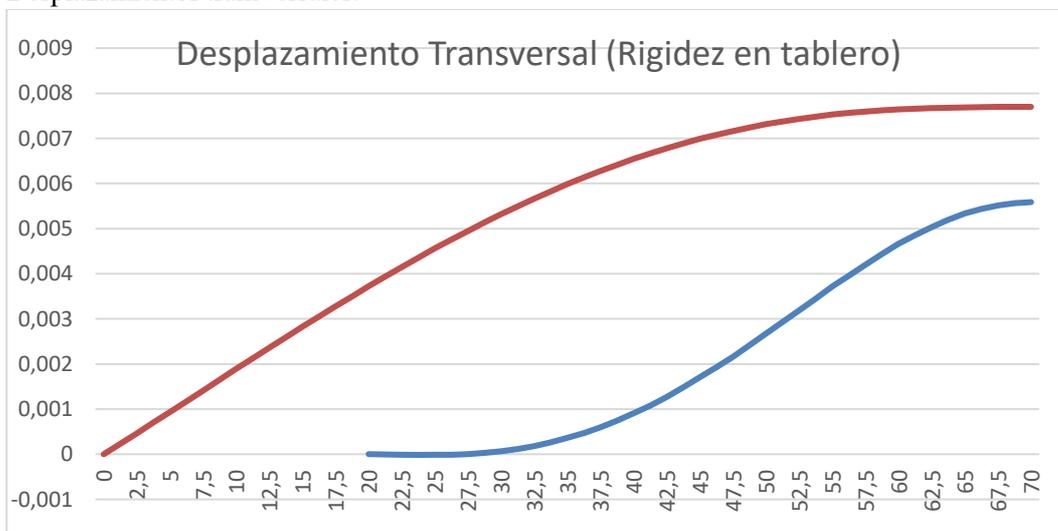


Imagen 27 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero

- Momentos torsores:

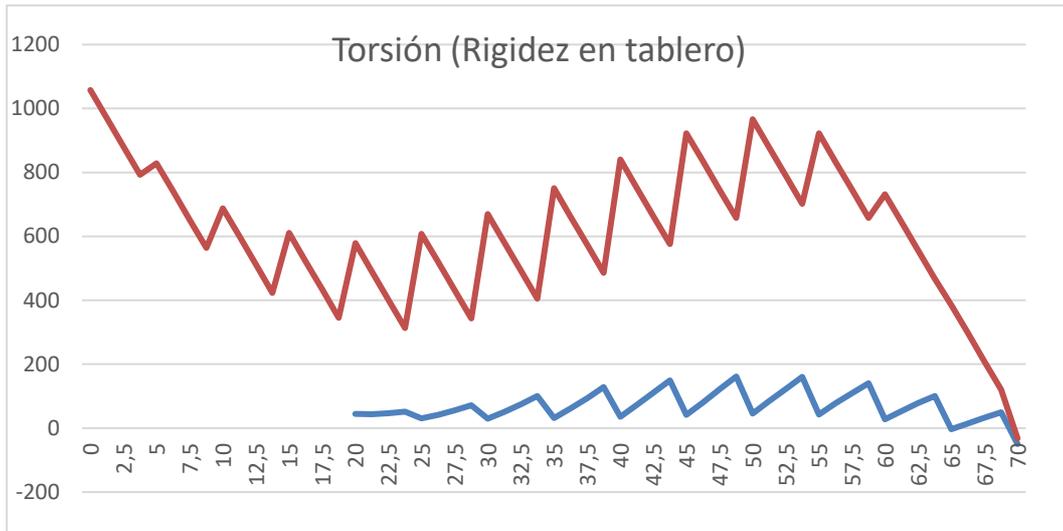


Imagen 28 Momento torsor ante carga excéntrica, rigidez en tablero

- Cortantes transversales:

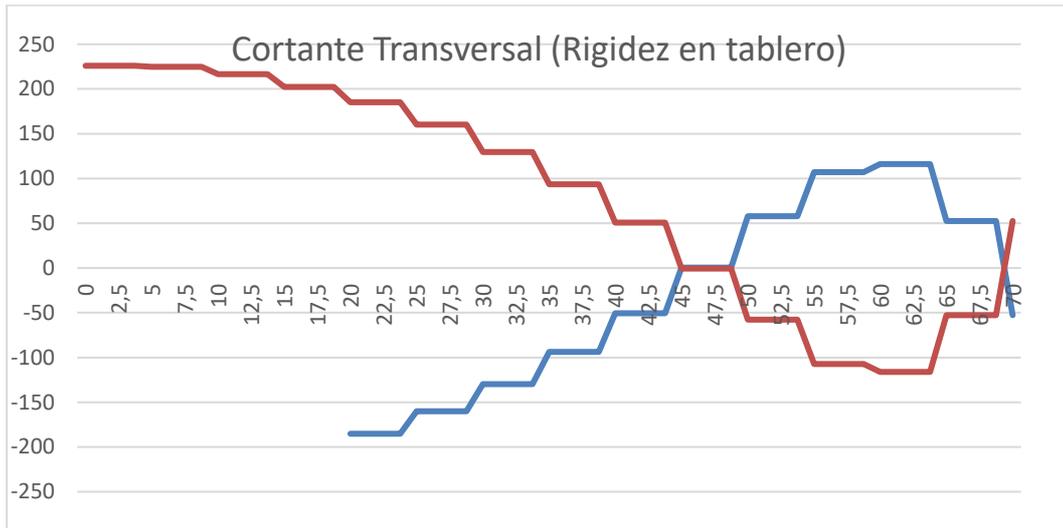


Imagen 29 Cortante transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero

- **Flectores transversales:**

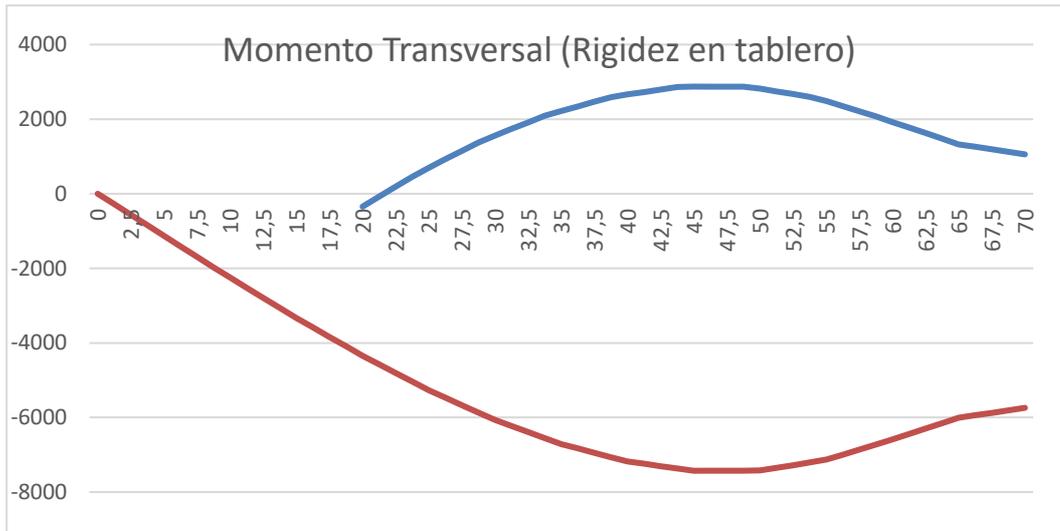


Imagen 30 Momento flector transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero

Carga transversal:

- **Desplazamientos transversales:**

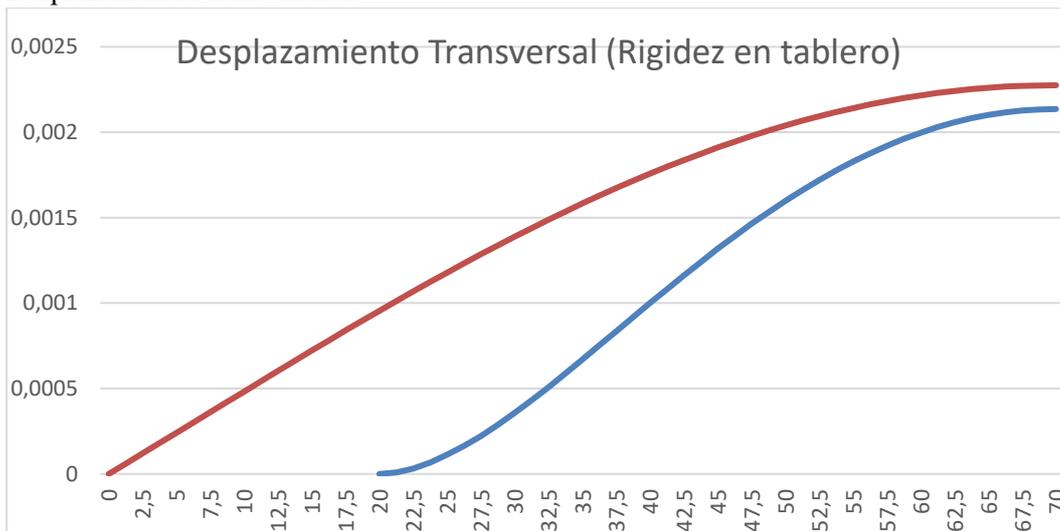


Imagen 31 Desplazamiento transversal ante carga transversal, rigidez en tablero

- Momentos torsores:

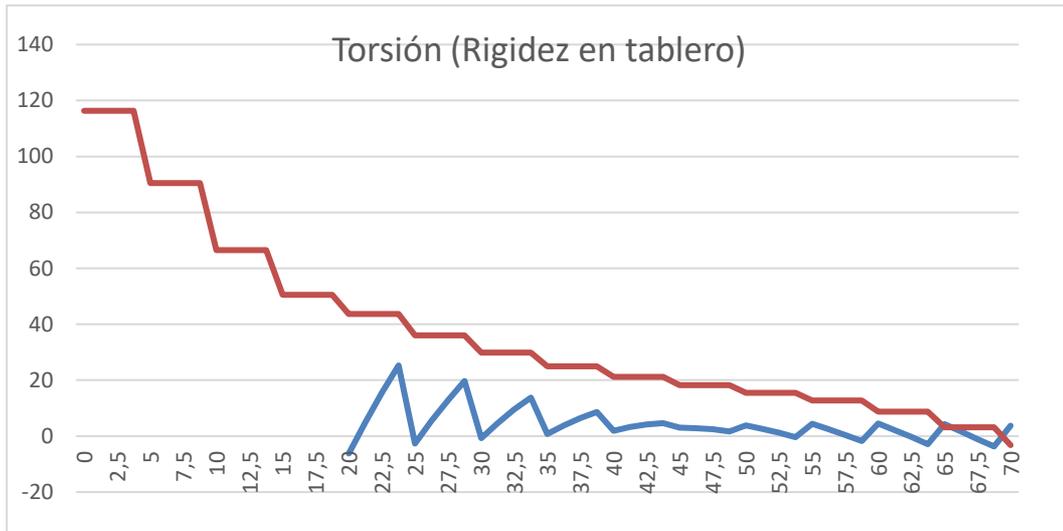


Imagen 32 Momento torsor ante carga transversal, rigidez en tablero

- Cortantes transversales:

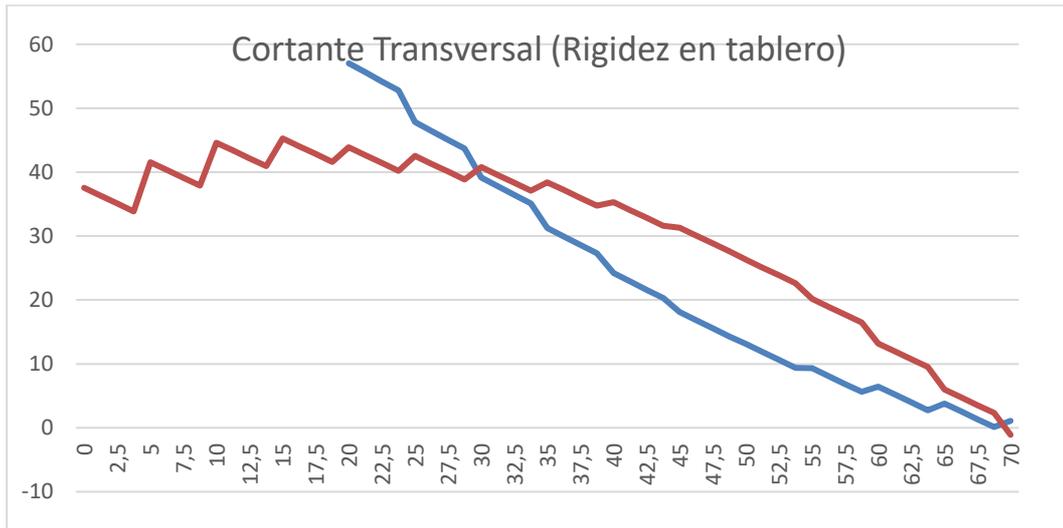


Imagen 33 Cortante transversal ante carga transversal, rigidez en tablero

- Flectores transversales:

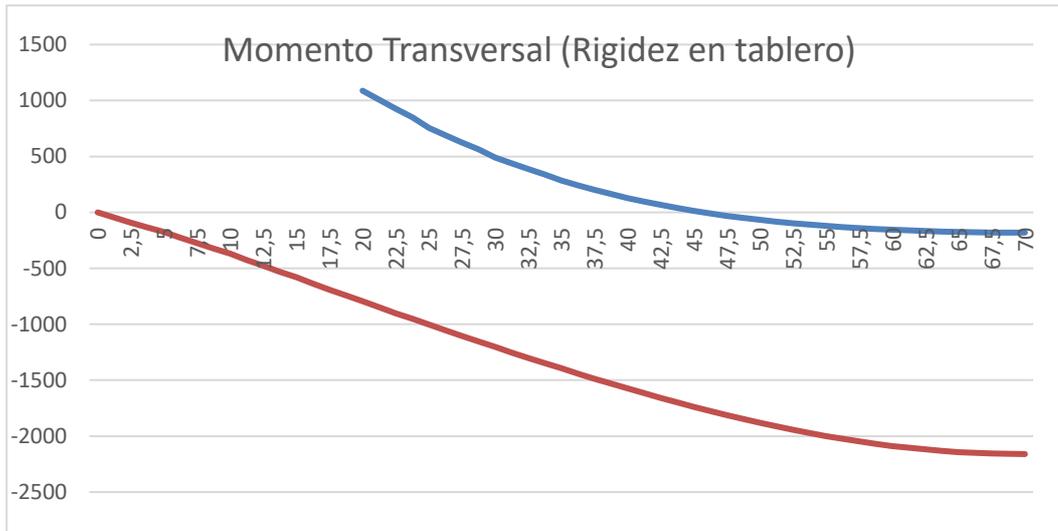


Imagen 34 Momento flector transversal ante carga transversal, rigidez en tablero

3.3. Análisis de resultados

En este apartado se van a comentar los resultados obtenidos en el modelo donde predomina la rigidez en el dintel respecto a los que habíamos obtenido con la rigidez principal en el arco, que se muestran en el apartado 2.5.2. *Resultados del modelo propuesto.*

3.3.1. Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:
Si comparamos los valores de desplazamiento transversal en uno y otro caso, vemos que la asignación de la rigidez a torsión al tablero no implica grandes cambios en los desplazamientos transversales, siendo los valores máximos muy similares, casi idénticos en el dintel. Al concentrarse la rigidez a torsión en el tablero, se acerca a este el centro de rigidez a torsión, apareciendo así mayores giros en el tablero. Como consecuencia de esto, los desplazamientos transversales son ligeramente menores que en el caso de concentrar la rigidez a torsión en el arco y desplazar el eje de giro hacia abajo, haciendo que el giro de torsión empuje hacia afuera al tablero.

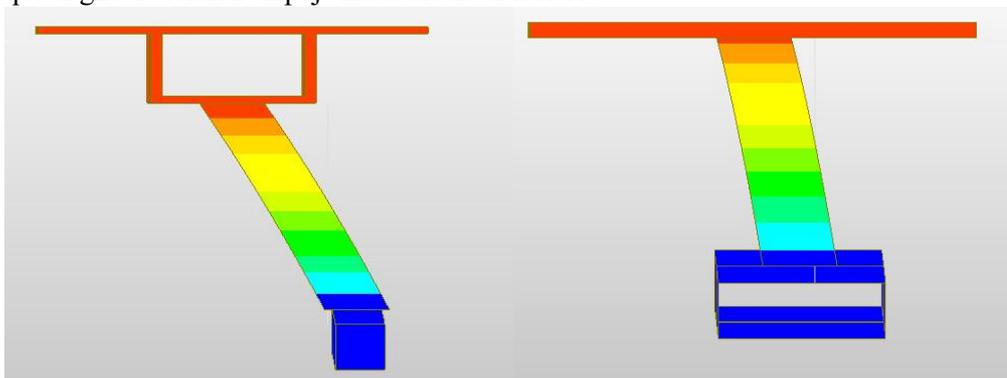


Imagen 35 Comparación de efecto generado por carga excéntrica (Sección: x = 98.75 m)

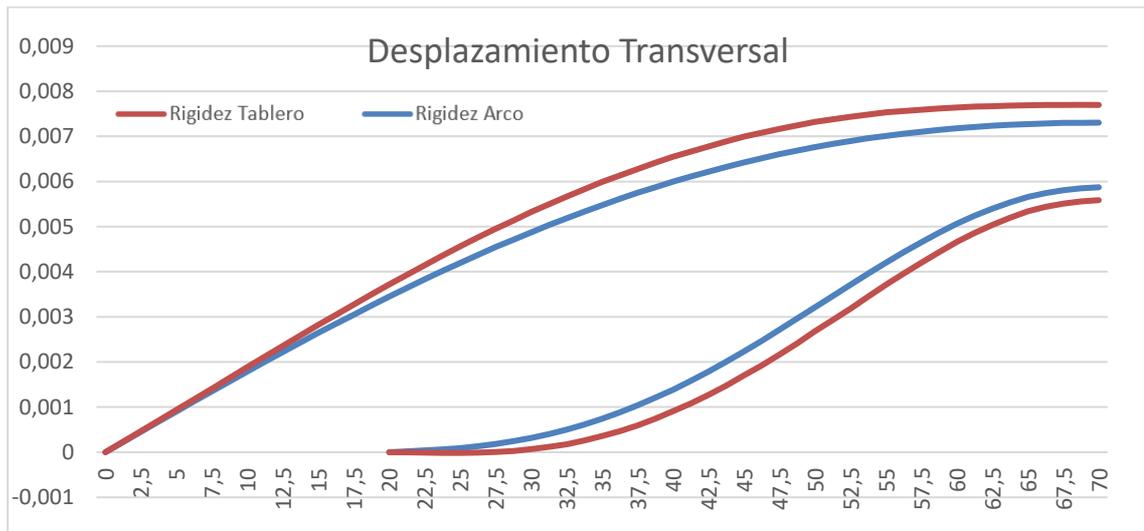


Imagen 36 Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica

- Momentos torsores:

Como cabe esperar, la torsión en el segundo caso pasa a ser principalmente soportada por el tablero en contraposición al primer caso, ya que la relación entre sus inercias a torsión ha sido invertida. La acción torsora proviene de la carga excéntrica sobre el tablero, es decir, se genera sobre el tablero, y en este caso es absorbida mayoritariamente por el tablero, no tiene que pasar a través de las pilas hacia el arco, reduciéndose así el dentado de las leyes de torsión en el arco.

El torsor, ahora absorbido por el tablero, se ve reducido de la misma manera que ocurría con el torsor del arco en el análisis primitivo al cambiar de signo el cortante. Así se observa que, hasta los arranques del arco, el torsor del tablero en el modelo de tablero rígido, es sensiblemente parecido, aunque un poco menor, al torsor del arco en el modelo de arco rígido. A partir de los arranques del arco, el torsor en el dintel vuelve a aumentar para asumir la sollicitación en este tramo, porque el par de fuerzas desaparece.

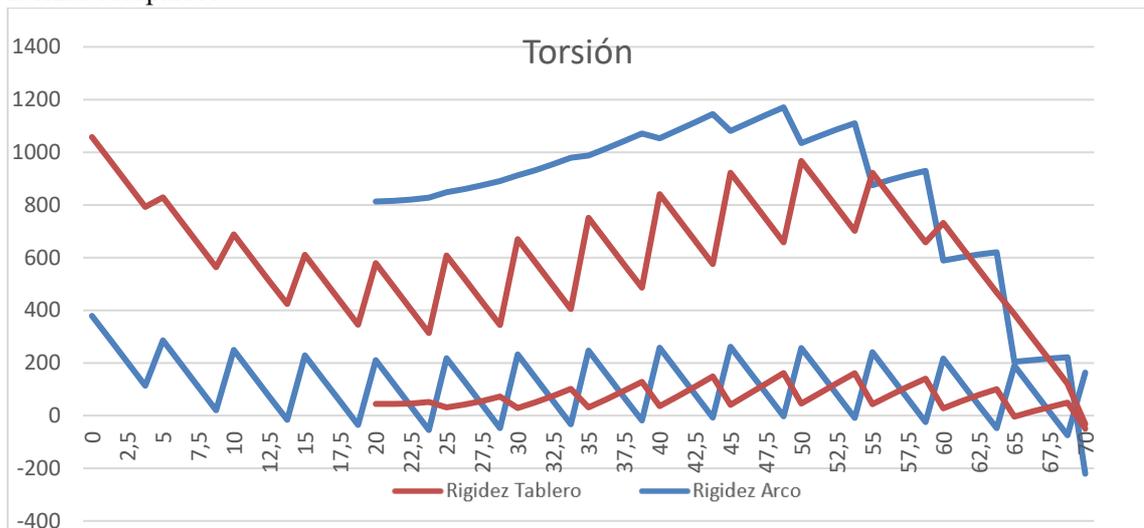


Imagen 37 Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga excéntrica

- Cortantes transversales:

El mecanismo de resistencia de la estructura se mantiene al predominar la rigidez a torsión en el tablero. Por ello podemos ver que los cortantes siguen asumiendo gran parte de la sollicitación torsora a cuartos de la luz.

En la siguiente tabla, trataremos de poner esto de manifiesto. Para ello, vamos a comparar los modelos con rigidez concentrada en arco y tablero. En un primer bloque, distinguimos la prevalencia de la rigidez y la flecha del arco en cada caso, que es idéntica. En el segundo y tercer bloque vemos los valores del cortante y la torsión en el tablero y en el arco respectivamente para cada uno de los casos, además se detalla la sección que se ha usado para el estudio. En el siguiente bloque se exponen: en primer lugar, el valor del brazo que posibilita el mecanismo que hace que el par de fuerzas colabore en la resistencia a torsión, en la siguiente fila vemos el cortante total (suma de cortantes de arco y dintel) y en la siguiente el torsor generado por el par de fuerzas (producto del torsor total por el brazo). La siguiente fila contiene el valor del torsor total (suma de torsores de arco y dintel). En el último bloque encontramos el porcentaje de la sollicitación torsora que resiste cada esfuerzo.

Los resultados permiten ver que aumenta el porcentaje de sollicitación torsora que es resistida por el par de fuerzas hasta un 88%. Esto sucede debido a que la rigidez a torsión del conjunto es menor cuando la concentramos en el tablero, lo que genera un aumento del cortante, que este caso se traduce en un aumento de efecto que tiene el par de fuerzas en el mecanismo que se enfrenta a la sollicitación torsora.

CARGA EXCÉNTRICA			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	m/m
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo 103 (26.25,0,16)			
V	130.70	160.06	kN
T	129.39	519.94	kNm
Arco, nodo 206/6 (26.25,0,3.52)			
V	-130.70	-160.06	kN
T	860.18	41.60	kNm
brazo	12.48	12.48	m
Vtotal	261.40	320.12	kN
Tv	3262.27	3996.38	kNm
Tt	989.57	561.54	kNm
%V	77%	88%	%
%T	23%	12%	%

Tabla 2 Comparación del efecto del esfuerzo cortante según la relación entre rigideces a torsión de arco y tablero

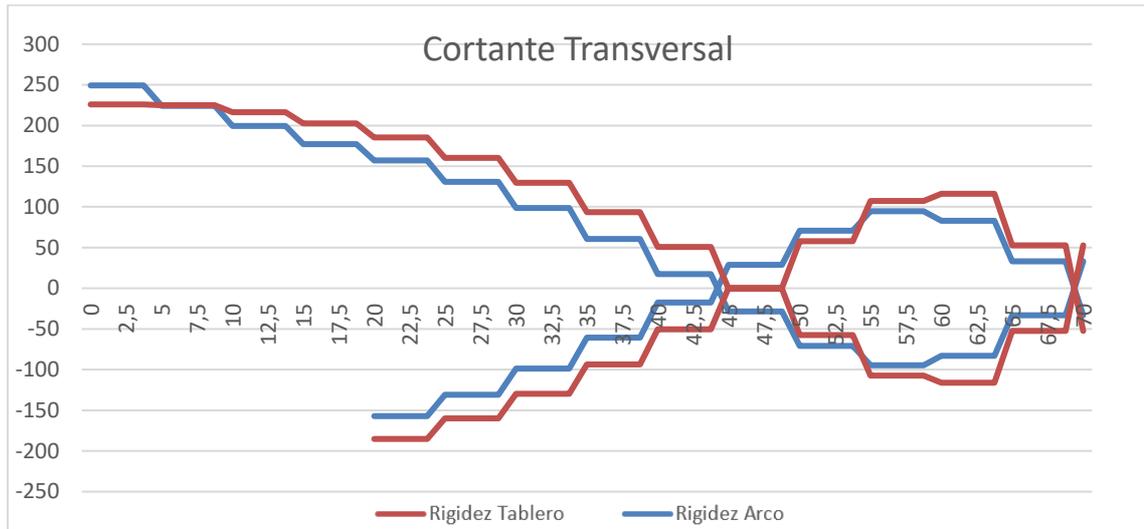


Imagen 38 Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica

- **Flectores transversales:**

Mantener constante la rigidez transversal genera que los momentos transversales, como ocurría con los desplazamientos sean muy similares en ambos modelos. La mayor relevancia del par de fuerzas se traduce aquí en una mayor curvatura del momento transversal cerca del arranque (donde más influencia tiene el par de fuerzas) que genera un aumento del momento transversal en arco y dintel.

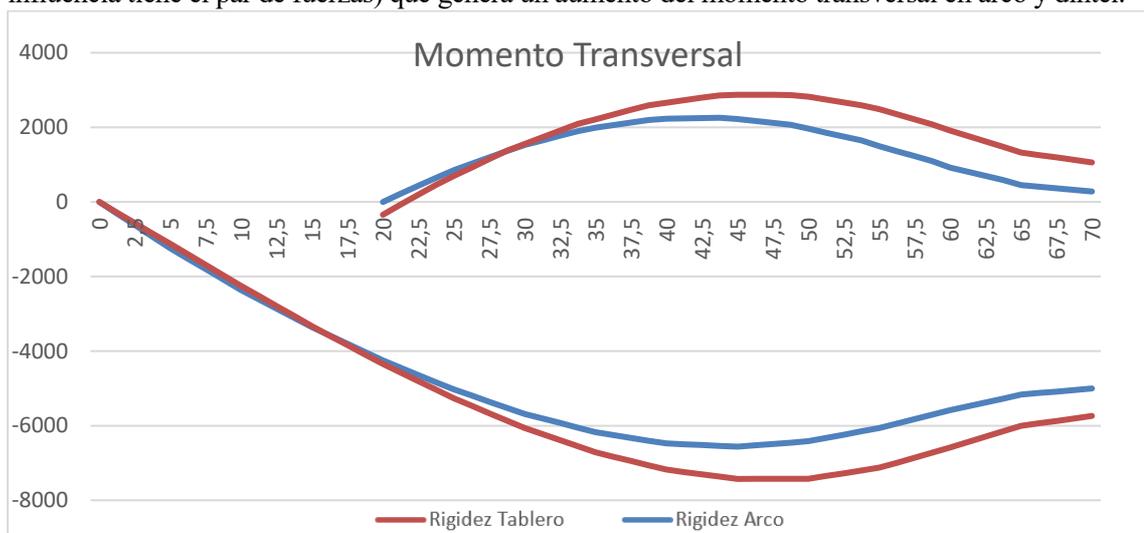


Imagen 39 Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica

3.3.2. Carga transversal:

- **Desplazamientos transversales:**

La rigidez transversal es muy similar en ambos modelos, pero se ve incrementada ligeramente, ya que como comentábamos en el caso de carga excéntrica, el conjunto de la estructura es más flexible cuando concentramos la rigidez a torsión en el dintel.

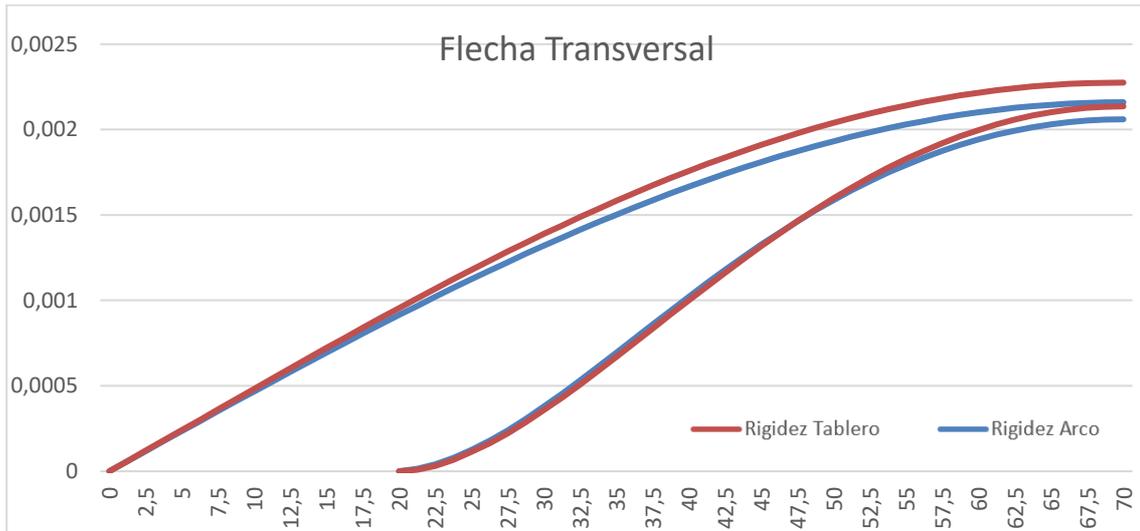


Imagen 40 Comparación de desplazamiento transversal según rigidez predominante ante carga transversal

- Momentos torsores y cortantes transversales:

En este caso, tiene especial relevancia analizar conjuntamente estos esfuerzos. Como bien apunta J. Manterola en su análisis, el cortante transversal en arco y tablero está constituido por dos valores, la acumulación natural de carga transversal de viento y el par de fuerzas que se genera para reducir el torsor sobre el arco.

Observando los esfuerzos de torsión vemos que, como es lógico, el cambio de la rigidez a torsión al tablero se traduce en que aumenta la torsión en él, disminuyendo en el arco. Pero vemos que la torsión total es menor que en el modelo original (con rigidez predominante en el arco. Esto invita a pensar, que el modelo del tablero rígido la colaboración del par de fuerzas para enfrentar a la sollicitación torsora es mayor, pero si observamos el diagrama de esfuerzos cortantes comprobamos que no es así.

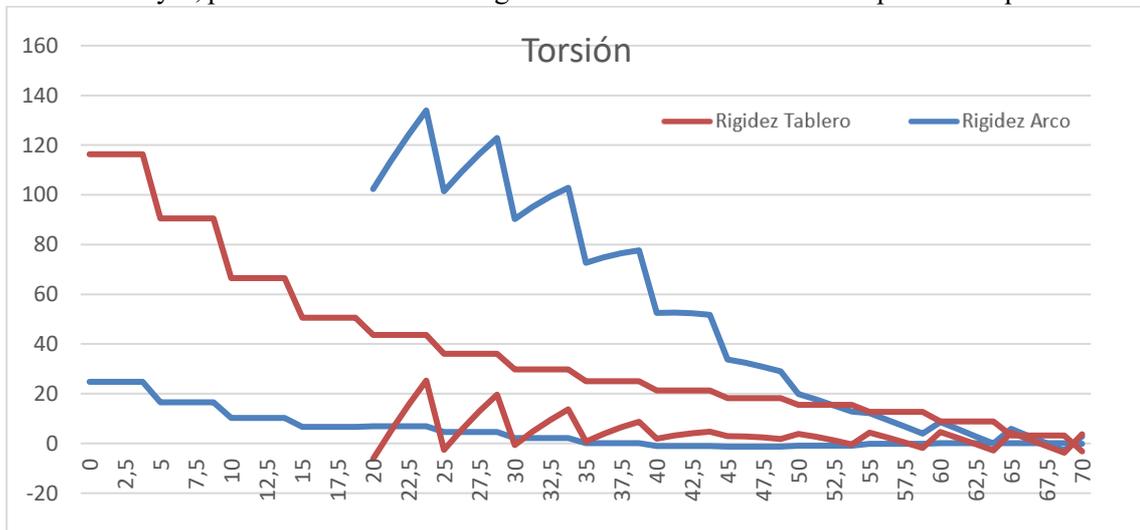


Imagen 41 Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga transversal

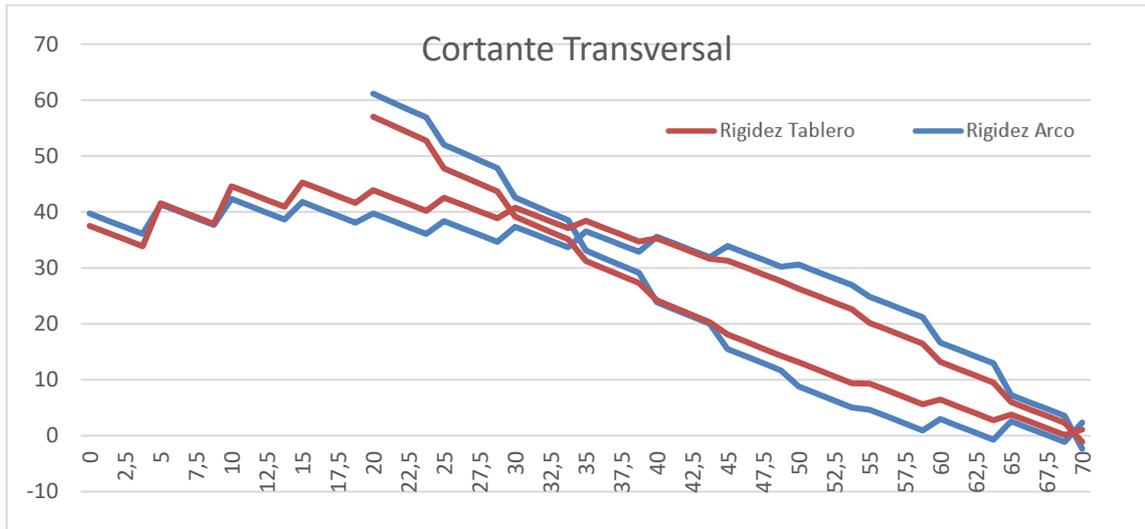


Imagen 42 Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga transversal

Para comprobar que ocurre en este caso, hemos recurrido a estudiar la evolución de la sollicitación a lo largo del puente. Para ello hemos elegido cuatro secciones transversales ($x = 26.25$ m, $x = 32.5$ m, $x = 45$ m, $x = 57.5$ m) en las que hemos calculado los valores de torsión total, cortante total y hemos evaluado la sollicitación torsora. En la tabla siguiente se mostrará para cada sección, una comparación de los resultados entre el modelo con rigidez a torsión predominante en arco y el modelo con rigidez a torsión predominante en tablero.

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (26.25,0,16)			
V	37.13	-41.31	kN
T	4.63	36.06	kNm
Arco, nodo (26.25,0,X)			
V	50.61	-46.42	kN
T	109.30	5.47	kNm
Vtotal	-13.48	5.11	kN
Ttotal	113.93	41.53	kNm
Tarco	109.30	5.47	kNm
Solic. Torsora	-54.30	105.32	kNm

Tabla 3 Solicitación torsora x = 26.25 m

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (45,0,16)			
V	33.91	-31.31	kN
T	-1.28	18.19	kNm
Arco, nodo (45,0,X)			
V	15.51	-18.10	kN
T	33.79	3.00	kNm
Vtotal	18.40	-13.21	kN
Ttotal	32.51	21.19	kNm
Tarco	33.79	3.00	kNm
Solic. Torsora	262.14	-143.72	kNm

Tabla 5 Solicitación torsora x = 45 m

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (32.5,0,16)			
V	34.91	-38.33	kN
T	2.12	29.83	kNm
Arco, nodo (32.5,0,X)			
V	39.87	-36.45	kN
T	99.30	9.50	kNm
Vtotal	-4.96	-1.88	kN
Ttotal	101.42	39.33	kNm
Tarco	99.30	9.50	kNm
Solic. Torsora	39.52	15.86	kNm

Tabla 4 Solicitación torsora x = 32.5 m

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (57.5,0,16)			
V	22.40	-17.71	kN
T	-0.20	12.70	kNm
Arco, nodo (57.5,0,X)			
V	2.17	-6.86	kN
T	6.74	0.40	kNm
Vtotal	20.23	-10.85	kN
Ttotal	6.54	13.10	kNm
Tarco	6.74	0.40	kNm
Solic. Torsora	259.01	-122.35	kNm

Tabla 6 Solicitación torsora x = 57.5 m

Podemos comprobar así, que en general, el modelo con rigidez predominante en el tablero provoca la disminución de la solicitación torsora en la estructura, aunque cuando nos acercamos a los apoyos del arco este efecto se reduce e incluso se invierte. Lo que explica que el efecto del par de fuerzas no aumente como se podía esperar al analizar los diagramas de torsión.

- Flectores transversales:

Como ocurre en el caso de carga excéntrica, los momentos torsores se mantienen iguales en tablero y arco como consecuencia de la invariabilidad de la rigidez transversal de un modelo a otro.

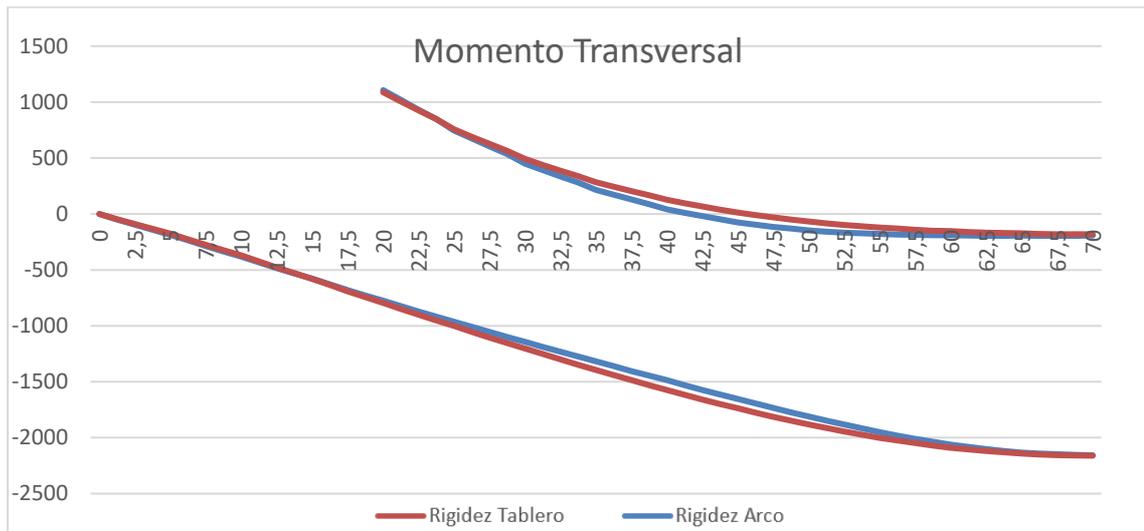


Imagen 43 Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga transversal

3.4. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes que obtenemos de este estudio son:

- La concentración de la rigidez a torsión en el dintel provoca un comportamiento más flexible de la estructura.
- Ante cargas excéntricas, la concentración de la rigidez a torsión en el tablero implica un mayor efecto del efecto cortante para enfrentar a la sollicitación torsora.
- Cuando sometemos a la estructura a carga transversal, se comprueba que el modelo que concentra la rigidez en el tablero provoca la disminución de la sollicitación torsora.

4. INFLUENCIA DE LA RELACIÓN FLECHA-LUZ

El comportamiento de los puentes arco ante cargas excéntricas y transversales está íntimamente ligado a la relación flecha-luz del arco. Por ello, en adelante vamos a comprobar cómo evolucionan los esfuerzos en este tipo de puentes en función de la relación flecha-luz que posea el arco.

Para ello diferenciaremos, como en los apartados anteriores, los dos casos de carga que propone J. Manterola: excéntrica y de viento, para cada una de las relaciones que estudiaremos.

Esto nos proporcionará una idea de la influencia que tiene la variación de la flecha en puentes arco sometidos a dichas cargas.

Partiendo del modelo de J. Manterola, con la rigidez a torsión predominante en el arco, se estudiarán cuatro relaciones distintas flecha-luz, desde la más clásica como $f = \frac{L}{5}$ hasta arcos muy rebajados $f = \frac{L}{16}$, pasando por dos situaciones intermedias de $f = \frac{L}{6.6}$ (relación usada por J. Manterola en el estudio de referencia) y $f = \frac{L}{10}$.

Durante el estudio se mantendrá la luz constante de 100 metros y será la flecha la que vaya variando según la relación entre ellas.

Para poder comparar los resultados obtenidos en los distintos casos de relación flecha-luz calcularemos secciones distintas del arco para cada caso, como se explica a continuación.

4.1. Cálculo de las secciones

Para poder hacer un estudio comparativo entre los diferentes casos, se calcularán diferentes secciones del arco para cada caso, de forma que las tensiones normales se mantengan constantes en el arco. Para ello, partiremos del caso $f = \frac{L}{6.6}$ que usa J. Manterola, y a partir de los axiles que obtenemos en MIDAS Civil [3] para cada uno de los otros casos, calcularemos la nueva sección que iguale las tensiones normales a las obtenidas en el modelo del que partimos. Mantendremos el canto de la sección original ($h = 1,6\text{ m}$) y el espesor ($e = 0,2\text{ m}$) constante y variaremos la dimensión b .

Las secciones de tablero y pilares se mantendrán con las mismas dimensiones que en el estudio de partida.

En adelante se obtienen las características de la sección del arco para cada uno de los casos:

Caso 0: L/f = 6.6

$$\text{Luz} := 100\text{r} \quad f_0 := 15\text{r} \quad h := 1.6\text{r} \quad b := 4.5\text{r} \quad t := 0.2\text{r}$$

$$N_{\text{max}} := 3297.8\text{kN}$$

$$A_0 := 2 \cdot h \cdot t + (b - 2 \cdot t) \cdot 2 \cdot t = 2.28\text{m}^2$$

$$\sigma := \frac{N_{\text{max}}}{A_0} = 1.446 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Caso I: L/f=5

$$\text{Luz} := 100\text{r} \quad f1 := \frac{\text{Luz}}{5} = 20\text{m}$$

$$N_{\text{maxi}} := 2728.3\text{kN}$$

$$A1 := \frac{N_{\text{maxi}}}{\text{sigma}} = 1.886\text{m}^2$$

$$b1 := \frac{(A1 - 2 \cdot h \cdot t + 4 \cdot t^2)}{2t} = 3.516\text{m}$$

Caso II: L/f=10

$$\text{Luz} := 100\text{r} \quad f2 := \frac{\text{Luz}}{10} = 10\text{m}$$

$$N_{\text{maxii}} := 4449.3\text{kN}$$

$$A2 := \frac{N_{\text{maxii}}}{\text{sigma}} = 3.076\text{m}^2$$

$$b2 := \frac{(A2 - 2 \cdot h \cdot t + 4 \cdot t^2)}{2 \cdot t} = 6.49\text{m}$$

Caso III: L/f = 16

$$\text{Luz} := 100\text{r} \quad f3 := \frac{\text{Luz}}{16} = 6.25\text{m}$$

$$N_{\text{maxiii}} := 6230.3\text{kN}$$

$$A3 := \frac{N_{\text{maxiii}}}{\text{sigma}} = 4.308\text{m}^2$$

$$b3 := \frac{(A3 - 2 \cdot h \cdot t + 4 \cdot t^2)}{2t} = 9.569\text{m}$$

Por tanto, las secciones del puente con las que obtendremos los resultados son las siguientes:

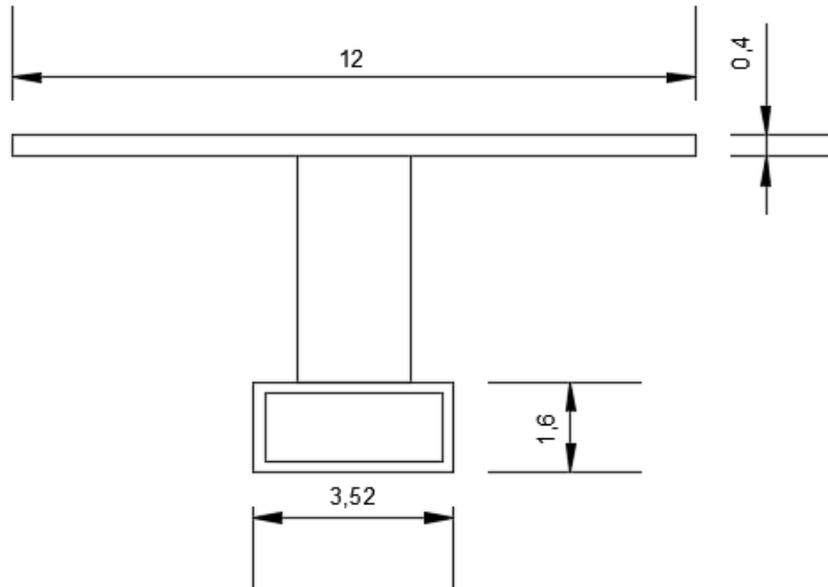


Imagen 44 Sección transversal del puente ($f = L/5$)

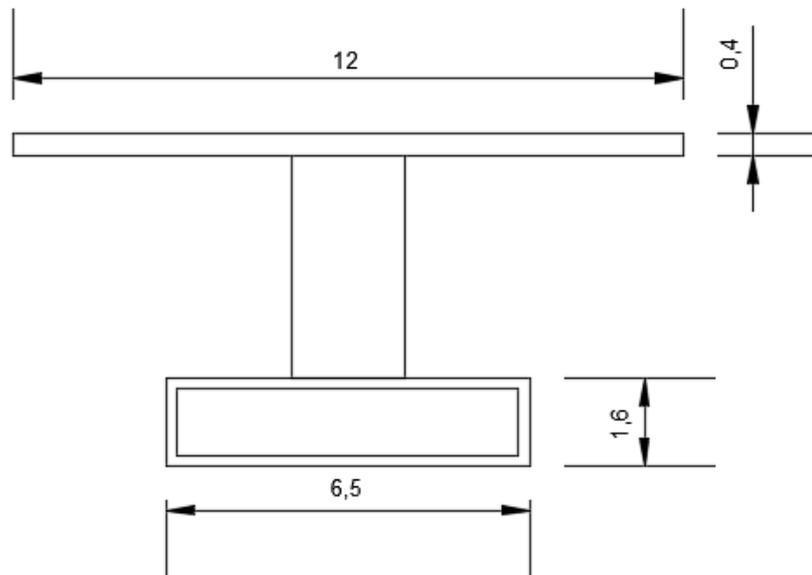


Imagen 45 Sección transversal del puente ($f = L/10$)

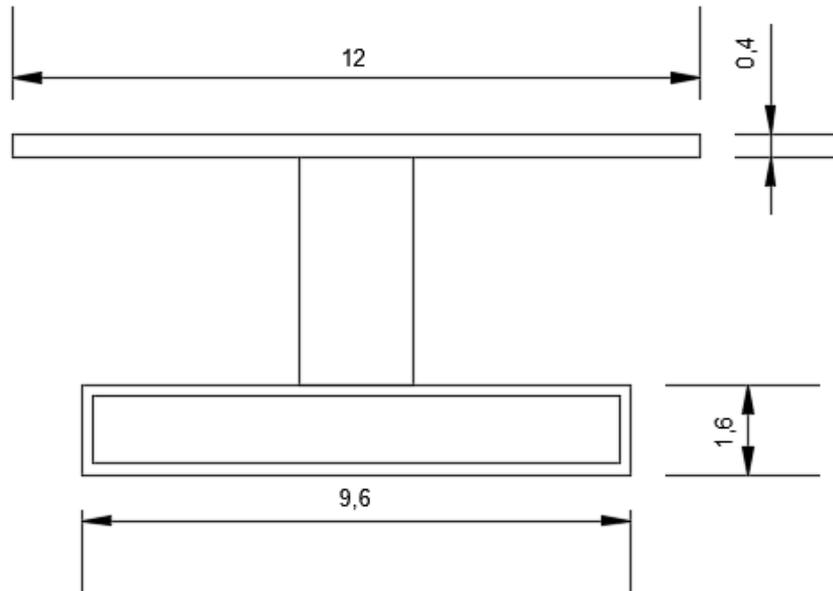


Imagen 46 Sección transversal del puente ($f = L/16$)

Es importante resaltar que la variación de la dimensión b en la sección transversal del arco implica un cambio de la rigidez transversal. Esto será relevante a la hora de analizar los resultados, ya que aportarán variaciones siempre que haya que considerar la influencia de la rigidez transversal, no solo del arco, sino también del conjunto.

En el caso 0, las secciones no varían ya que se trata del modelo de partida.

4.2. Resultados

4.2.1. Caso 0: $f = \frac{L}{6.6}$

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

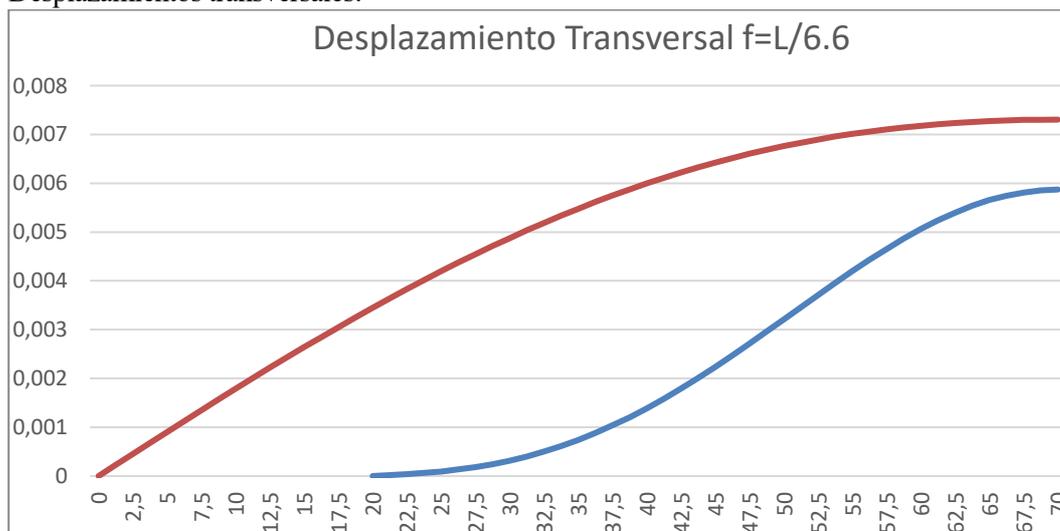


Imagen 47 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$

- Momentos torsores:

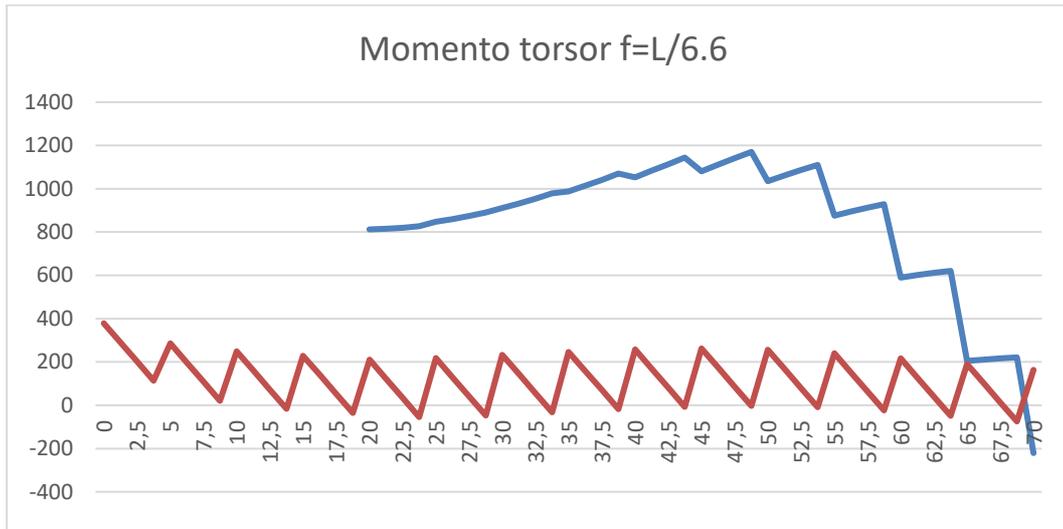


Imagen 48 Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/6.6$

- Cortantes transversales:

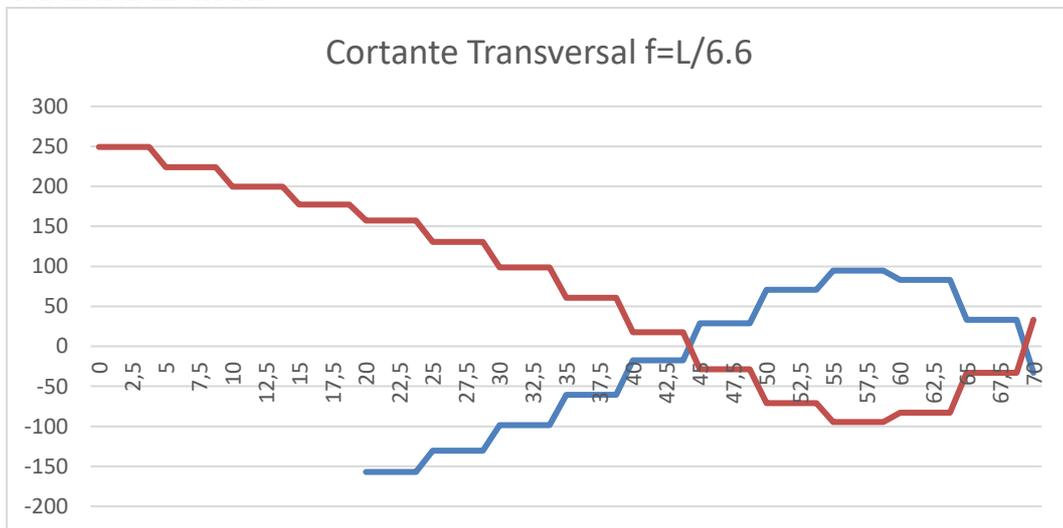


Imagen 49 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$

- Flectores transversales:

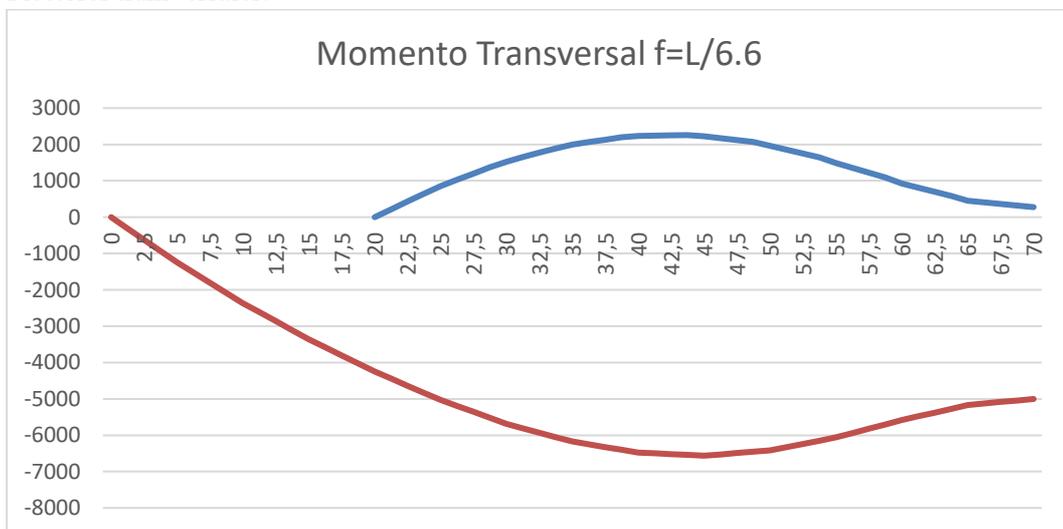
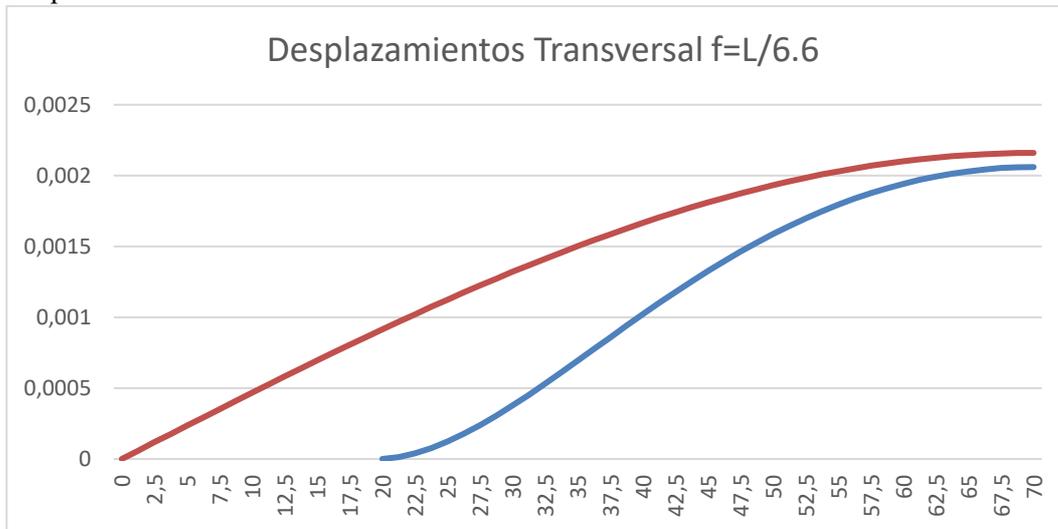


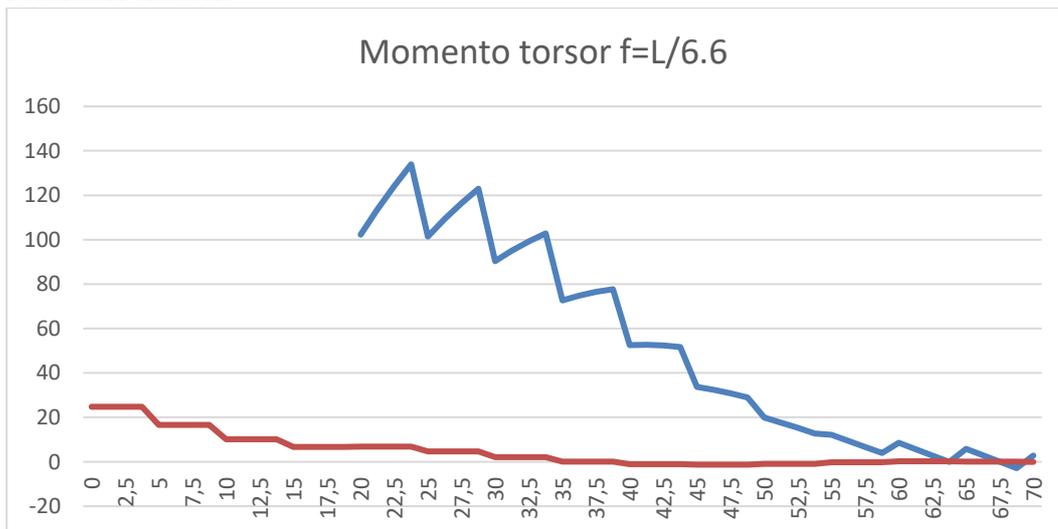
Imagen 50 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$

Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

Imagen 51 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/6.6$

- Momentos torsores:

Imagen 52 Momento torsor ante carga transversal $f=L/6.6$

- Cortantes transversales:

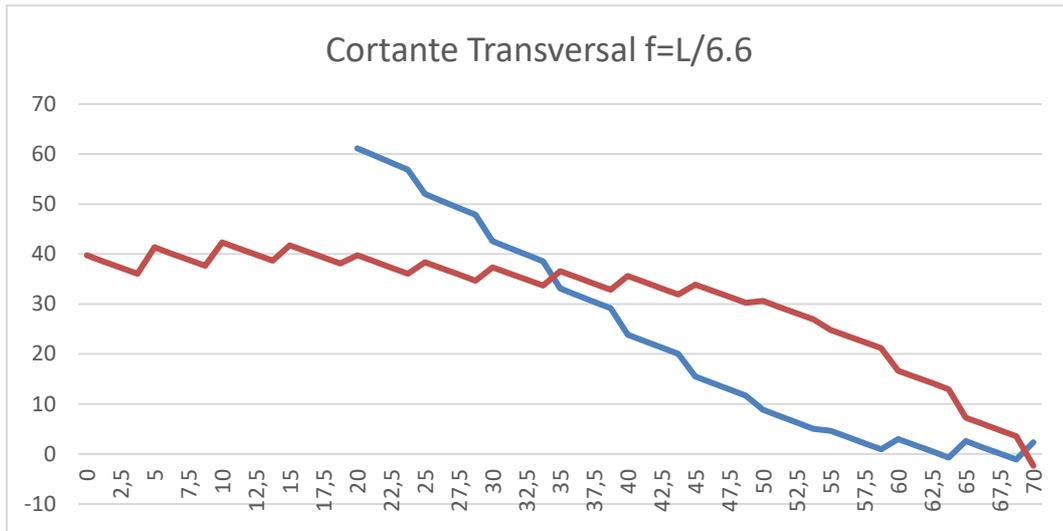


Imagen 53 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/6.6$

- Fletores transversales:

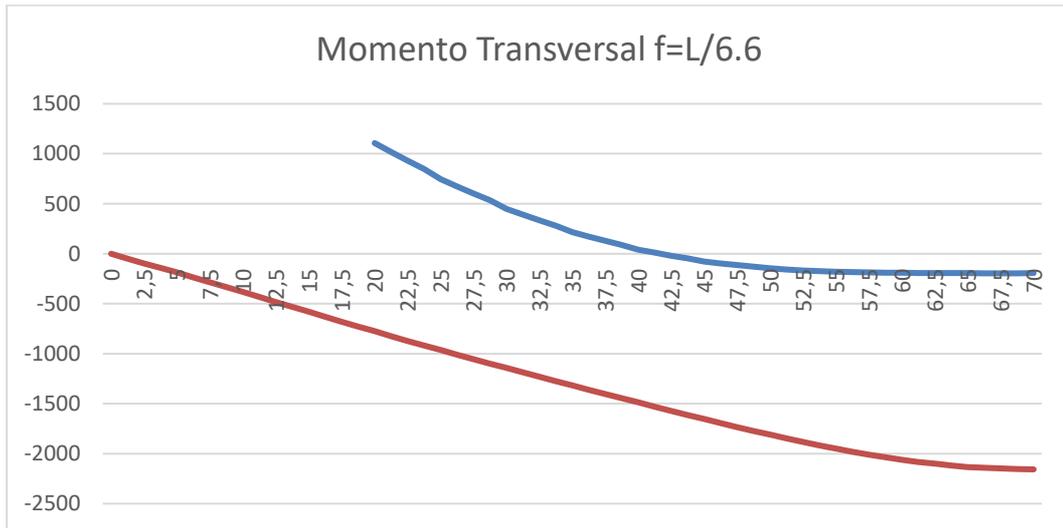


Imagen 54 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/6.6$

4.2.2. Caso I: $f = \frac{L}{5}$

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

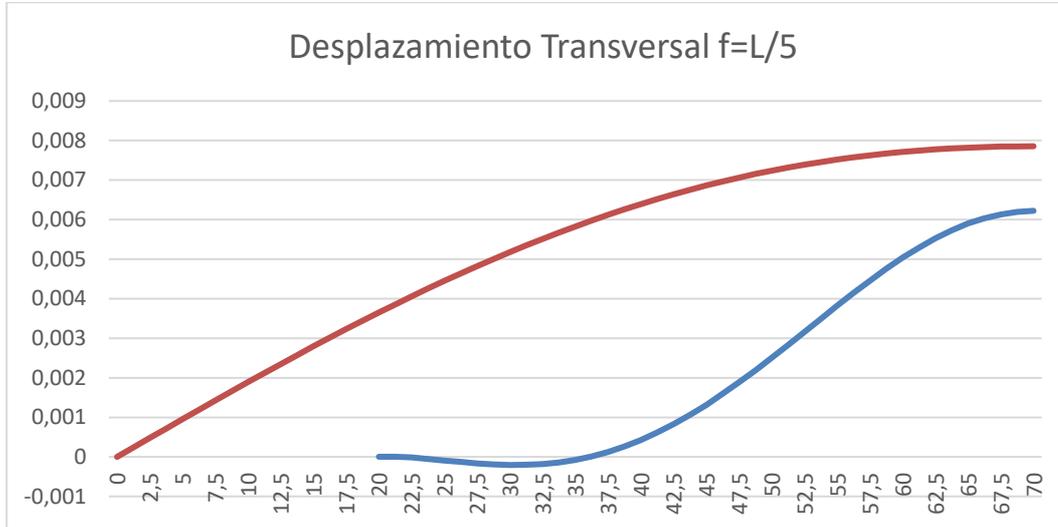


Imagen 55 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica $f=L/5$

- Momentos torsores:

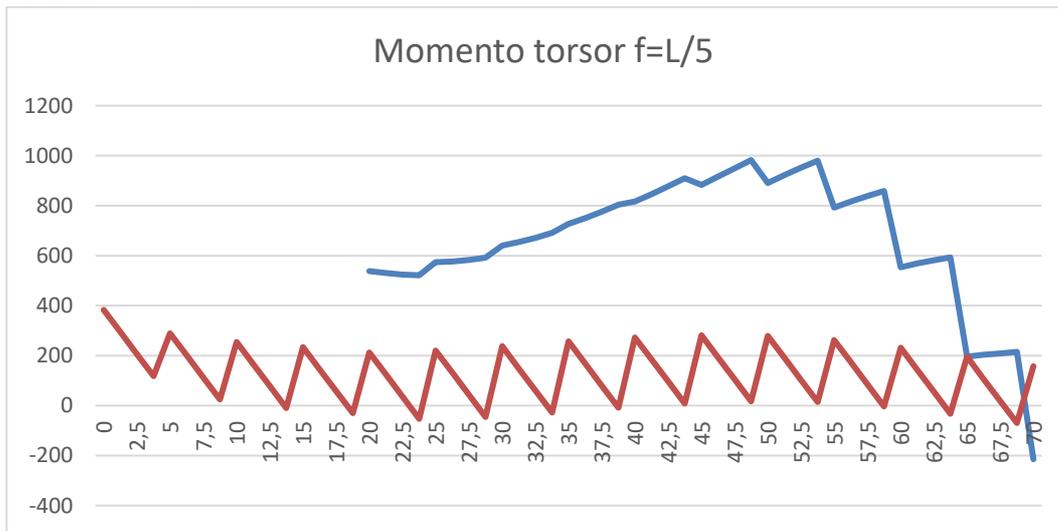


Imagen 56 Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/5$

- Cortantes transversales:

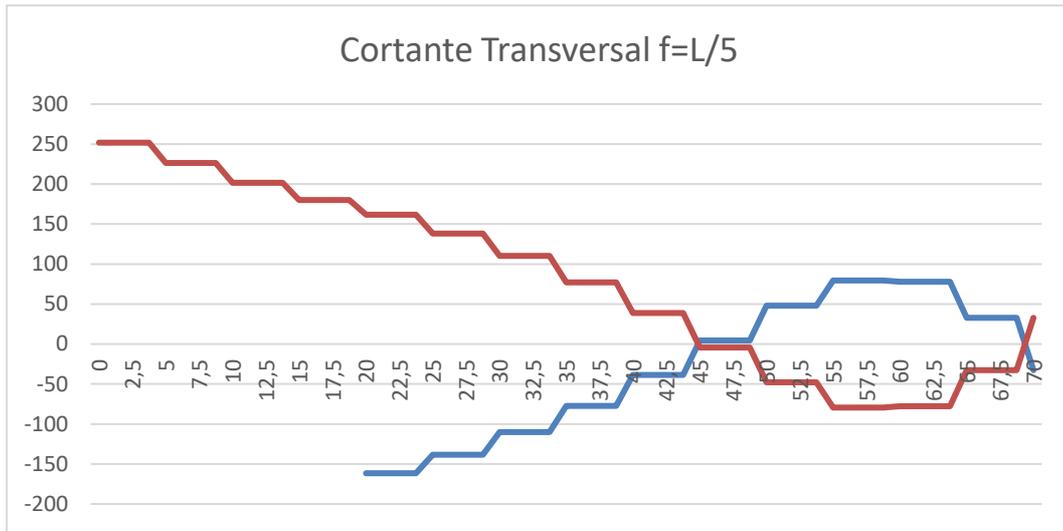


Imagen 57 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/5$

- Flectores transversales:

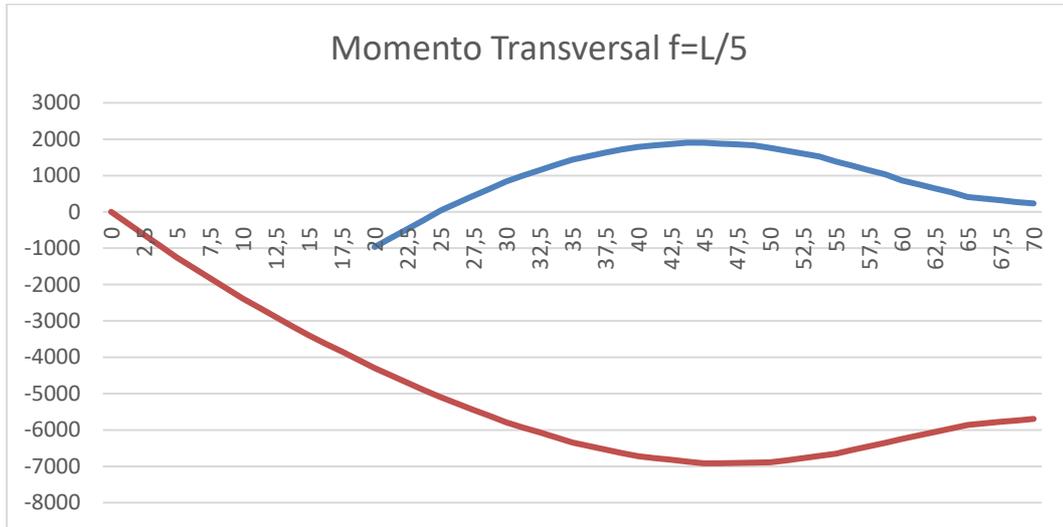


Imagen 58 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/5$

Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

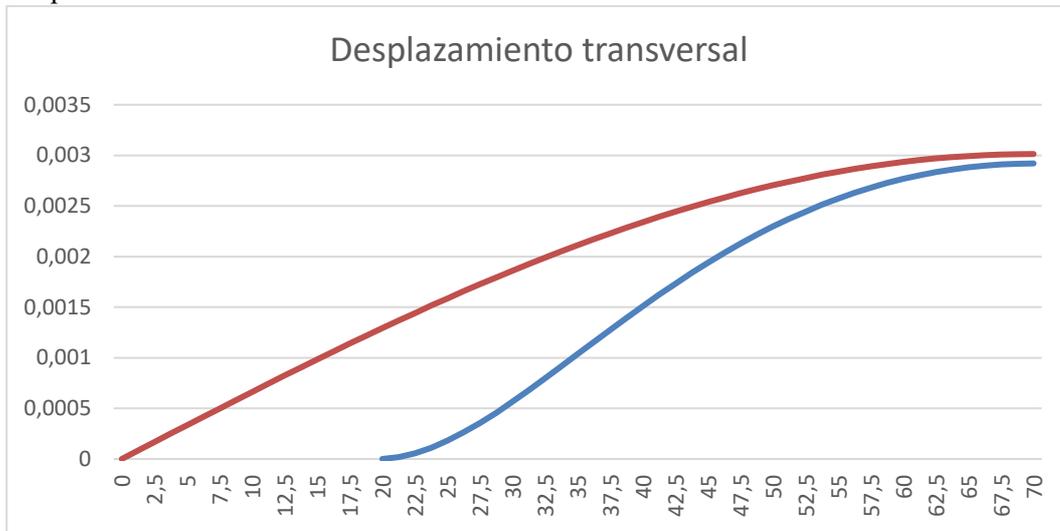


Imagen 59 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/5$

- Momentos torsores:

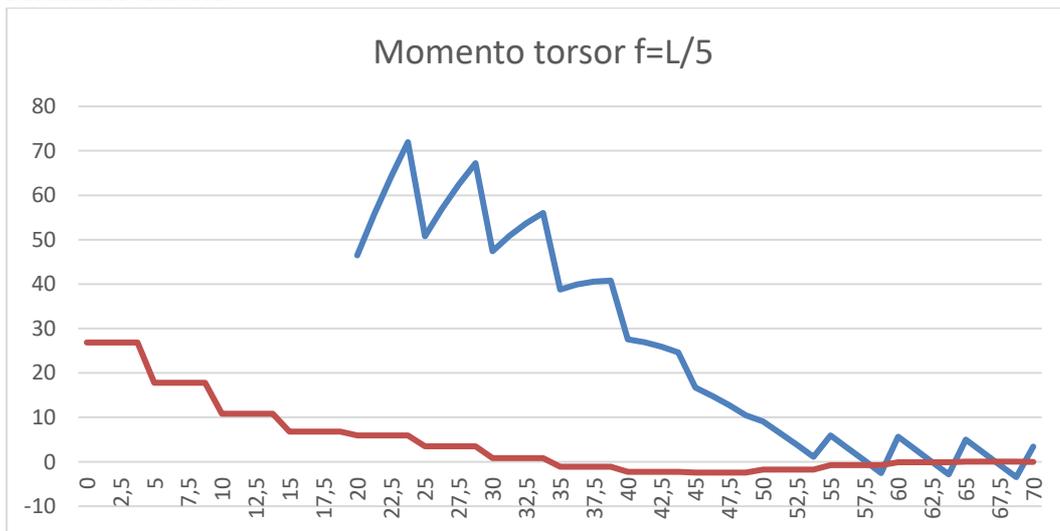


Imagen 60 Momento torsor ante carga transversal $f=L/5$

- Cortantes transversales:

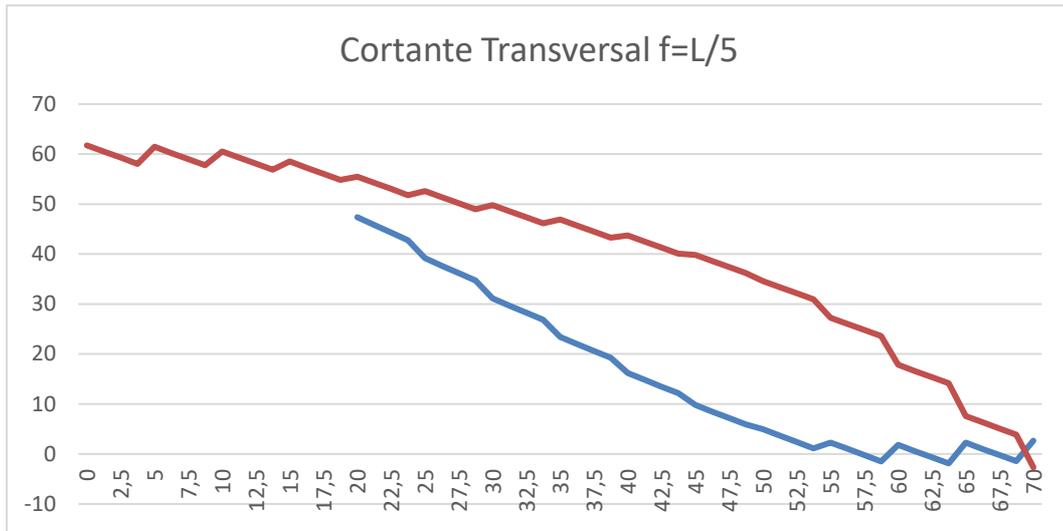


Imagen 61 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/5$

- Flectores transversales:

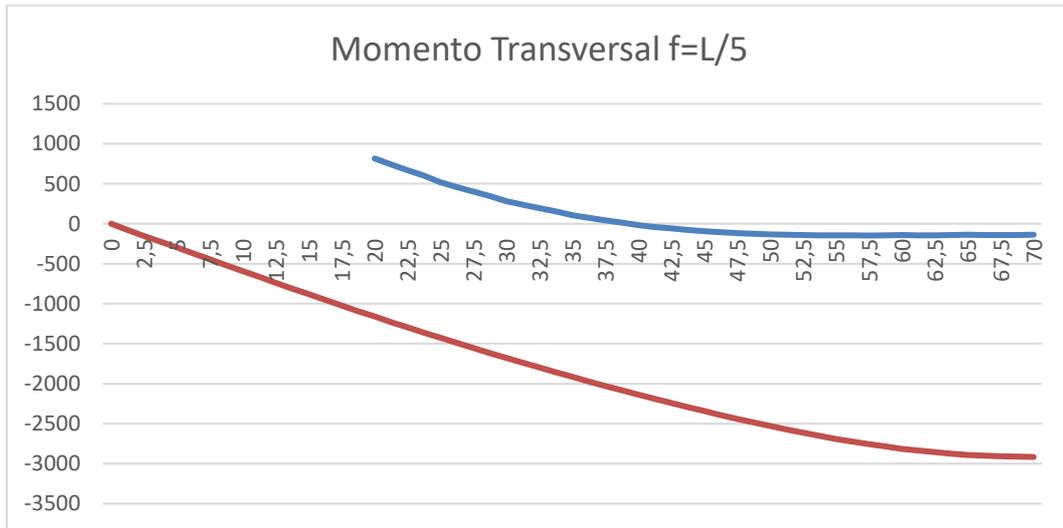


Imagen 62 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/5$

4.2.3. Caso II: $f = \frac{L}{10}$

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

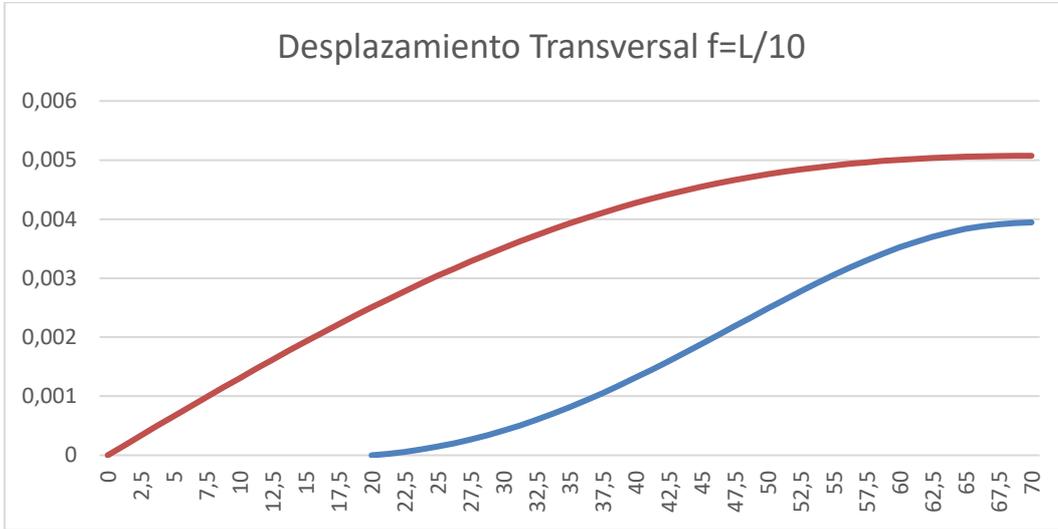


Imagen 63 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica f=L/10

- Momentos torsores:

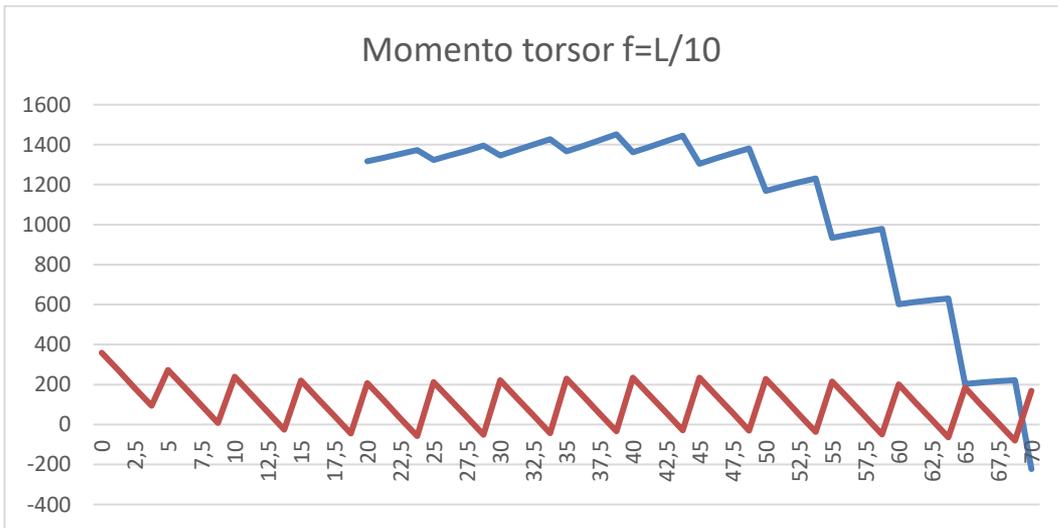


Imagen 64 Momento torsor ante carga excéntrica f=L/10

- Cortantes transversales:

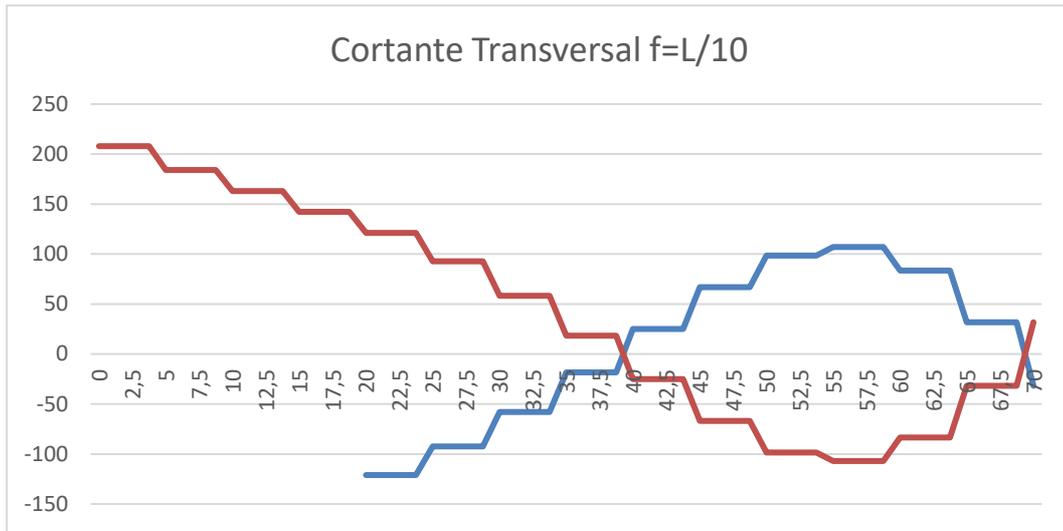


Imagen 65 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/10$

- Flectores transversales:

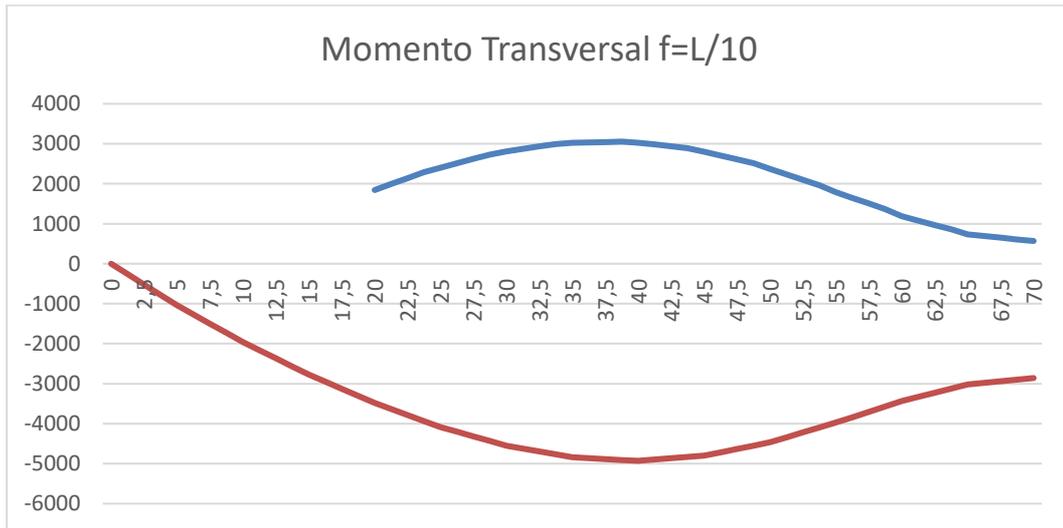


Imagen 66 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/10$

Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

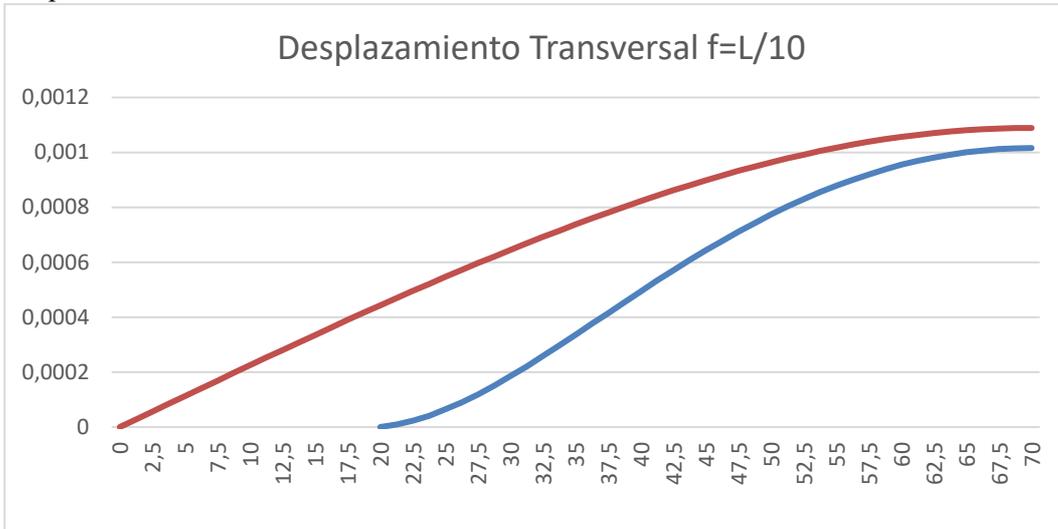


Imagen 67 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/10$

- Momentos torsores:

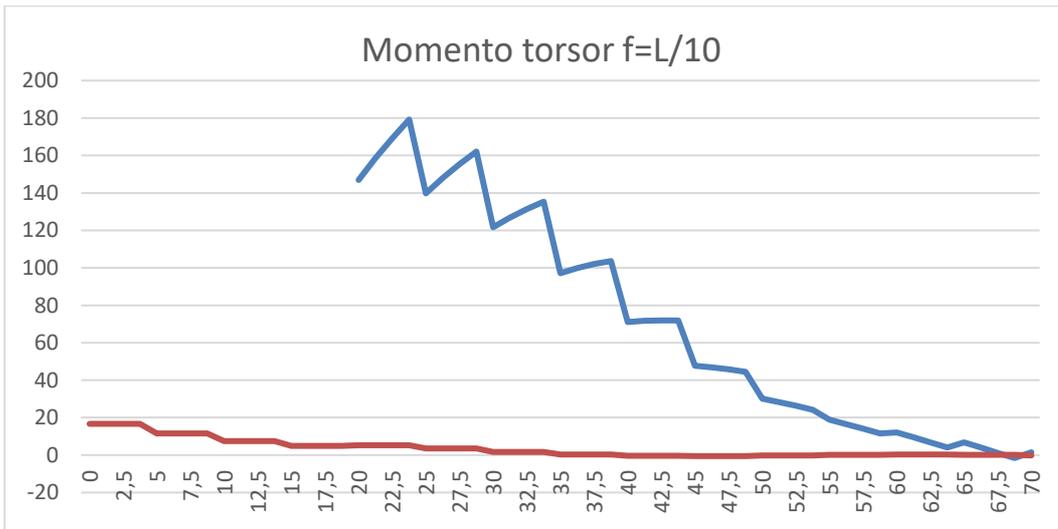


Imagen 68 Momento torsor ante carga transversal $f=L/10$

- Cortantes transversales:

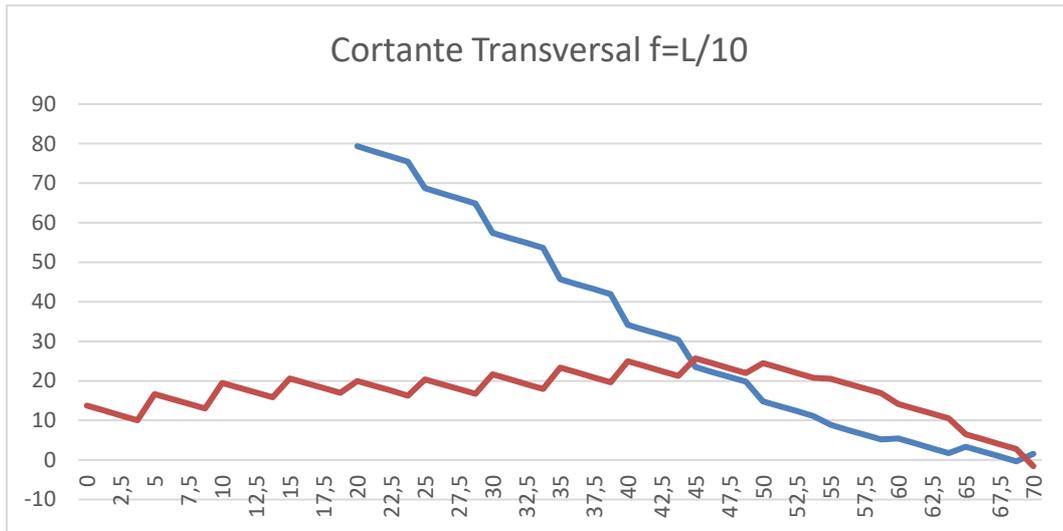


Imagen 69 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/10$

- Flectores transversales:

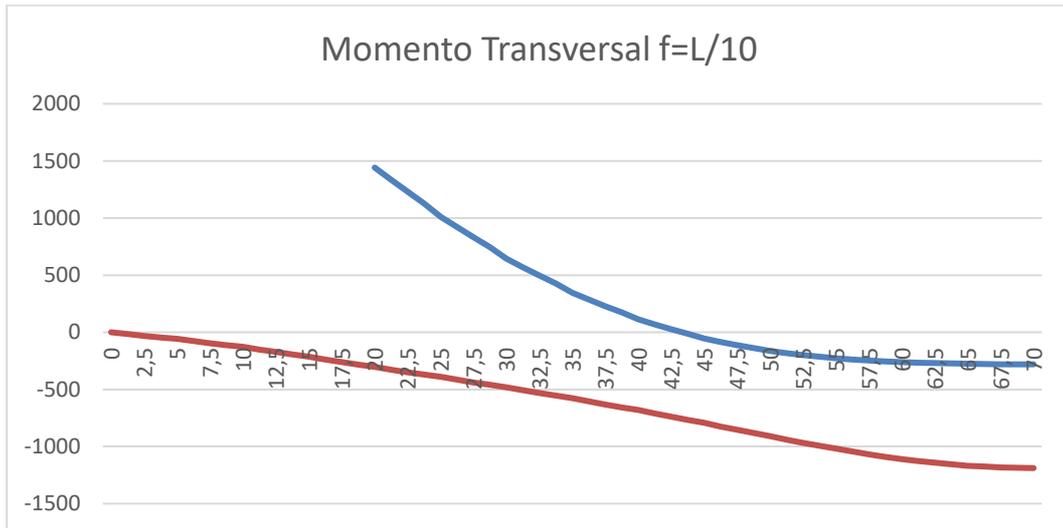


Imagen 70 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/10$

4.2.4. Caso III: $f = \frac{L}{16}$

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

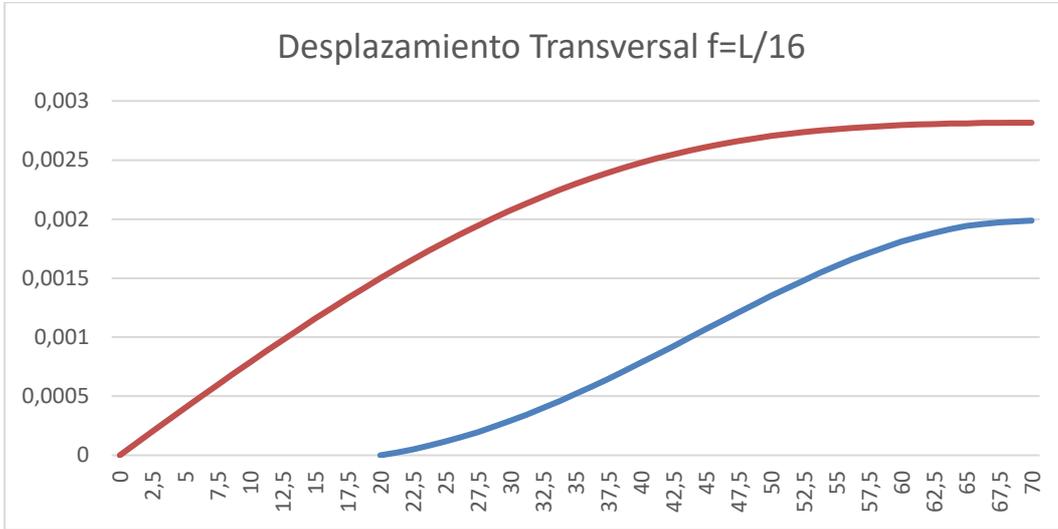


Imagen 71 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica f=L/16

- Momentos torsores:

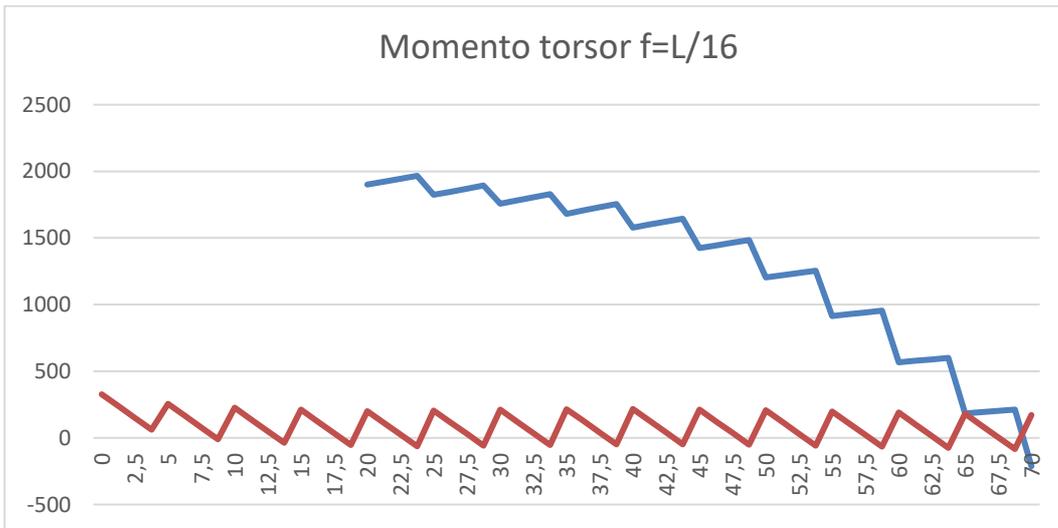


Imagen 72 Momento torsor ante carga excéntrica f=L/16

- Cortantes transversales:

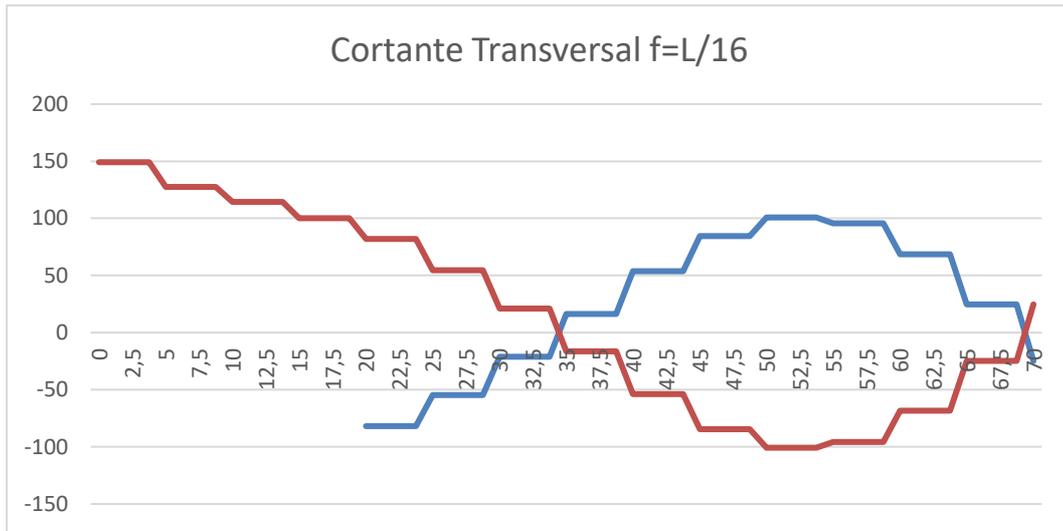


Imagen 73 Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/16$

- Fletores transversales:

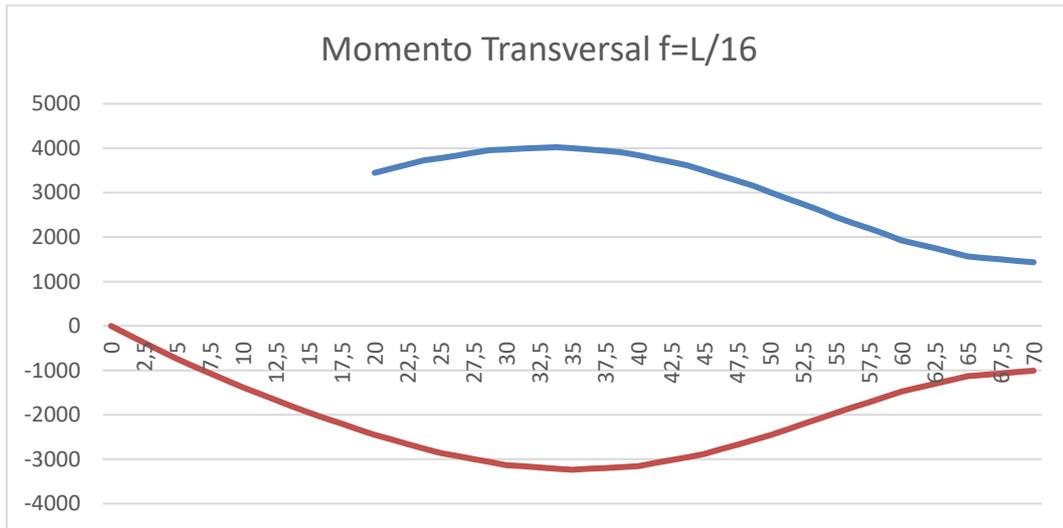


Imagen 74 Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/16$

Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

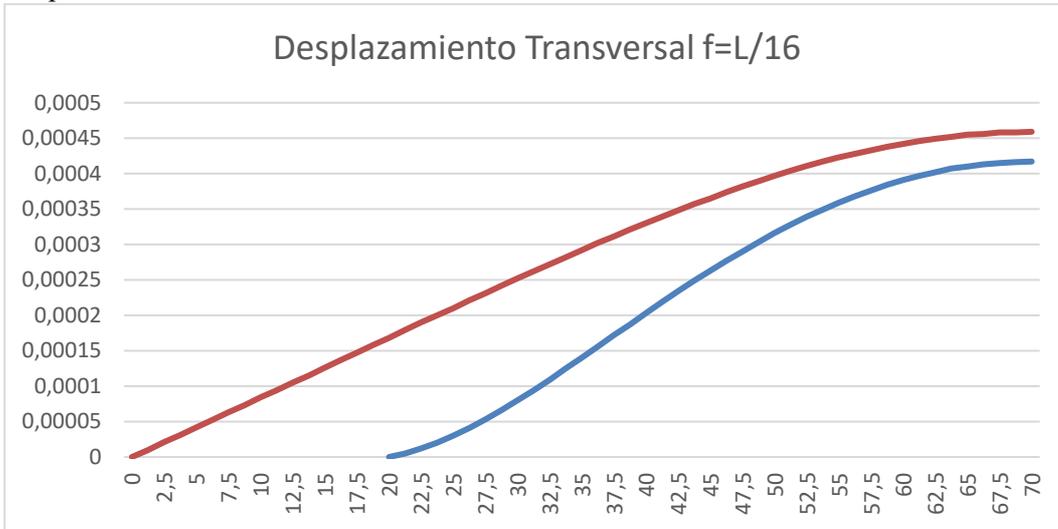


Imagen 75 Desplazamiento transversal ante carga transversal $f=L/16$

- Momentos torsores:

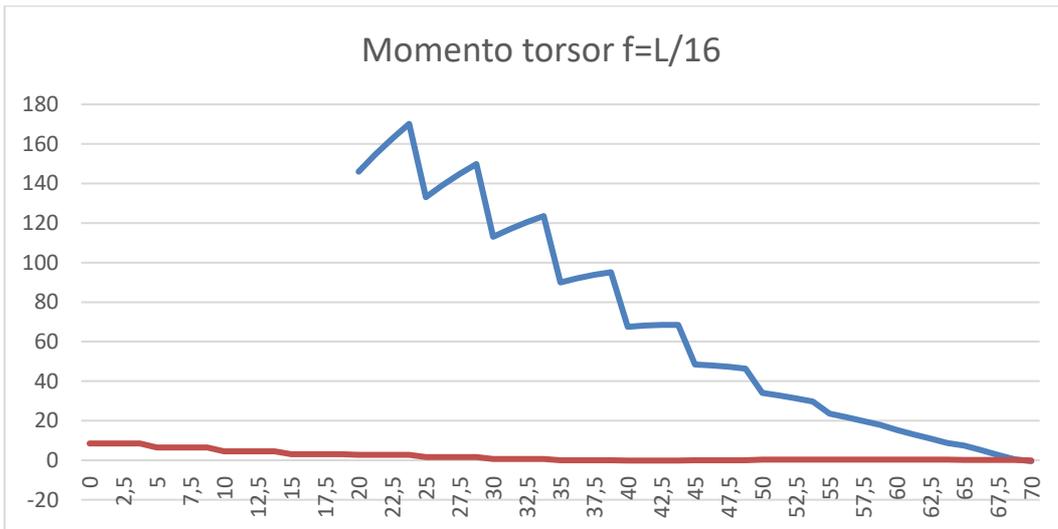


Imagen 76 Momento torsor ante carga transversal $f=L/16$

- Cortantes transversales:

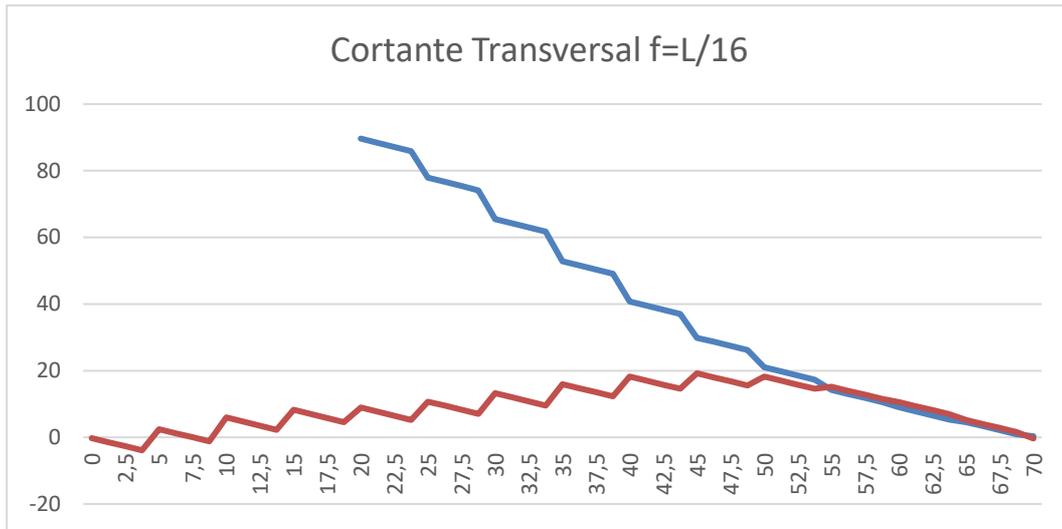


Imagen 77 Cortante transversal ante carga transversal $f=L/16$

- Fletores transversales:

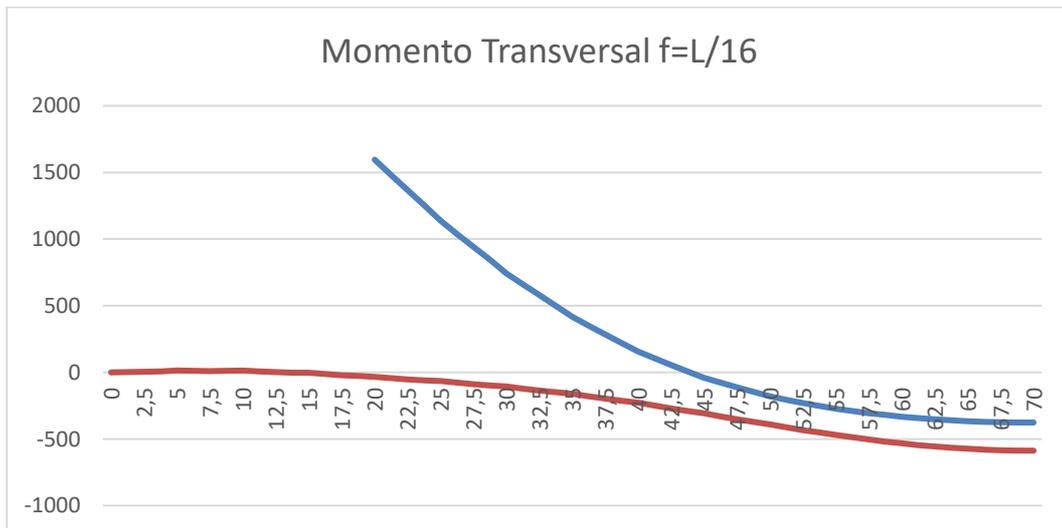


Imagen 78 Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/16$

4.3. Análisis de resultados

4.3.1. Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

La disminución de la flecha conforme se disminuye la flecha se produce como consecuencia de dos fenómenos. En primer lugar, hay que tener en cuenta que la rigidez transversal varía considerablemente al cambiar las secciones del arco, disminuyendo en el caso I: $f = \frac{L}{5}$, y aumentando en los casos II: $f = \frac{L}{10}$ y III: $f = \frac{L}{16}$. Por otra parte, la rigidez transversal del conjunto también aumenta con la disminución de la flecha.

La mayor flexibilidad del caso I: $f = \frac{L}{5}$ queda patente si observamos la curvatura del arco, que es mucho más pronunciada, llegando a tomar el desplazamiento valores negativos cerca de los arranques.

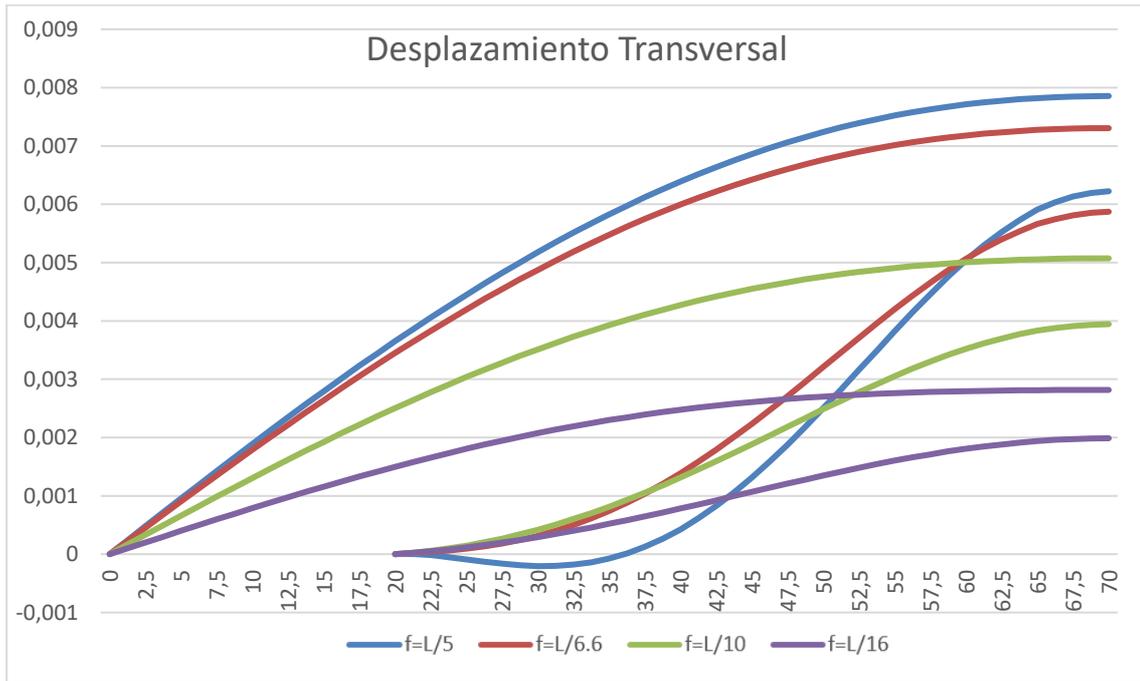


Imagen 79 Comparación de desplazamiento transversal según f/L ante carga excéntrica

- Momentos torsores:

Por equilibrio, conocemos que la ley de momentos torsores debe partir de 0 en el arco. Es interesante destacar que los momentos torsores del arco en el centro del vano (desde $x=55$ hasta $x=70$, más la parte simétrica de la otra mitad del arco) se mantienen prácticamente constantes en los cuatro casos, esto se debe a que la semejanza de la longitud de los pilares en esta zona es mucho mayor que cuando nos acercamos a los apoyos del arco. Como consecuencia de esto, los momentos torsores aumentan cuanto menor es la flecha del arco, ya que el efecto de los cortantes se ve reducido por la reducción del brazo entre tablero y arco. En el tablero, sin embargo, los momentos torsores disminuyen pero de forma casi insignificante por su pequeña rigidez a torsión.

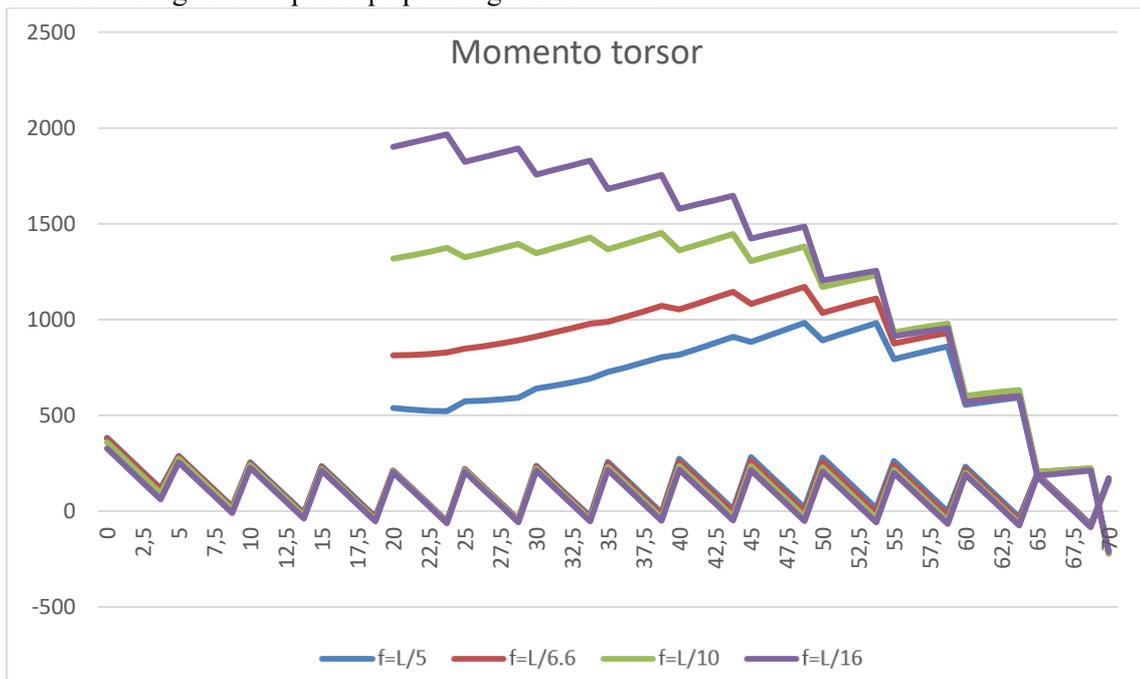


Imagen 80 Comparación de momento torsor según f/L ante carga excéntrica

- Cortantes transversales:

Como ocurre con los torsores, los cortantes del arco en el centro del vano se mantienen prácticamente constantes en los cuatro casos. Como es de esperar, por el mismo motivo que ocurre con los momentos torsores, el cortante, en este caso disminuye cerca de los apoyos del arco conforme disminuye la flecha, perdiendo relevancia su efecto frente al del momento torsor. Esto se traduce a su vez en que la inversión de signo del cortante se produce más cerca del arranque del arco cuanto más disminuye la flecha. En el dintel el efecto es similar, el cortante disminuye ligeramente (por su pequeña rigidez a torsión) cuanto menor es la flecha al alejarse del centro del vano.

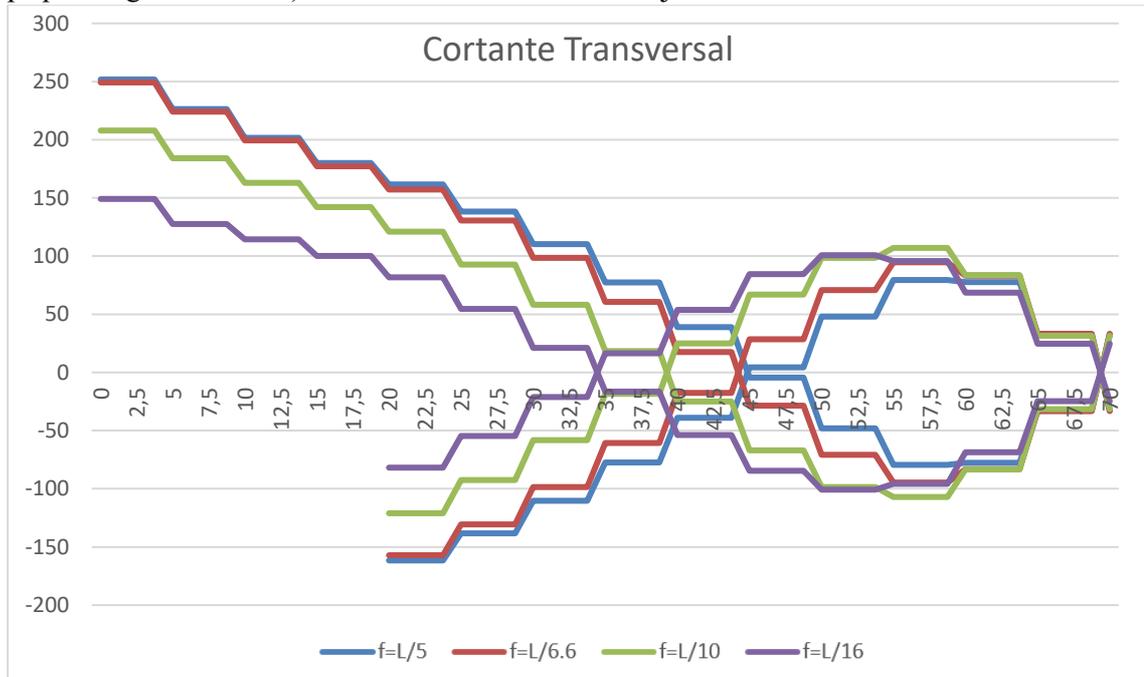


Imagen 81 Comparación de cortante transversal según f/L ante carga excéntrica

Comenta J. Manterola en su estudio, que es tan efectivo el efecto de las fuerzas F (cortantes transversales) cerca de los arranques, que el cortante es capaz de resistir el 72% de la sollicitación torsora en esta zona. Para demostrar que, como hemos comentado, este efecto pierde relevancia cuando disminuye la flecha por la geometría que toma la estructura, hemos reproducido ese análisis para los cuatro casos.

Se trata de evaluar qué porcentaje de la sollicitación resiste cada esfuerzo para las distintas relaciones flecha-luz. Para ello, hemos elegido una sección cercana a los estribos del arco, concretamente a octavos de la luz del arco.

En un primer bloque, distinguimos por columnas las diferentes relaciones entre flecha y luz, y el valor de la flecha. En el segundo y tercer bloque vemos los valores del cortante y la torsión en el tablero y en el arco respectivamente para cada uno de los casos, además se detalla la sección que se ha usado para el estudio. En el siguiente bloque se exponen: en primer lugar, el valor del brazo que posibilita el mecanismo que hace que el par de fuerzas colabore en la resistencia a torsión, en la siguiente fila vemos el cortante total (suma de cortantes de arco y dintel) y en la siguiente el torsor generado por el par de fuerzas (producto del torsor total por el brazo). La siguiente fila contiene el valor del torsor total (suma de torsores de arco y dintel). En el último bloque encontramos el porcentaje de la sollicitación torsora que resiste cada esfuerzo en cada uno de los cuatro casos.

Como podemos comprobar, la relación que se obtiene para el caso 0: $f = \frac{L}{6.6}$ corrobora los resultados obtenidos por J. Manterola.

Sabiendo que la sollicitación torsora es la misma en los cuatro casos, simplemente fijándonos en la torsión en el arco (donde predomina la rigidez a torsión) vemos que ésta será importante cuanto menor sea la flecha porque crece muy rápidamente. Por otra parte, observamos que los cortantes disminuyen

a medida que aumenta la torsión, pero lo que potencia en mayor medida la efectividad del par de fuerzas a la hora de hacer frente a la sollicitación torsora es el aumento de la flecha cuando aumenta la flecha. Esto último se pone de manifiesto si comparamos el caso I: $f = \frac{L}{5}$ con el caso 0: $f = \frac{L}{6.6}$, donde vemos que con un pequeño aumento del cortante total (de 261.40 kN a 276.64 kN) conseguimos aumentar el efecto del par de fuerzas en casi un 10%.

Si nos movemos hacia flechas menores, comprobamos el efecto contrario, llegando a invertirse la importancia de los esfuerzos en el caso III: $f = \frac{L}{16}$ respecto del caso 0: $f = \frac{L}{6.6}$, donde la torsión resiste el 76% de la sollicitación.

En el caso II: $f = \frac{L}{10}$ vemos como cada esfuerzo contribuye a resistir la mitad de la sollicitación.

CARGA EXCÉNTRICA					
f/L	5.00	6.60	10.00	16.00	m/m
flecha	20.00	15.15	10.00	6.25	m
Dintel (26.25,0,16)					
V	138.32	130.70	92.61	54.60	kN
T	131.32	129.39	124.69	117.50	kNm
Arco (26.25,0,Z)					
V	-138.32	-130.70	-92.61	-54.60	kN
T	576.63	860.18	1346.80	1846.04	kNm
brazo	16.31	12.48	8.66	5.79	
Vtotal	276.64	261.40	185.22	109.20	kN
Tv	4512.55	3263.32	1603.26	631.72	kNm
Tt	707.95	989.57	1471.49	1963.54	kNm
%T	14%	23%	48%	76%	
%V	86%	77%	52%	24%	

Tabla 7 Comparación del efecto del esfuerzo cortante según la relación flecha-luz

- Flectores transversales:

La gran curvatura de los desplazamientos transversales invitaría a pensar en que los momentos transversales serían mayores en los casos de mayores flechas, pero lo que vemos es que los mayores momentos transversales se producen para las menores flechas, debido a los dos efectos que comentábamos anteriormente: el aumento de rigidez transversal de las secciones en el arco y el aumento de rigidez transversal del conjunto conforme disminuye la flecha.

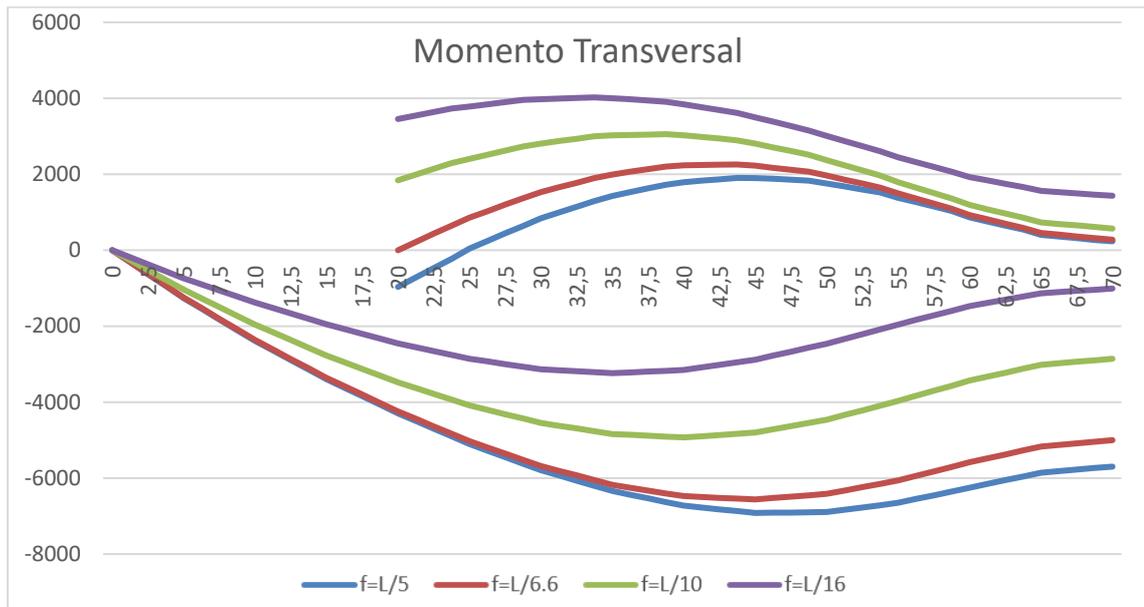


Imagen 82 Comparación de momento transversal según f/L ante carga excéntrica

4.3.2. Carga transversal:

Es importante destacar, antes de entrar en el análisis de los resultados, que en este caso la sollicitación torsora es variable según la geometría de la estructura. Esto ocurre porque la sollicitación torsora que genera la carga transversal es directamente proporcional al brazo mecánico de la estructura, que separa a los dos elementos que aportan rigidez a la estructura. Este brazo varía considerablemente con la variación de la relación flecha-luz, por ello trataremos de explicar los efectos que tiene durante el análisis.

- Desplazamientos transversales:

Los desplazamientos transversales disminuyen significativamente cuanto menor es la flecha respecto de la luz, ya que la disminución de la longitud de los pilares provoca que los desplazamientos no sean demasiado grandes, encontrando una gran diferencia entre el caso de mayor flecha ($f = \frac{L}{5}$) y el de menor flecha ($f = \frac{L}{16}$), con una disminución del valor máximo en el dintel de casi un 85%. Esta diferencia se debe a la suma de tres efectos, por un lado, tenemos el aumento de la rigidez transversal del arco debido al cambio de sección, y el aumento de la rigidez del conjunto por el cambio de la geometría de la estructura. Y, por otra parte, se le suma la disminución de la sollicitación torsora por el mismo cambio de geometría que aporta rigidez al conjunto.

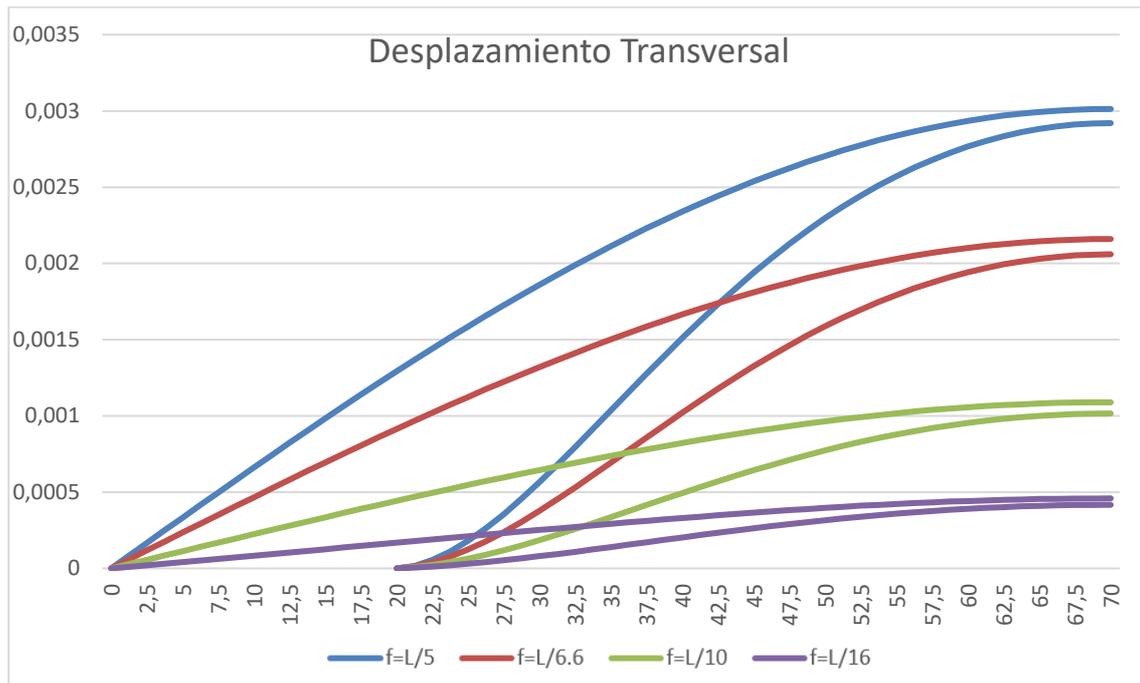


Imagen 83 Comparación de desplazamiento transversal según f/L ante carga transversal

- Momentos torsores:

La ley de momentos torsores, mientras actúa el par de fuerzas tiende a cero en el tablero, siendo el cortante transversal el que contrarresta los efectos de la sollicitación torsora. En el dintel vemos como los esfuerzos de torsión aumentan cerca de los estribos cuando la flecha aumenta. Como muestran los diagramas de esfuerzos, el par de fuerzas pierde relevancia conforme disminuye la flecha, por lo que los esfuerzos de torsión en el arco aumentan con la disminución de la flecha.

A pesar de que la tendencia de la torsión en el arco es aumentar conforme se disminuye la flecha, vemos que en el caso de $f = \frac{L}{16}$, se produce una ligera disminución de los esfuerzos respecto al caso de $f = \frac{L}{10}$. El comportamiento de la estructura es el descrito, pero debemos tener en cuenta que la sollicitación torsora va disminuyendo conforme disminuye la flecha, por lo tanto, se enfrentan el aumento de torsión en el arco por la absorción de la sollicitación, con la disminución del valor de dicha sollicitación por las características geométricas de la estructura.

A continuación, estudiaremos una sección del puente y mostraremos los resultados en una tabla con idea de clarificar esto. En un primer bloque, distinguimos por columnas las diferentes relaciones entre flecha y luz, y el valor de la flecha. En el segundo y tercer bloque vemos los valores del cortante y la torsión en el tablero y en el arco respectivamente para cada uno de los casos, además se detalla la sección que se ha usado para el estudio. En el siguiente bloque se exponen: en primer lugar, el valor del brazo que posibilita el mecanismo que hace que el par de fuerzas colabore en la resistencia a torsión. En las tres siguientes filas vemos el valor del cortante total (suma del cortante en arco y dintel) y otros dos valores de cortante que explicaremos en adelante. Tras estas tres filas, vemos el torsor total (suma de los torsores de arco y dintel). Y por último los valores que nos interesa comparar, el torsor en el arco y el valor de la sollicitación torsora (calculado como la suma de los esfuerzos de torsión en arco y dintel, con la torsión que genera el par de fuerzas).

Los resultados que obtenemos en la tabla arrojan luz a cerca de la disminución del valor del torsor en el arco para el caso III: $f = \frac{L}{16}$ respecto del caso II: $f = \frac{L}{10}$ cuando la tendencia era claramente ascendente. Y es que como podemos comprobar, la disminución de la sollicitación (disminuye desde 981.03 kNm para el caso I: $f = \frac{L}{5}$ hasta 454.18 kNm para el caso III: $f = \frac{L}{16}$) es de mayor valor que el aumento de importancia del esfuerzo torsor para resistir dicha sollicitación.

CARGA TRANSVERSAL					
f/L	5	6.6	10	16	m/m
flecha	20	15.15	10	6.25	m
Dintel, nodo (32.5,0,16)					
V	47.37	34.91	19.2	10.78	kN
T	0.87	2.12	1.65	0.65	kNm
Arco, nodo (32.5,0,Z)					
V	28.26	39.87	54.89	62.97	kN
T	53.69	99.3	131.44	120.47	kNm
brazo	12.25	9.4375	6.625	4.516	
Vtotal	75.63	74.78	74.09	73.75	kN
Vviento	37.28	37.28	37.28	37.28	kN
Vtorsion	18.04	-5.18	-35.22	-51.38	kN
Ttotal	54.56	101.42	133.09	121.12	kNm
Tarco	53.69	99.30	131.44	120.47	kNm
Solic Torsora	981.03	807.16	623.94	454.18	kNm

Tabla 8 Evaluación de la variación de la sollicitación torsora y del esfuerzo de torsión según la relación flecha-luz

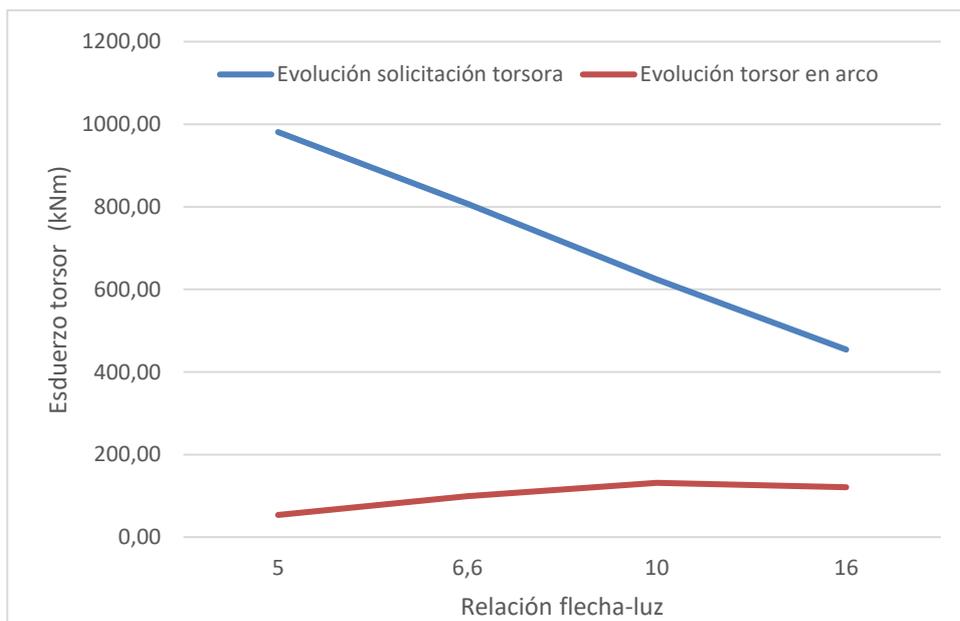


Imagen 84 Evolución de la sollicitación torsora y del esfuerzo de torsión en el arco según la relación flecha-luz

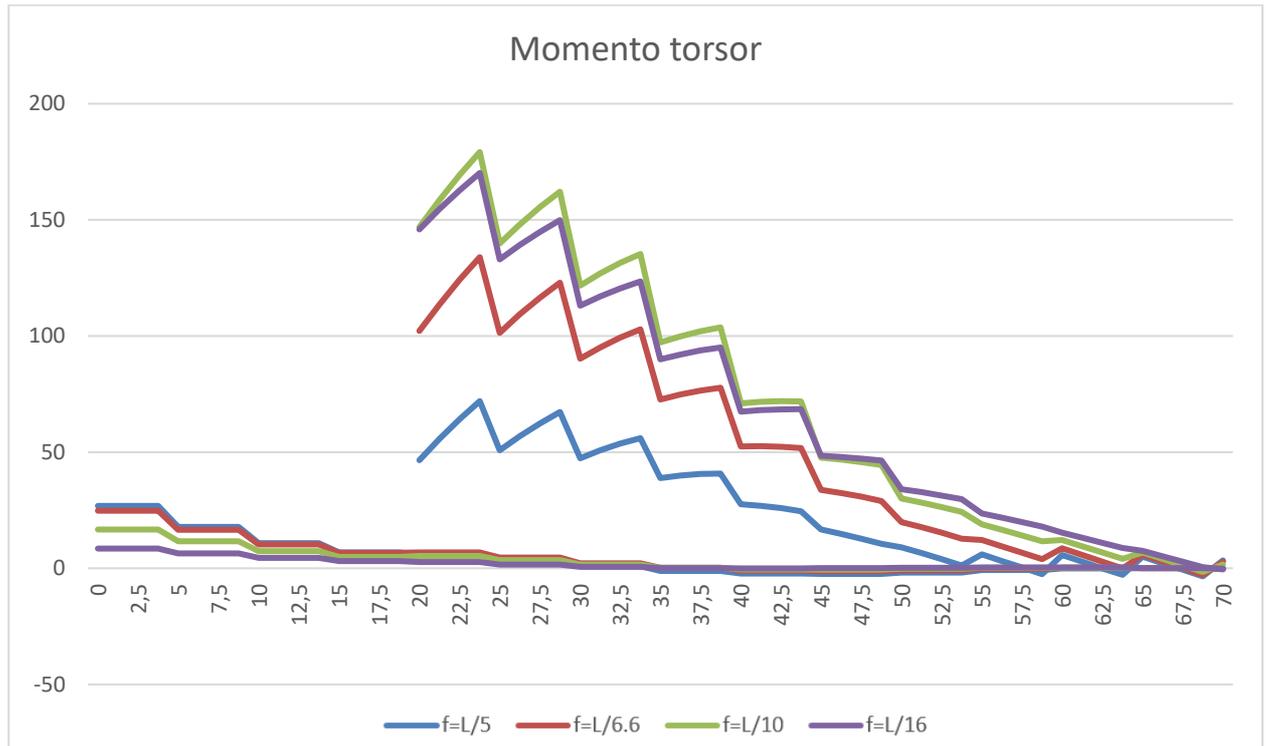


Imagen 85 Comparación de momento torsor según f/L ante carga transversal

- Cortantes transversales:

Como se ha explicado en anteriores apartados, el cortante transversal es la suma de dos efectos. El primero es el de la carga transversal de viento que genera un aumento constante desde el centro del vano hacia las pilas de igual valor en arco y dintel (representado en la gráfica de esfuerzo cortante por una línea negra), su valor en la sección estudiada ($x = 32,5$ m) en la tabla anterior (V_{viento}) es 37.28 kN. Dicho efecto no se ve influenciado por el cambio de geometría. Sin embargo, el segundo se refiere al par torsor que disminuye el cortante en el arco y lo aumenta en el tablero y que depende en gran medida de la longitud de los pilares. Esta fuerza crece con el aumento de la flecha, generando un gran intercambio de fuerzas entre arco y dintel, y tiene el efecto contrario con la disminución de la flecha. Una forma de cuantificar esta fuerza en cada sección es ver la distancia que existe entre los cortantes de arco y tablero. Ese valor es el que se ofrece como $V_{\text{torsión}}$ en la tabla, ya que es la parte del cortante que resiste parte del torsor solicitación.

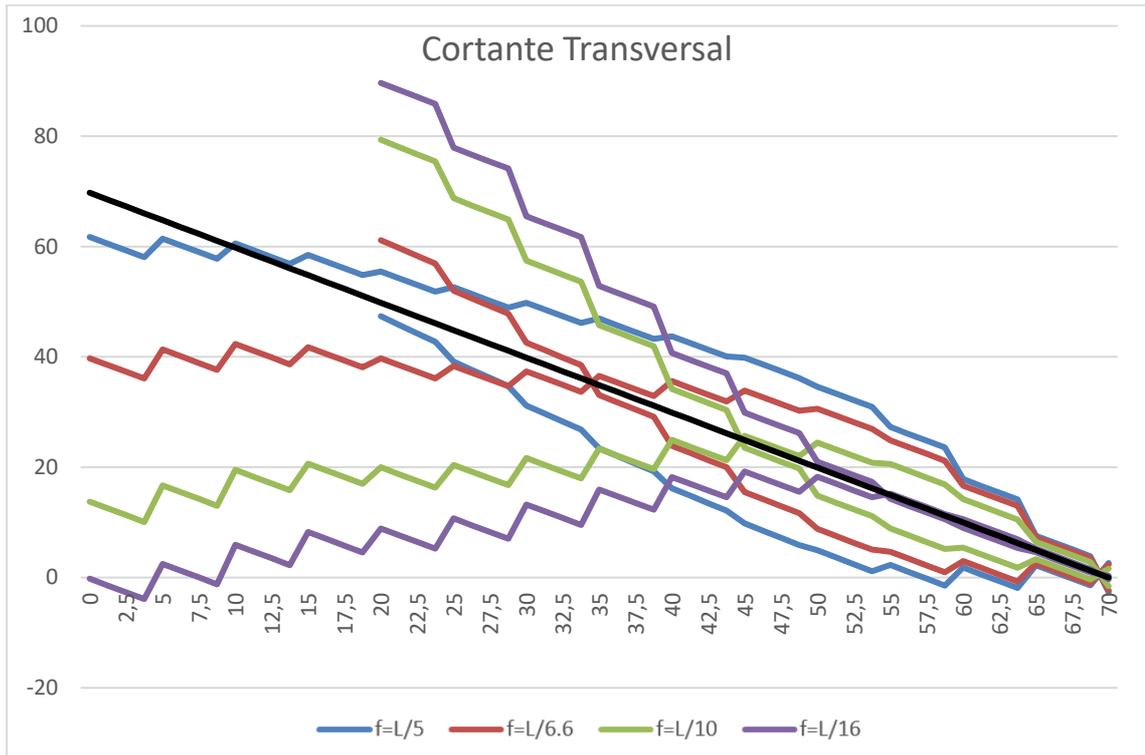


Imagen 86 Comparación de cortante transversal según f/L ante carga transversal

• Fletores transversales:

En el arco sabemos que la rigidez transversal aumenta conforme disminuye la flecha por la variación de las secciones. Esto justifica al aumento del momento transversal en el arco.

Por otra parte, el aumento de la flecha genera que el tablero aumente su colaboración para resistir la flexión transversal.

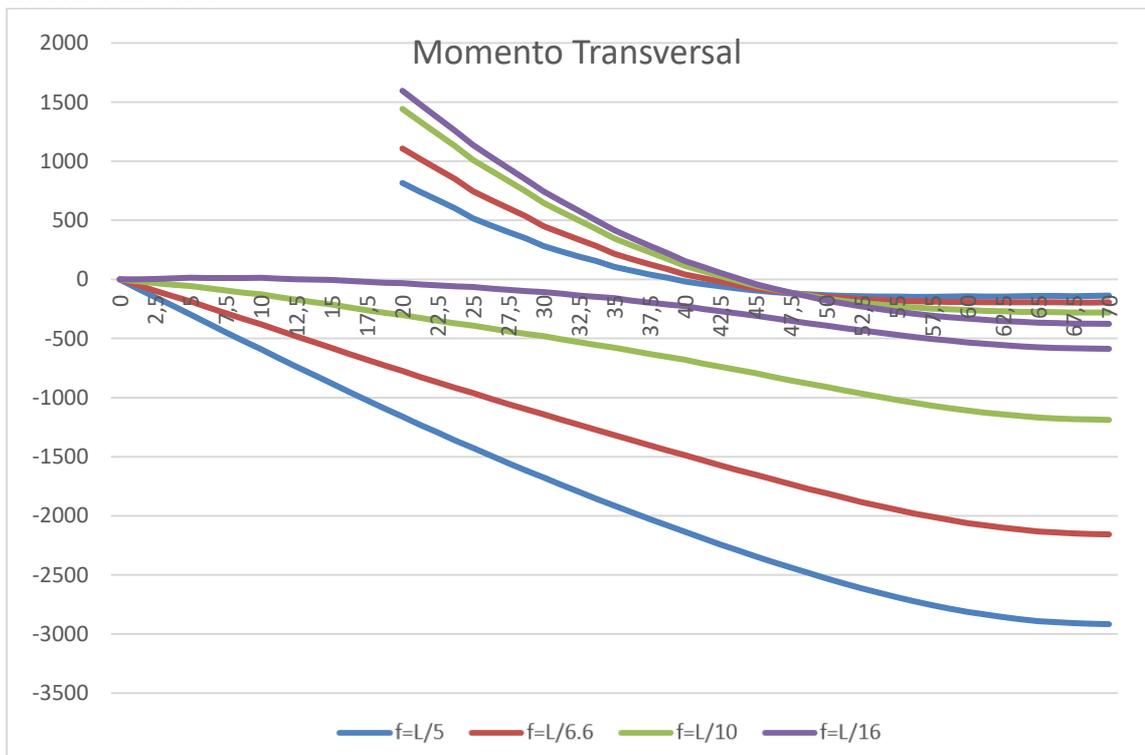


Imagen 87 Comparación de momento transversal según f/L ante carga transversal

4.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos durante este análisis nos permiten sacar varias conclusiones:

- La disminución de la flecha del arco proporciona una mayor rigidez a torsión a la estructura, disminuyendo significativamente sus desplazamientos.
- El aumento de la flecha del arco potencia el efecto de los esfuerzos cortantes para enfrentar al torsor sollicitación ante cargas excéntricas.
- La disminución de la flecha provoca una importante disminución de la sollicitación torsora cuando sometemos al puente a cargas transversales (viento).

5. VARIACIÓN DE LA FIJACIÓN DE LOS PILARES

El comportamiento de la estructura cambia sustancialmente si en lugar de pilares biempotrados establecemos pilares biarticulados. En el estudio original, J. Manterola dispone pilares biempotrados dotando al puente de un comportamiento conjunto como estructura.

El modelo que se ha diseñado para este estudio consiste en un puente arco con la misma geometría que el diseñado por J. Manterola para su estudio. Las cargas a las que lo sometemos también serán las vistas hasta ahora, una carga vertical excéntrica en el tablero, y por otra parte la carga de viento transversal.

La única diferencia del modelo será la fijación de los pilares, en el modelo se han liberado los tres grados de libertad de giro en la unión pilar-dintel. En la unión pilar-arco se han liberado los grados de libertad de giro en los ejes X e Y globales, impidiendo el giro en Z para evitar el comportamiento como mecanismo de los pilares. El pilar central se ha mantenido biempotrado. Por otra parte, los pilares que unen el tablero al terreno se mantienen empotrados en el terreno y se articula su unión al dintel.

5.1. Resultados

5.1.1. Pilares biempotrados

Los resultados correspondientes a este caso son idénticos a los mostrados en el apartado 2.5.2. *Resultados del modelo propuesto*, ya que en el estudio original los pilares se encuentran biempotrados.

5.1.2. Pilares biarticulados

Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

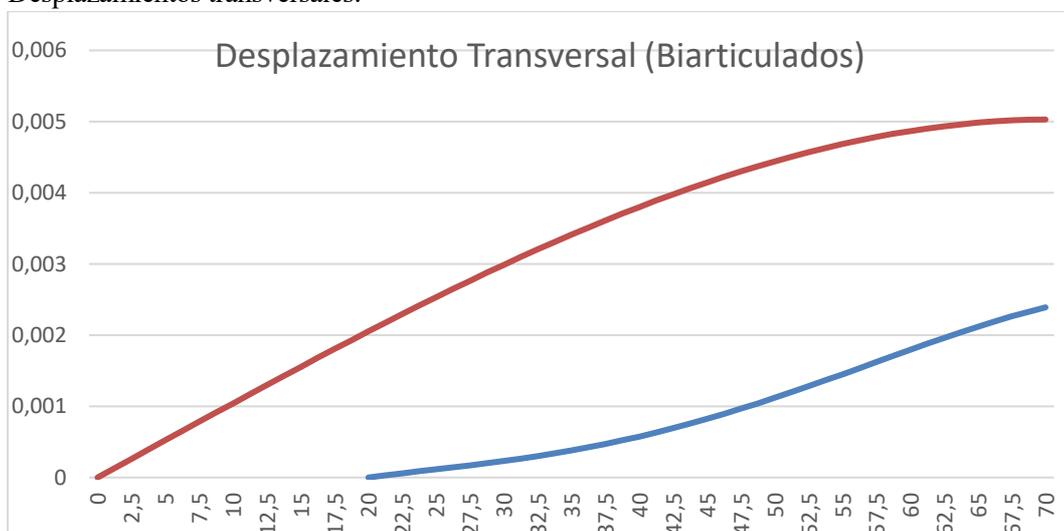


Imagen 88 Desplazamiento transversal ante carga excéntrica con pilares biarticulados

- Momentos torsores:

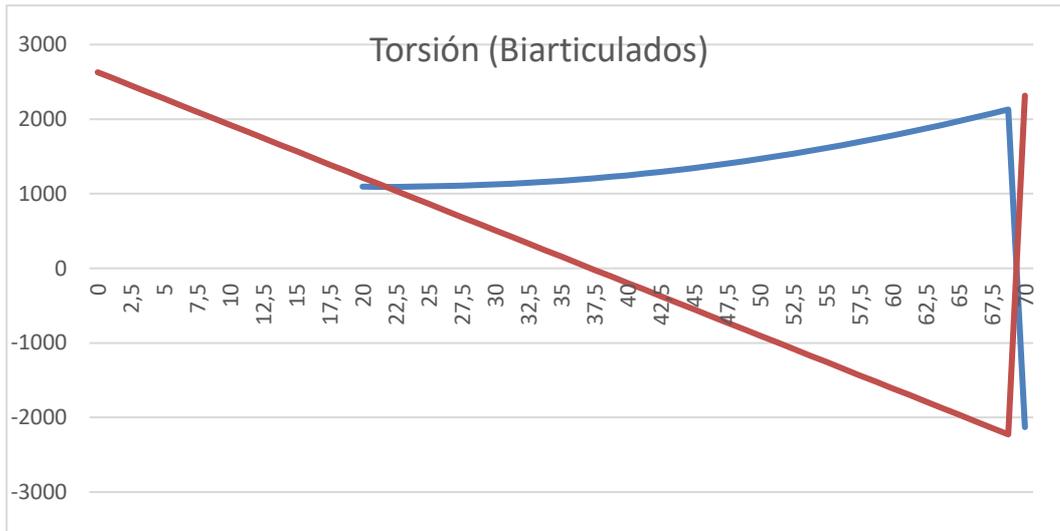


Imagen 89 Momento torsor ante carga excéntrica con pilares biarticulados

- Cortantes transversales:

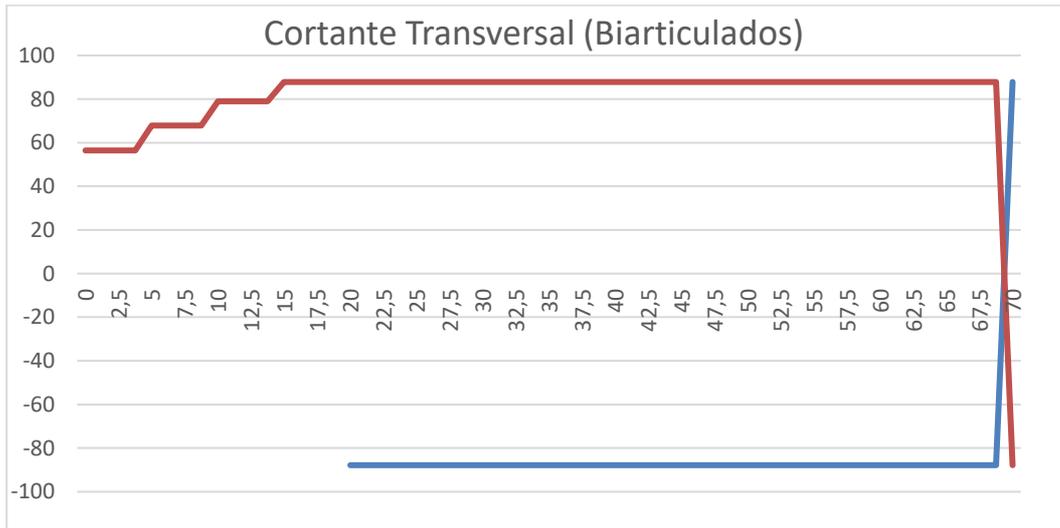


Imagen 90 Cortante transversal ante carga excéntrica con pilares biarticulados

- Flectores transversales:

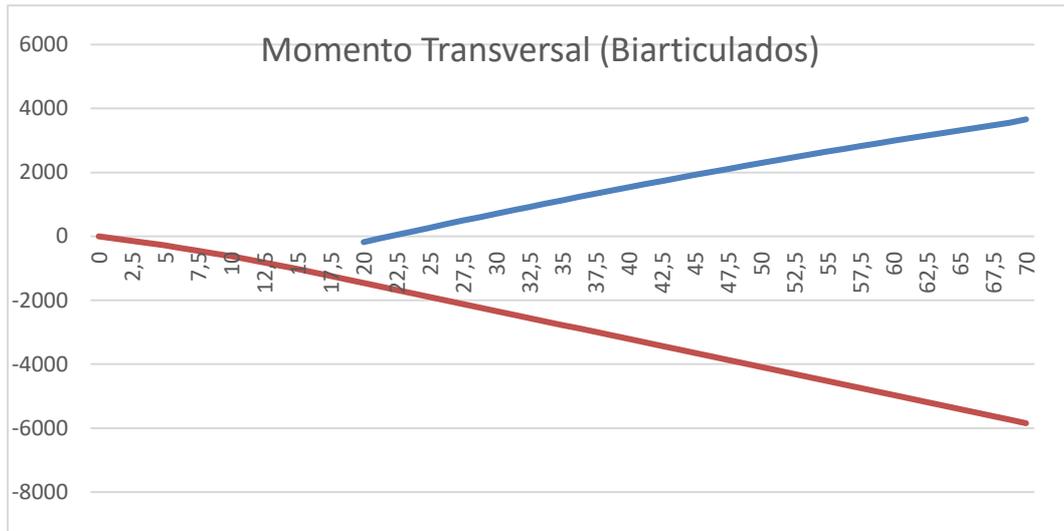


Imagen 91 Momentor flector transversal ante carga excéntrica con pilares biarticulados

Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

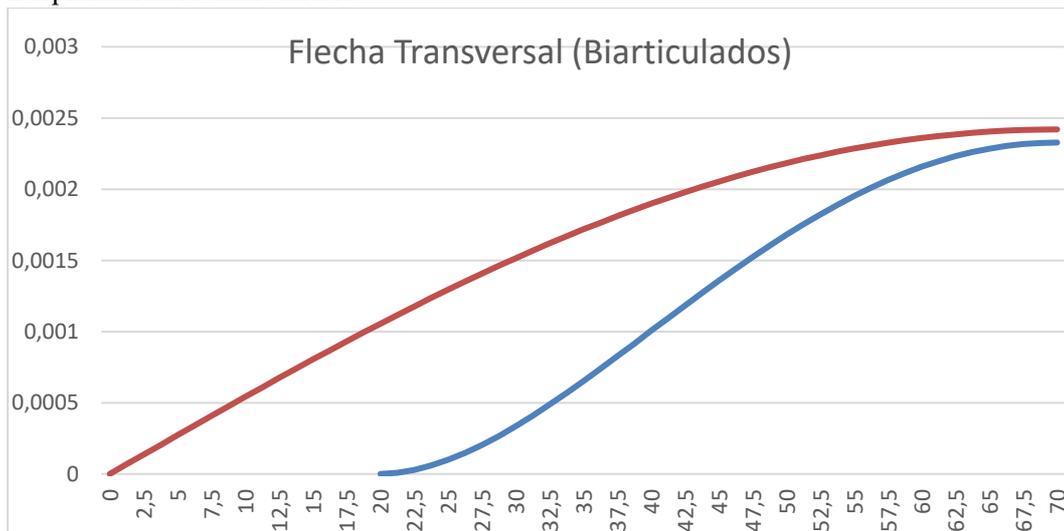


Imagen 92 Desplazamiento transversal ante carga transversal con pilares biarticulados

- Momentos torsores:

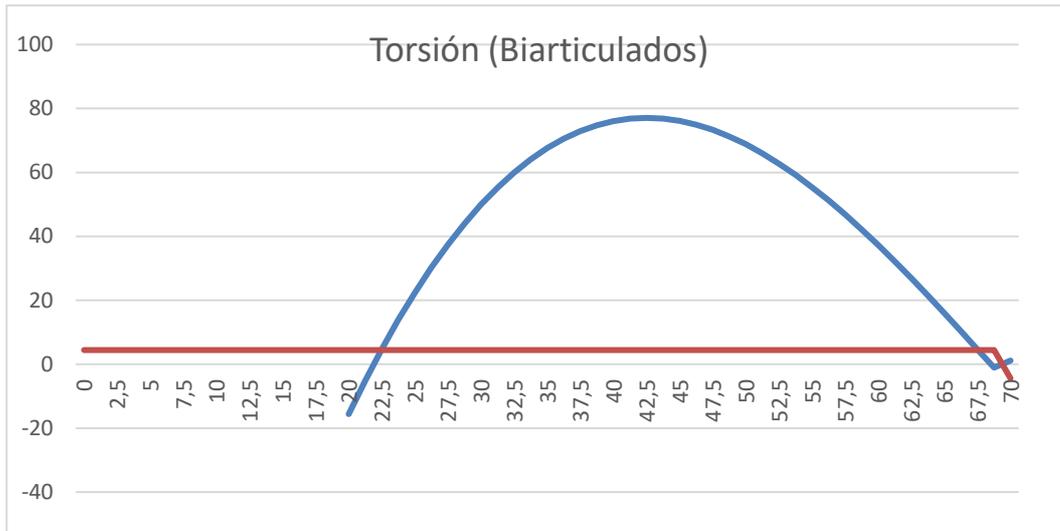


Imagen 93 Momento torsor ante carga transversal con pilares biarticulados

- Cortantes transversales:

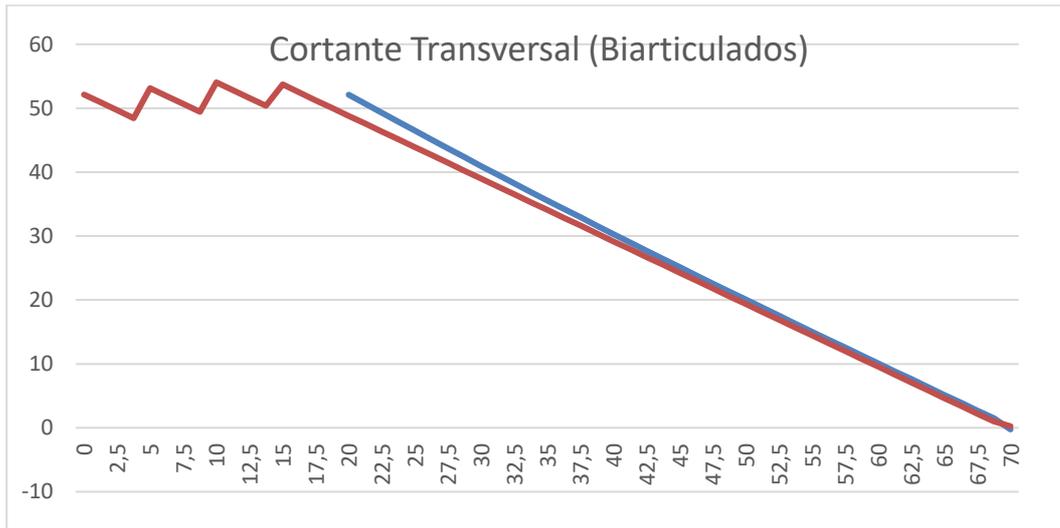


Imagen 94 Cortante transversal ante carga transversal con pilares biarticulados

- Flectores transversales:

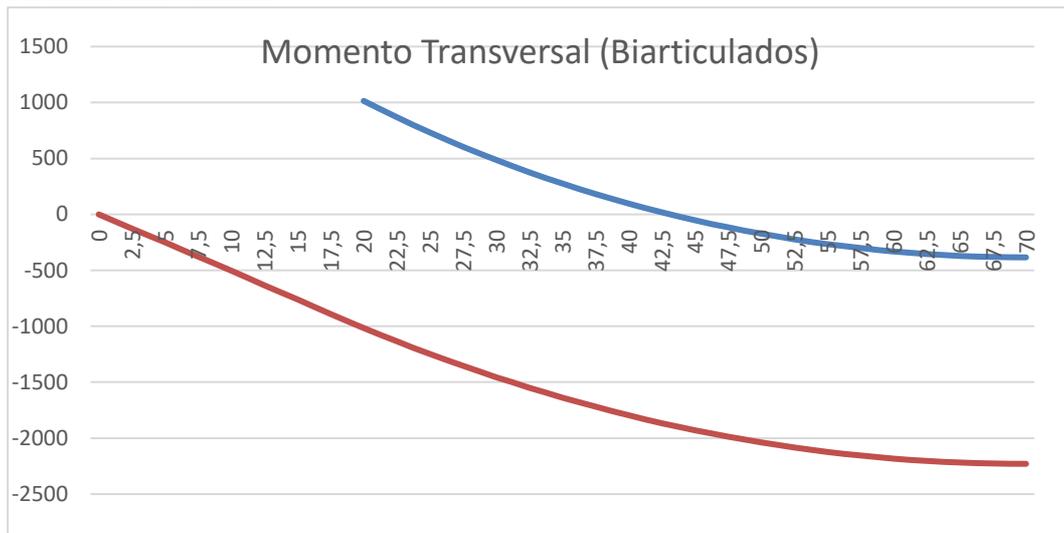


Imagen 95 Momentor flector transversal ante carga transversal con pilares biarticulados

5.2. Análisis de resultados

5.2.1. Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:

La carga excéntrica actúa sobre el tablero produciendo en él un giro, esta carga se transmite al arco a través, únicamente del pilar central, por lo que las cargas que recibe el arco son mínimas. Este hecho explica que a pesar de ser el conjunto más flexible que cuando los pilares están biempotrados, los desplazamientos transversales sean menores, aunque hay que tener en cuenta que se producen importantes giros en el tablero.

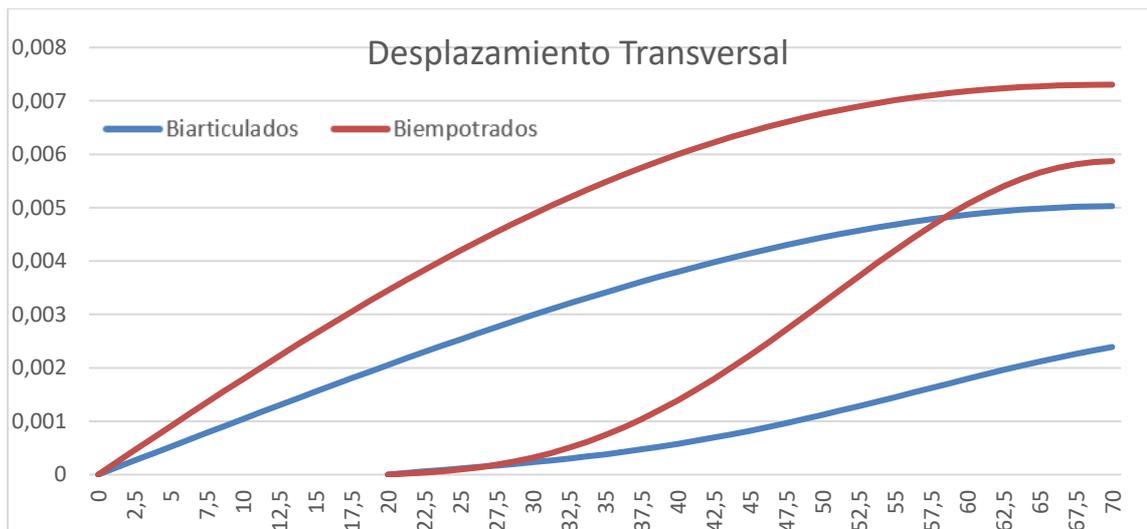


Imagen 96 Comparación de desplazamiento transversal según fijación de pilares ante carga excéntrica

- Momentos torsores:

El hecho de que los pilares estén biarticulados (excepto el central) provoca que el esfuerzo de torsión en el dintel en este caso se asemeje al de una viga biapoyada (del centro del vano al estribo) sometida a una carga excéntrica, cambiando de signo en el centro del vano por el empotramiento en este punto.

En el arco, debido a que las cargas se le transmiten únicamente a través del pilar central, la ley de momentos se asemeja a la de torsión de una viga biempotrada sometida a una carga puntual excéntrica, con la particularidad de la curvatura que sufre debido a la geometría del arco.

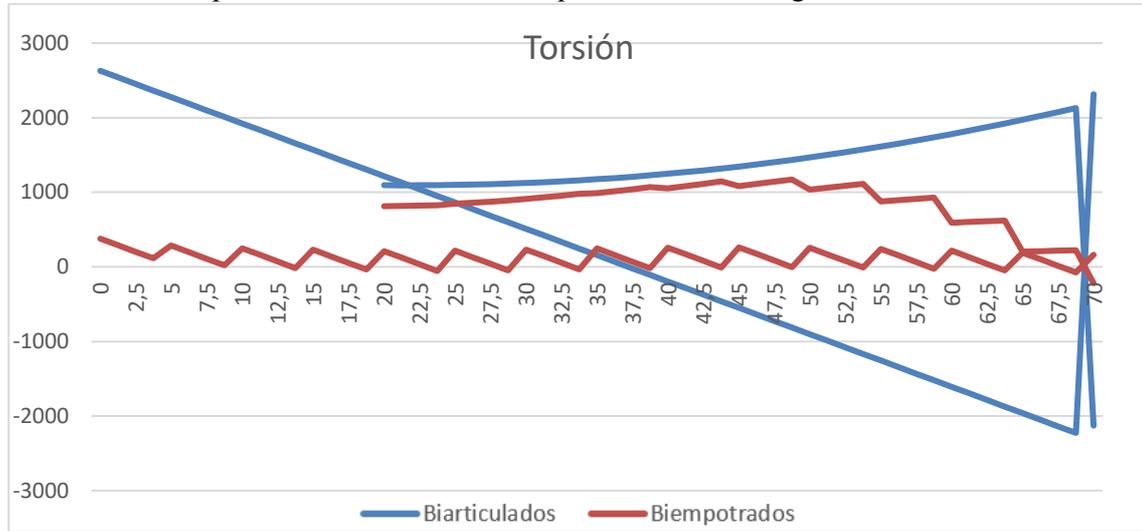


Imagen 97 Comparación de momento torsor según fijación de pilares ante carga excéntrica

- Cortantes transversales:

Se mantienen constantes a lo largo de todo el arco, y son iguales y contrarios en arco y dintel, respondiendo al par torsor que se origina entre arco y dintel. La diferencia en este caso es que la articulación de los pilares permite que los desplazamientos del dintel sigan a los del arco, por lo que se anula el efecto del par de fuerzas que enfrentaba a la sollicitación torsora.

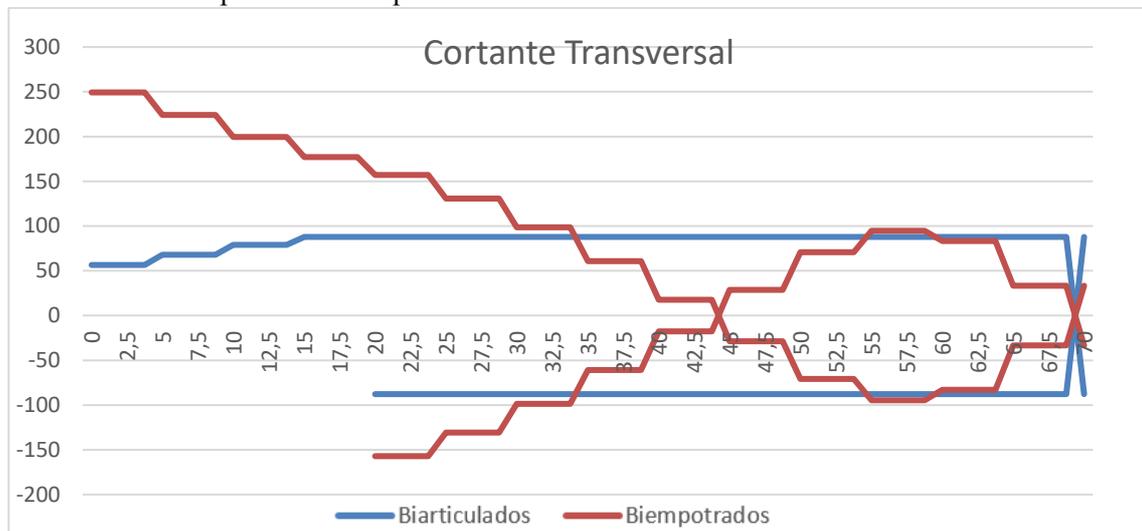


Imagen 98 Comparación de cortante transversal según fijación de pilares ante carga excéntrica

- Flectores transversales:

La ley de momentos transversales en el arco es idéntica a la de una viga biapoyada sometida a una carga puntual, tanto en el arco como en tablero.

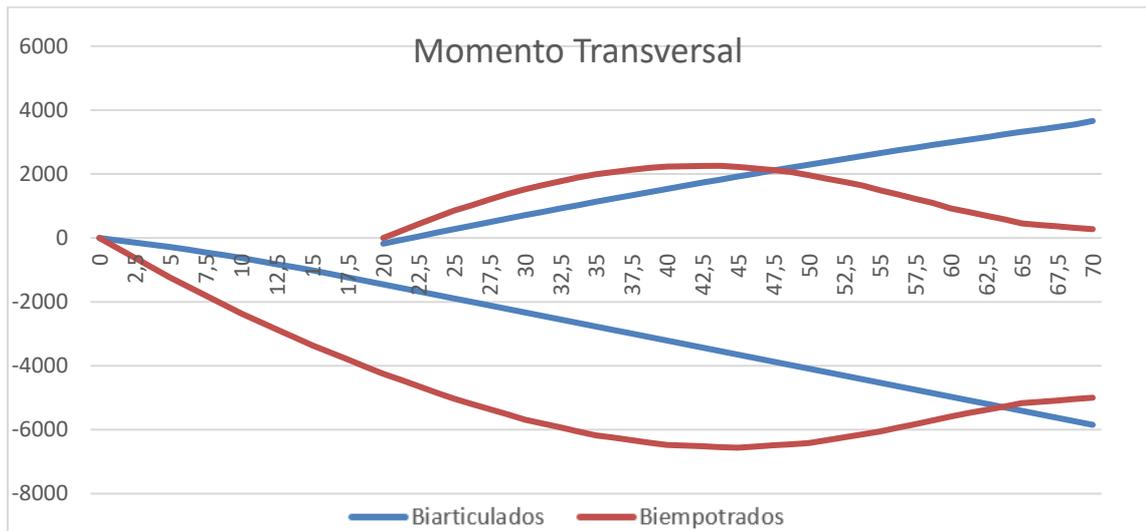


Imagen 99 Comparación de momento transversal según fijación de pilares ante carga excéntrica

5.2.2. Carga transversal:

- Desplazamientos transversales:

En este caso, al tener una carga transversal, la menor rigidez del conjunto en el modelo de pilares biarticulados si se ve reflejado en unos desplazamientos transversales mayores.

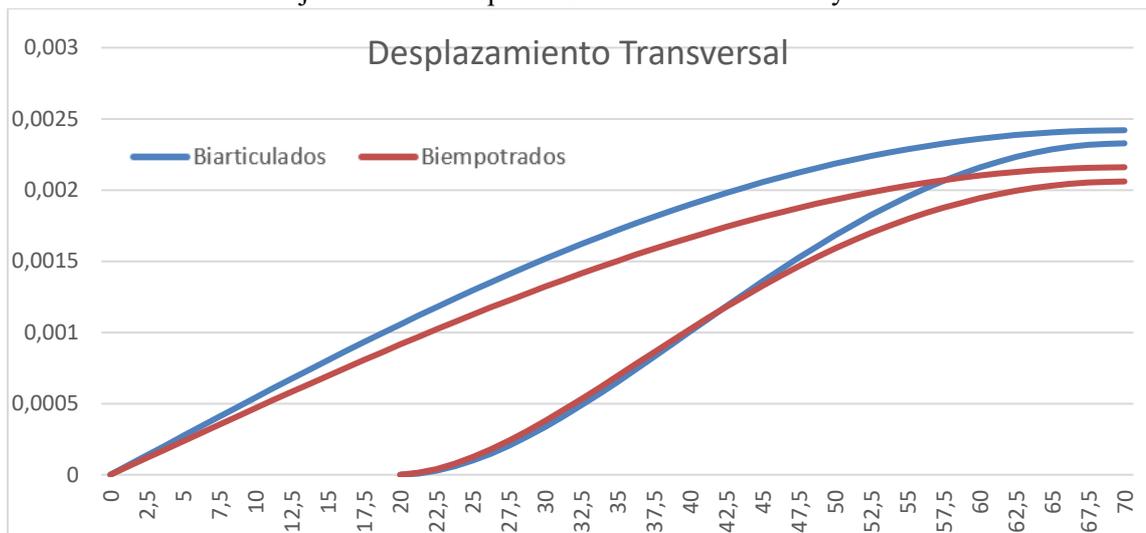


Imagen 100 Comparación de desplazamiento transversal según fijación de pilares ante carga transversal

- Momentos torsores:

La ley de momentos torsores en el tablero es prácticamente nula por la poca rigidez a torsión que tiene respecto del arco. En el arco, sin embargo, encontramos unos momentos torsores que parten de 0 en el centro del arco por simetría, y aumentan hasta alcanzar valores máximos a cuartos de la luz del arco, volviendo a disminuir para alcanzar valores negativos en el arranque. Sería de esperar, en una viga recta que el momento torsor fuera creciente desde el centro hacia los arranques, pero en este caso nos encontramos con que la carga tiene un eje de acción parabólico. La diferencia de este eje de acción respecto del eje de giro del arco provoca esta forma en la ley de momentos.

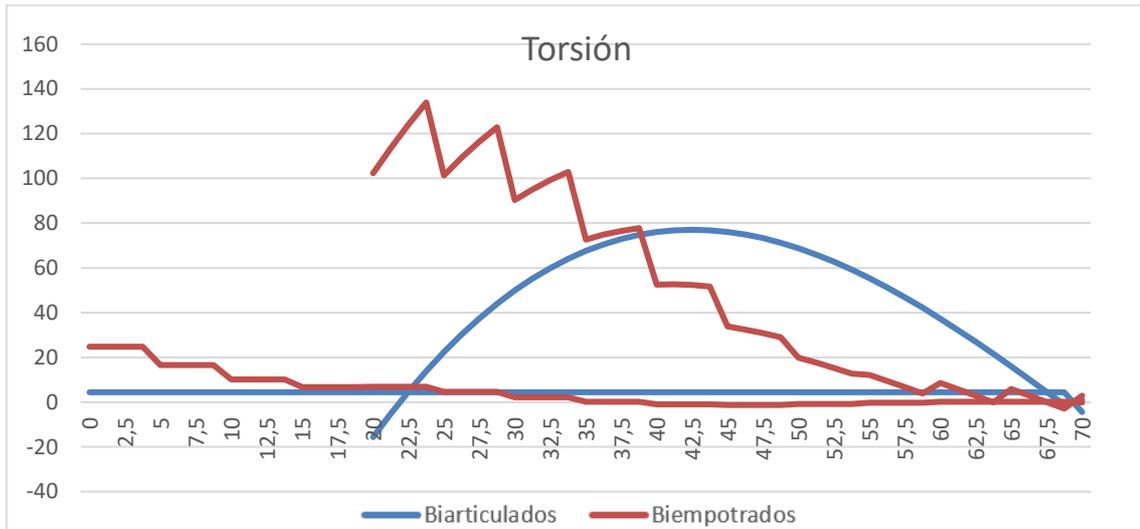


Imagen 101 Comparación de momento torsor según fijación de pilares ante carga transversal

- Cortantes transversales:

Como explica J. Manterola, cuando encontramos los pilares biempotrados los cortantes transversales tienen dos componentes, una debida a la acumulación natural de carga transversal que crece linealmente desde el centro del vano hacia los arranques. La segunda la produce el par de fuerzas que contribuye a disminuir el torsor y hace disminuir el cortante en el arco mientras que lo aumenta en el dintel.

Si hacemos un análisis paralelo de la evolución del cortante cuando los pilares están biarticulados, vemos que tanto en arco como en tablero el cortante crece linealmente con la misma pendiente que lo hace en el caso biempotrado si no tuviésemos en cuenta el efecto del par de fuerzas. Esto hace indicar que, en este caso, la contribución del cortante transversal a resistir la sollicitación torsora es nula. Este comportamiento puede explicarse porque la articulación de los pilares permite un mayor desplazamiento transversal relativo entre arco y tablero y por tanto disminuye el esfuerzo transversal. Sería intuitivo pensar que en el centro se produjese un salto en el cortante transversal puesto que el pilar transversal está empotrado y por lo tanto se transmite fuerza a través de él. Pero esta ley de cortantes demuestra que la rigidez transversal de arco y tablero es tan similar que las fuerzas transmitidas a través del pilar central son muy próximas a cero.

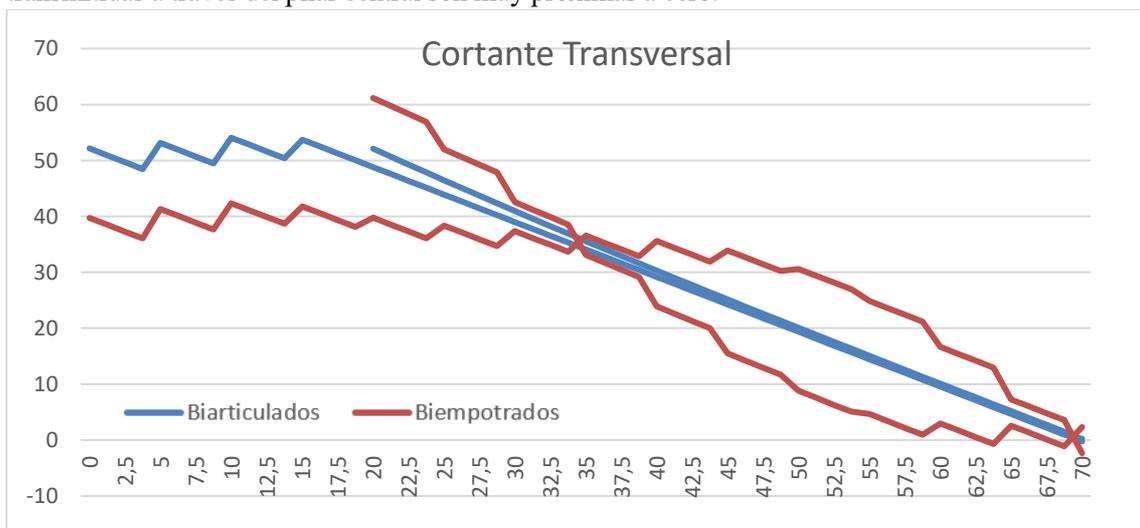


Imagen 102 Comparación de cortante transversal según fijación de pilares ante carga transversal

- Flectores transversales:

El hecho de que la rigidez transversal del conjunto sea muy parecida en ambos casos, genera una ley de momentos casi idéntica para pilares biempotrados y articulados.

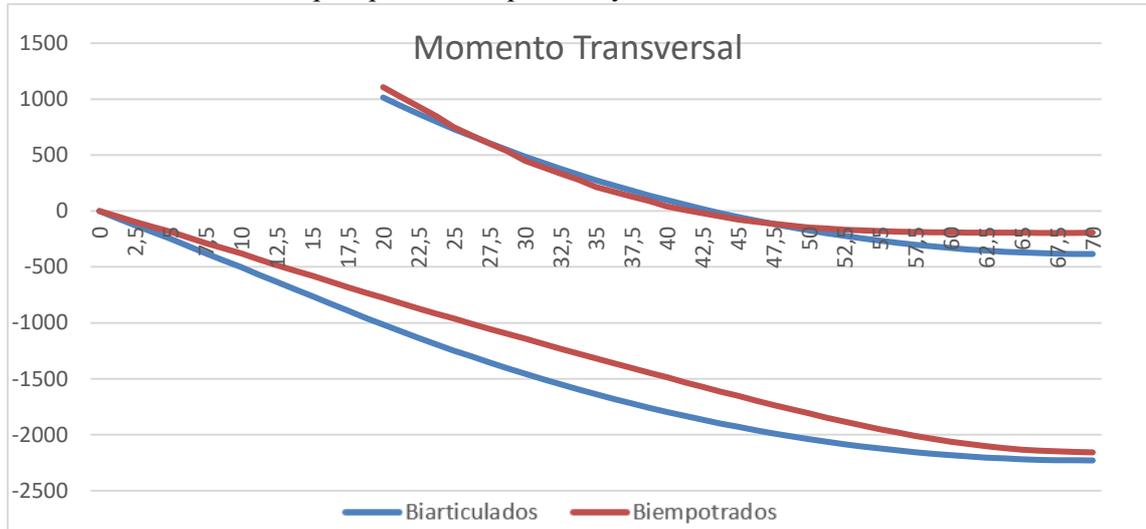


Imagen 103 Comparación de momento transversal según fijación de pilares ante carga transversal

5.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos con el modelo de pilares biarticulados ponen de manifiesto que el comportamiento de la estructura está lejos de ser el óptimo. Esto se evidencia por la inexistencia de colaboración entre arco y tablero. Cuando tenemos un puente arco sometido a solicitaciones torsoras, el gran beneficio de la estructura es la colaboración del par de fuerzas que se genera para resistir las solicitaciones, lo cual no ocurre en este modelo.

6. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

Se resumen brevemente las conclusiones más importantes obtenidas tras el desarrollo de este trabajo:

- El modelo de barras que hemos utilizado para reproducir el estudio de J. Manterola sobre la relación arco-tablero bajo cargas transversales y excéntricas en puentes arco (Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II [1]) es razonablemente adecuado, ya que se corroboran los resultados.
- La rigidización a torsión del tablero respecto del arco otorga a la estructura mayor flexibilidad y potencia el efecto del cortante para enfrentar a la sollicitación torsora.
- La disminución de la flecha proporciona mayor rigidez a torsión a la estructura, reduciendo considerablemente sus desplazamientos transversales.
- Los puentes arco con pilares biarticulados, tal y como se han modelizado en este caso, no tienen buen comportamiento a torsión, ya que tablero y arco trabajan de forma independiente.

6.2. Desarrollos futuros

Se comentan a continuación algunas ideas con las que se podría ampliar este estudio que no han sido desarrolladas por falta de tiempo.

En primer lugar, sería interesante estudiar el comportamiento de la estructura al cambiar la excentricidad de la carga, moviendo el eje de acción de esta.

Con la idea de corroborar que la modelización del problema es correcta, sería conveniente modelizar el tablero con elementos tipo placa en lugar del modelo de barras usado y estudiar las posibles diferencias que pudiesen surgir.

Como mejora del análisis del comportamiento según la variación flecha-luz, sería interesante repetirlo calculando unas nuevas secciones que proporcionasen rigideces transversales razonablemente parecidas para los cuatro casos estudiados. Esto permitiría ver con mayor claridad cual es la influencia de este parámetro en el comportamiento a torsión de la estructura, ya que el cambio de la rigidez transversal distorsiona ligeramente los resultados como se ha explicado durante el estudio.

En cuanto al estudio de la fijación de los pilares, sería interesante la búsqueda de un modelo con pilares biarticulados más real, que dotase de mayor flexibilidad a la estructura, pero con colaboración de arco y tablero.

También sería interesante hacer un estudio de la influencia de la fijación del arco al terreno, cambiando el empotramiento del modelo estudiado por articulaciones.

Por último, podría realizarse el estudio con otros materiales, usando secciones metálicas y mixtas con la idea de optimizar las secciones.

REFERENCIAS

- [1] J. Manterola, Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II, 2006.
- [2] J. Manterola, «Situación actual del puente arco,» *Informes de la Construcción*, pp. 1-9, 1988.
- [3] «MIDAS Civil,» 2017.
- [4] «Microsoft Excel,» 2016.