

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Impacto de la Rigidez Estructural Arco-Tablero en Puentes Arco: Respuesta a Cargas Excéntricas y Transversales

Autor: María Zambrano Caro

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Impacto de la Rigidez Estructural Arco-Tablero en Puentes Arco: Respuesta a Cargas Excéntricas y Transversales

Autora:

María Zambrano Caro

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, 2025

Trabajo Fin de Grado: Impacto de la Rigidez Estructural Arco-Tablero en Puentes Arco: Respuesta a Cargas
Excéntricas y Transversales

Autor: María Zambrano Caro

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, 2025

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

Con la entrega de dicho trabajo, solo puede significar que he finalizado el Grado en Ingeniería Civil, y quisiera dar las gracias en primer lugar a mis padres y a mi hermano, por su apoyo incondicional, que ha sido mi fortaleza en cada paso de este camino, gracias por estar a mi lado y confiar en mí incluso cuando yo dudaba, sin sus apoyos no habría podido alcanzar este logro.

Agradecer también a todos los profesores que me han brindado sus conocimientos durante este aprendizaje, por acompañarme en este viaje, por sus consejos y por ser ejemplo de compromiso y perseverancia. Quiero destacar especialmente a mi tutor D. Antonio Martínez de la Concha, por su dedicación y esfuerzo empleado para encaminarme en este trabajo, haciendo que cada día más me apasione este oficio que he elegido.

Finalmente, a mis compañeros y amigos que me ha regalado estudiar esta carrera, por haber compartido nuevas experiencias y mostrarme lo que es el significado de compañerismo y trabajo en equipo.

María Zambrano Caro

Sevilla, 2025.

Resumen

El presente trabajo se centra en el estudio del comportamiento estructural de los puentes tipo arco. En una primera fase, se ha comparado un puente de referencia replicando el estudio desarrollado por D. Javier Manterola en su obra *“Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II [1]”* con otro modelo que tienen mismas características, lo único que se modifica es la modelización del tablero, que en este caso es mediante placas y el de J. Manterola es con barras (modelo realizado mediante el programa MIDAS CIVIL [3] realizado por Antonio Domínguez [4]). Esta etapa ha permitido comprobar la importancia de la deformabilidad de las secciones.

Una vez contrastada la diferencia entre modelización con barras o con placas de dicha estructura, se ha procedido al análisis comparativo de distintas configuraciones estructurales, organizadas en dos grupos principales: modificación relativa de las rigideces a torsión entre arco y tablero y variación de la relación flecha-luz. Para cada uno de estos casos, se han generado múltiples modelos en los que se han modificado de forma progresiva las propiedades correspondientes, con el fin de evaluar su influencia en el comportamiento global del sistema.

Finalmente, se han identificado y sintetizado las conclusiones más significativas derivadas del análisis paramétrico realizado, proporcionando una visión clara sobre cómo afectan determinadas características geométricas y mecánicas al funcionamiento estructural de los puentes arco.

El objetivo principal del estudio es profundizar en la comprensión del efecto que tiene la variación de ciertas propiedades estructurales sobre la respuesta del puente, con el fin de aportar criterios útiles para su diseño y optimización.

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Índice	XIII
Índice de Tablas	XV
Índice de Figuras	XVI
1 Introducción: el puente arco	21
1.1. Objeto	23
2 Comparativa Modelo Previo	25
2.1. Geometría	25
2.1.1 Estructura	25
2.1.2 Secciones transversales	25
2.1.2.1. Secciones transversales del modelo previo	25
2.1.2.2. Secciones transversales del modelo nuevo	26
2.2. Materiales	28
2.3. Apoyos y condiciones de contorno	28
2.4. Cargas	29
2.4.1. Cargas modelo previo	29
2.4.2. Cargas modelo nuevo	29
2.5. Resultados	30
2.5.1. Teoría de placas	30
2.5.2. Resultados: rigidez a torsión predominante en el dintel en el nuevo modelo	36
2.5.3. Análisis de resultado	39
2.5.4. Análisis comparativo de los resultados de ambos mdoleo	42
2.5.4.1. Carga excéntrica	42
2.5.4.2. Carga transversal	47
2.6. Conclusiones	49
3. Influencia de la rigidez a torsión de arco y tablero	51
3.1. Cálculo de secciones	51
3.2. Modelo J. Manterola	53
3.2.1. Secciones transversales	54
3.2.2. Materiales	54
3.2.3. Apoyos y condiciones de contorno	54
3.2.4. Cargas	54
3.2.5. Resultados	55
3.3. Modelo nuevo	59

3.3.1. Sección transversal modleo nuevo	59
3.3.2. Secciones transversales	61
3.3.3. Materiales	61
3.3.4. Apoyos y condiciones de contorno	61
3.3.5. Cargas	61
3.4. <i>Resultados de las nuevas secciones</i>	61
3.4.1. Rigidez a torsión predominante en el tablero: Modleo Nuevo	61
3.4.2. Análisis de resultados	65
3.4.2.1. Carga excéntrica	65
3.4.2.2. Carga transversal	70
3.5. <i>Conclusiones</i>	73
4. Influencia de la relación flecha-luz	75
4.1. <i>Cálculo de las secciones</i>	76
4.2. <i>Resultados</i>	78
4.2.1. Caso 0: $f = L6.6$	78
4.2.2. Caso I: $f = L5$	81
4.2.3. Caso II: $f = L10$	85
4.2.4. Caso III: $f = L16$	89
4.3. <i>Análisis de resultados</i>	92
4.3.1. Carga excéntrica	92
4.3.2. Carga transversal	97
4.4. <i>Conclusiones</i>	101
5. Conclusiones	103
Referencias	104
Glosario	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de las secciones	52
Tabla 2: Comparación del efecto del esfuerzo cortante según la relación entre rigideces a torsión de arco y tablero	69
Tabla 3: Solicitación torsora $x = 26.25$ m	72
Tabla 4: Solicitación torsora $x = 32.5$ m	72
Tabla 5: Solicitación torsora $x = 45$ m	72
Tabla 6: Solicitación torsora $x = 57.5$ m	72
Tabla 7: Comparación de los desplazamientos según la relación flecha-luz ante carga excéntrica	93
Tabla 8: Comprobación del efecto del esfuerzo cortante la relación flecha-luz ante carga excéntrica	95
Tabla 9: Comprobación del momento transversal según la relación flecha-luz ante carga excéntrica	96
Tabla 10: Comprobación del momento torsor según la relación flecha-luz ante carga transversal	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1: Arco con tablero superior	21
Imagen 2: Puente de Sibenik (Croacia)	21
Imagen 3: Arco con tablero intermedio	22
Imagen 4: Imagen 4. Pasarela en la Ronda de la Hispanidad	22
Imagen 5: Arco con tablero inferior	22
Imagen 6: Imagen 6. Puente de la Barqueta, Sevilla	22
Imagen 7: Secciones tipos del arco y pilares, respectivamente, Modelo Previo	25
Imagen 8: Sección tipo del tablero, Modelo Previo	26
Imagen 9: Sección transversal del puente con rigidez a torsión predominante en tablero	26
Imagen 10: Vista en planta del tablero tipo placa	27
Imagen 11: Vista en perspectiva de la estructura	27
Imagen 12: Vista en perspectiva del tablero	27
Imagen 13: Vista en perspectiva de los diafragmas del tablero	28
Imagen 14: Vista de la sección del tablero	28
Imagen 15: Vista de las condiciones de apoyos y contorno de la estructura	28
Imagen 16: Carga excéntrica del modelo nuevo	29
Imagen 17: Carga transversal del modelo nuevo	29
Imagen 18: Configuración geométrica y orientación de los ejes locales en elementos finitos tipo	30
Imagen 19: Momentos por unidad de longitud	31
Imagen 20: Esfuerzos de placa	31
Imagen 21: definición del campo de desplazamientos en una placa y definición del giro	32
Imagen 22: Deformación de una sección (a) por flexión (ϵ_f) y (b) por cortante (ϵ_c).	32
Imagen 23: Estado tensional en una placa: (a) tensiones normales y (b,c) tensiones tangenciales.	32
Imagen 24: Definición de los esfuerzos (a) flectores, (b) torsores y (c) cortantes	34
Imagen 25: Desplazamiento transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero	36
Imagen 26: Momento flector transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero	36
Imagen 27: Momento torsor ante carga excéntrica, rigidez en tablero	37
Imagen 28: Cortante transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero	37
Imagen 29: Desplazamiento transversal ante carga transversal, rigidez en tablero	38
Imagen 30: Momento torsor ante carga transversal, rigidez en tablero	38
Imagen 31: Cortante transversal ante carga transversal, rigidez en tablero	39
Imagen 32: Momento flector transversal ante carga transversal, rigidez en tablero	39
Imagen 33: Solicitación torsora y sistema de par de fuerzas, rigidez torsora predominante en el tablero	40
Imagen 34: Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica	41
Imagen 35: Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica (Modelo MIDAS CIVIL)	41

Imagen 36: Comparación de efecto generado por carga excéntrica (Sección: $x = 98.75$ m)	42
Imagen 37: Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica	43
Imagen 38: Comparación de Momentos Transversal en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica	44
Imagen 39: Comparación de Momentos Transversal en el arco según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica	44
Imagen 40: Comparación de Momento Torsor en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica	45
Imagen 41: Comparación de Cortante Transversal en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica	46
Imagen 42: Comparación de efecto generado por carga transversal (Sección: $x = 98.75$ m)	47
Imagen 43: Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante en el tablero ante carga transversal	47
Imagen 44: Comparación de Momentos Transversal con rigidez predominante en el tablero ante carga transversal	48
Imagen 45: Comparación de Momento Torsor en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga transversal	48
Imagen 46: Comparación de Cortante Transversal en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga transversal	49
Imagen 47: Sección Viga cajón del tablero del Modelo Nuevo	52
Imagen 48: Sección Arco del Modelo Nuevo	53
Imagen 49: Sección transversal del puente con rigidez a torsión predominante en tablero, Modelo Nuevo	53
Imagen 50: Vista en perspectiva de la estructura	54
Imagen 51: Sección tipo, modelo de J. Manterola	54
Imagen 52: Secciones tipo, modelo propuesto (arco, pilares y tablero)	54
Imagen 53: Carga excéntrica y transversal	55
Imagen 54: Flecha transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola	55
Imagen 55: Flecha transversal ante carga excéntrica modelo propuesto	55
Imagen 56: Momento torsor ante carga excéntrica modelo J. Manterola	56
Imagen 57: Momento torsor ante carga excéntrica modelo propuesto	56
Imagen 58: Cortante transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola	56
Imagen 59: Cortante transversal ante carga excéntrica modelo propuesto	56
Imagen 60: Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola	57
Imagen 61: Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo propuesto	57
Imagen 62: Flecha transversal ante carga transversal modelo J. Manterola	57
Imagen 63: Flecha transversal ante carga transversal modelo propuesto	57
Imagen 64: Momento torsor ante carga transversal modelo J. Manterola	58
Imagen 65: Momento torsor ante carga transversal modelo propuesto	58
Imagen 66: Cortante transversal ante carga transversal modelo J. Manterola	58
Imagen 67: Cortante transversal ante carga transversal modelo propuesto	58

Imagen 68: Momento flector transversal ante carga transversal modelo J. Manterola	59
Imagen 69: Momento flector transversal ante carga transversal modelo propuesto	59
Imagen 70: Vista en planta del tablero del Modelo Nuevo	59
Imagen 71: Vista en perspectiva de la estructura del Modelo Nuevo	60
Imagen 72: Vista en perspectiva del tablero del Modelo Nuevo	60
Imagen 73: Vista en perspectiva de los diafragmas del tablero del Modelo Nuevo	60
Imagen 74: Desplazamiento transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	61
Imagen 75: Momento torsor ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	62
Imagen 76: Cortante transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	62
Imagen 77: Momento flector transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	63
Imagen 78: Desplazamiento transversal ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	63
Imagen 79: Momento torsor ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	64
Imagen 80: Cortante transversal ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	64
Imagen 81: Momento flector transversal ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo	65
Imagen 82: Comparación de efecto generado por carga excéntrica (Sección: $x = 98.75$ m)	65
Imagen 83: Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica	66
Imagen 84: Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga excéntrica	67
Imagen 85: Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica	68
Imagen 86: Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica, Modelo Nuevo	69
Imagen 87: Comparación de desplazamiento transversal según rigidez predominante ante carga transversal	70
Imagen 88: Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga transversal	71
Imagen 89: Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga transversal	71
Imagen 90: Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga transversal	73
Imagen 91: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{6.6}$	76
Imagen 92: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{5}$	76
Imagen 93: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{10}$	76
Imagen 94: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{16}$	78
Imagen 95: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$	78
Imagen 96: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/6.6$	79
Imagen 97: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$	79
Imagen 98: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$	79
Imagen 99: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/6.6$	80
Imagen 100: Momento torsor ante carga transversal $f=L/6.6$	80
Imagen 101: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/6.6$	80
Imagen 102: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/6.6$	81
Imagen 103: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/5$	81

Imagen 104: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/5$	82
Imagen 105: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/5$	82
Imagen 106: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/5$	83
Imagen 107: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/5$	83
Imagen 108: Momento torsor ante carga transversal $f=L/5$	84
Imagen 109: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/5$	84
Imagen 110: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/5$	85
Imagen 111: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/10$	85
Imagen 112: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/10$	86
Imagen 113: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/10$	86
Imagen 114: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/10$	87
Imagen 115: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/10$	87
Imagen 116: Momento torsor ante carga transversal $f=L/10$	88
Imagen 117: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/10$	88
Imagen 118: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/10$	88
Imagen 119: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/16$	89
Imagen 120: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/16$	89
Imagen 121: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/16$	90
Imagen 122: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/16$	90
Imagen 123: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/16$	91
Imagen 124: Momento torsor ante carga transversal $f=L/16$	91
Imagen 125: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/16$	92
Imagen 126: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/16$	92
Imagen 127: Comparación de desplazamientos transversales según f/L ante carga excéntrica	93
Imagen 128: Comparación de momento torsor según f/L ante carga excéntrica	94
Imagen 129: Comparación de cortante transversal según f/L ante carga excéntrica	95
Imagen 130: Comparación de momento transversal según f/L ante carga excéntrica	96
Imagen 131: Comparación de desplazamientos transversales según f/L ante carga transversal	97
Imagen 132: Evolución de la sollicitación torsora y del esfuerzo de torsión en el arco según la relación flecha-luz	99
Imagen 133: Comparación de momento torsor según f/L ante carga transversal	99
Imagen 134: Comparación de cortante transversal según f/L ante carga transversal	100
Imagen 135: Comparación de momento transversal según f/L ante carga transversal	101

1 INTRODUCCIÓN: EL PUENTE ARCO

El presente Trabajo de Fin de Grado toma como punto de partida el estudio realizado por Antonio Domínguez López [4], cuyo enfoque me resultó especialmente interesante y bien fundamentado. A partir de su trabajo, se plantea una continuación orientada a profundizar y ampliar algunos de los aspectos tratados, con el fin de enriquecer la línea de investigación iniciada, con base de la investigación que realizó J. Manterola [1].

La introducción del trabajo de fin de grado realizado por Antonio [4] se centró en detallar las principales razones del desuso del puente arco y su proceso constructivo. Para complementar la información sobre los puentes arcos, a continuación, se va a detallar como trabajan dichos puentes y los distintos puentes arcos que existen.

La característica principal que distingue a los puentes arco de otros tipos de puentes es su capacidad para soportar cargas gracias a su forma. Al diseñar un puente arco, se busca que su directriz se asemeje lo máximo posible a la curva antifunicular de las cargas que soporta, de modo que su funcionamiento estructural sea predominantemente mediante esfuerzos de compresión, es decir, si la forma del arco coincide con la línea de presión, estará en su situación óptima, sólo sometido a compresiones, sin excentricidad, ni flexión, ni tracciones que lo debiliten. La curva antifunicular, es la curva óptima de un arco para un determinado conjunto de cargas verticales. Para una única carga puntual, un triángulo. Para una carga uniformemente distribuida, una parábola. El arco con forma parabólica sufre menos flexiones bajo cargas uniformemente distribuidas y sufre bajo cargas concentradas o asimétricas. En consecuencia, su mecanismo de resistencia difiere notablemente del de un puente de viga, en el que predominan los esfuerzos de flexión.

El puente arco es visto como una solución muy adecuada para grandes luces, puesto que con hormigón pueden obtenerse hasta 400 metros y con arco metálico se ha llegado a superar los 500 metros.

Según la situación entre arco y tablero existen tres tipos de puentes:

- Arco con tablero superior
- Arco con tablero intermedio
- Arco con tablero inferior

Los puentes arco con tablero superior, la transmisión de carga entre arco y tablero se realiza por pilares. Es recomendado para valles en forma de V. El terreno desempeña un papel crucial al resistir los empujes generados por el arco, por lo que es imprescindible que cuente con unas características geotécnicas adecuadas.

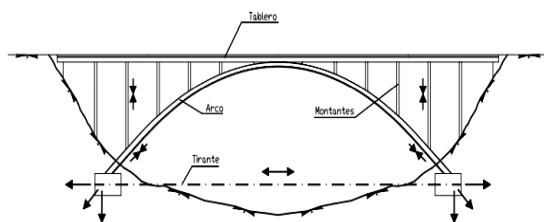


Imagen 1. Arco con tablero superior [5]



Imagen 2. Puente de Sibenik (Croacia) [6]

Los puentes arco con tablero intermedio la transmisión de carga entre arco y tablero, una zona lo realiza por tirantes y otra por pilares. Para ganar flecha se pasa el arco por encima del tablero. Por ejemplo, la pasarela de acero de la Ronda de la Hispanidad.

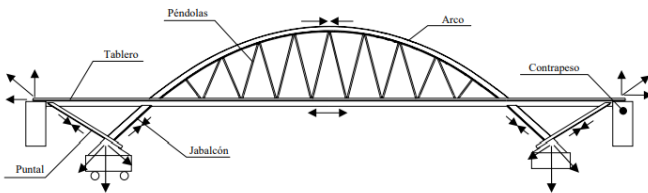


Imagen 3. Arco con tablero intermedio [5]



Imagen 4. Pasarela en la Ronda de la Hispanidad [7]

Y finalmente, los puentes arco con tablero inferior la transmisión de carga entre arco y tablero es por tirantes. No introduce acciones horizontales en el terreno, únicamente se transmitan cargas verticales a la cimentación. Esto hace que este tipo de diseño sea apto para prácticamente cualquier tipo de terreno. Como inconveniente, el proceso constructivo es un poco más complejo que los anteriores.

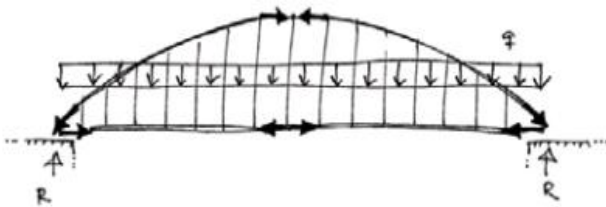


Imagen 5. Arco con tablero inferior [5]



Imagen 6. Puente de la Barqueta, Sevilla [8]

Por último, como dicho trabajo va a hacer la continuación de mi compañero y al hilo de lo que se desarrollará en adelante, mantengo lo que Javier Manterola afirmaba en un artículo en 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

Como bien comentaba mi compañero A. Domínguez [4], la alta capacidad de los puentes arco para soportar cargas excéntricas ha sido uno de los motivos principales por los cuales esta tipología se ha utilizado ampliamente a lo largo de la historia. En su obra *en Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II [1]*, J. Manterola presenta un análisis detallado de los puentes arco sometidos a cargas excéntricas y transversales, centrandó su estudio en el comportamiento estructural en función de la relación entre las rigideces del tablero y el arco.

En el siguiente trabajo, el primer objetivo es realizar nuevamente el modelo de Antonio donde la rigidez predomina en el tablero, pero en este caso, en vez de ser con barras se va a modelizar el tablero con elementos tipo placa y así poder estudiar las diferencias con el modelo anterior de barras. Se espera de este modo poder capturar mejor los efectos correspondientes a la distorsión y la deformabilidad de las secciones, que un modelo de barras no permite analizar.

El segundo objetivo es comparar el modelo de J. Manterola [1], donde la rigidez predomina en el arco, con un nuevo modelo con nuevas secciones, con unas características específicas y donde la relación entre rigideces a torsión entre arco y tablero se verán invertidas nuevamente.

Como tercer objetivo, se realizará mismo estudio que mi compañero A. Domínguez [4], ampliar el estudio para obtener conclusiones que permitan entender de forma más clara el comportamiento de la estructura arco-tablero. Dicha etapa se centrará en observar cómo varía la capacidad resistente de la estructura en función de la relación entre la flecha y la luz del arco.

Todos estos análisis se llevarán a cabo en dos versiones: una considerando la acción de cargas excéntricas y otra evaluando la respuesta ante cargas transversales, como las generadas por el viento.

2 COMPARATIVA MODELO PREVIO

En este apartado se va a desarrollar un estudio comparativo con el modelo que realizó mi compañero Antonio en su TFG [4] con un modelo idéntico, tanto en la geometría, en las cargas y condiciones de contorno, pero la modelización del tablero se realizará con elementos placa en vez de con barras, para comprobar la relevancia de la deformabilidad de las secciones.

El modelo seleccionado para el estudio es el del apartado “*Influencia de la rigidez a torsión de arco y tablero*” [4], donde la rigidez a torsión predomina en el tablero frente a la del arco.

2.1 Geometría

En el contexto del trabajo de Antonio [4], el modelo estructural adoptado emplea una discretización basada en un esquema de elementos finitos basado en un modelo de barras con el programa MIDAS CIVIL [3], lo que permite analizar con precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones en el arco, el tablero y los pilares. A continuación, se va a detallar como recordatorio las características y configuración del modelo utilizado.

2.1.1 Estructura

El arco analizado presenta una luz de 100 metros y una flecha de 15 metros, con una geometría parabólica. La relación flecha-luz es de 6.6. Su discretización lo ha realizado con 80 elementos tipo barra, con una longitud unitaria de 1.25 metros, lo que implica la presencia de cuatro elementos entre cada par de pilares.

El tablero, con una longitud total de 140 metros, se extiende 20 metros más allá de los apoyos del arco en ambos extremos, alcanzando los estribos. La discretización del tablero comprende 112 elementos de barra de 1.25 metros, manteniendo la misma configuración de cuatro elementos por tramo entre pilares. La sección de dicho tablero es tipo cajón.

En cuanto a los pilares, cada uno ha sido representado mediante un único elemento de barra. Se han dispuesto apoyos cada 5 metros, lo que da lugar a un total de 28 pilares de conexión entre el arco y el tablero, además de tres pilares adicionales en cada extremo del arco, anclados al terreno.

2.1.2 Secciones transversales

2.1.2.1. Secciones transversales del modelo previo

A continuación, se va a mostrar unas imágenes donde se puede apreciar como son las secciones transversales geométricamente del arco, del tablero y los pilares.

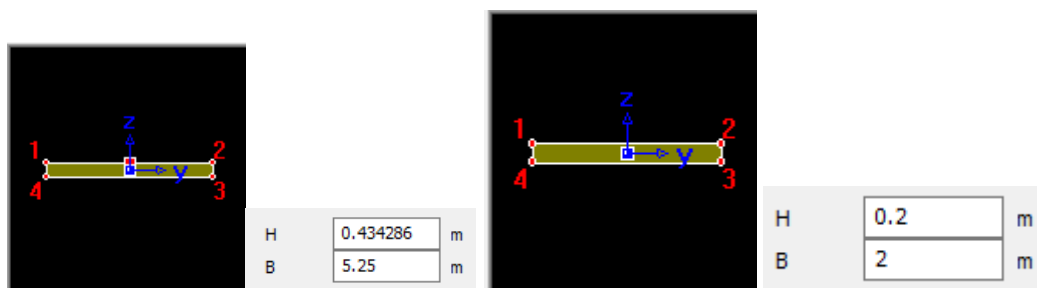


Imagen 7: Secciones tipos del arco y pilares, respectivamente, Modelo Previo.

☐ JO1	☐ JI1	☐ JI4	HO1	0.25 m	BO1	2 m
☐ JO2	☐ JI2	☐ JI5	HO2	0 m	BO1-1	0 m
☐ JO3	☐ JI3		HO2-1	0 m	BO1-2	0 m
Section Type			HO2-2	0 m	BO2	0 m
☒ 1 Cell			HO3	0.6 m	BO2-1	0 m
☐ 2 Cell			HO3-1	0 m	BO3	4 m
Shear Check			Inner			
Z1: 0.6 m			HI1	0.25 m	BI1	3 m
Z2: Centroid			HI2	0 m	BI1-1	0 m
Z3: 0.2 m			HI2-1	0 m	BI1-2	0 m
Web Thick. for Shear(total)			HI2-2	0 m	BI2-1	0 m
t1: 2 m			HI3	0.4 m	BI2-2	0 m
t2: 2 m			HI3-1	0 m	BI3	3 m
t3: 2 m			HI4	0 m	BI3-1	0 m
for Torsion(min.)			HI4-1	0 m	BI3-2	0 m
1 m			HI4-2	0 m	BI4	0 m
			HI5	0.2 m		
			☒ Consider Shear Deformation. ☐ Consider Warping Effect(7th DOF) Warping Check ☒ Auto ☐ User ...			

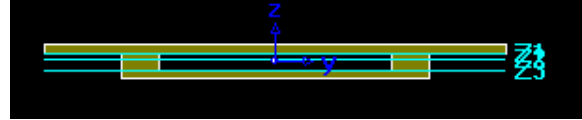


Imagen 8: Sección tipo del tablero, Modelo Previo

Se muestra a continuación una imagen que realizó Antonio de su sección del puente [4], donde incluye las correspondientes cotas. Cada pilar presenta una sección transversal de 0.2×2 metros, mientras que su altura varía a lo largo del arco. A modo de referencia, en la imagen se ilustra un pilar con una altura de 4 metros.

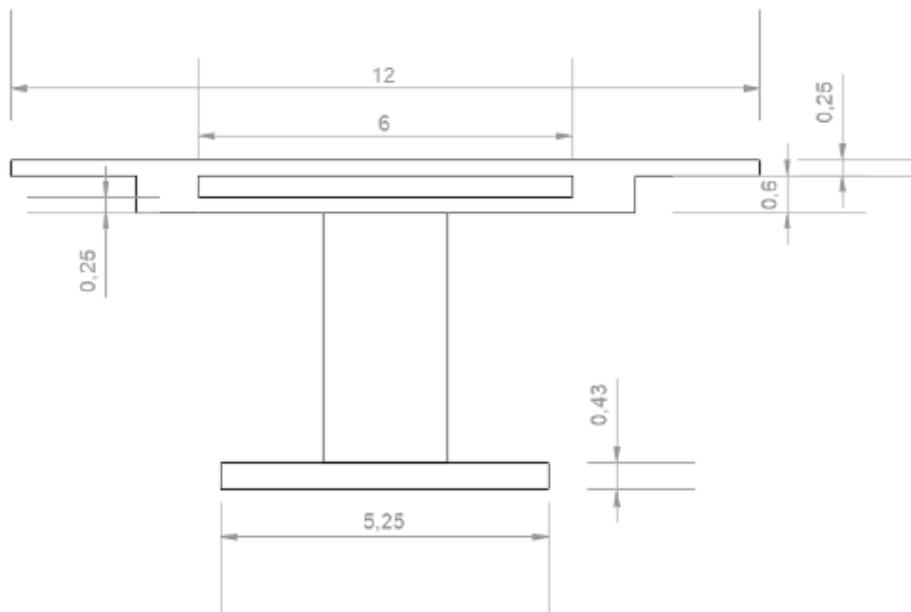


Imagen 9: Sección transversal del puente con rigidez a torsión predominante en tablero

2.1.2.2. Secciones transversales del modelo nuevo

Como ya he comentado anteriormente, las características geométricas del modelo son idénticas a la de Antonio, exceptuando el tablero que están modelizadas con sección placa. A continuación, muestro unas imágenes del modelo MIDAS CIVIL [3] para apreciar como quedaría:

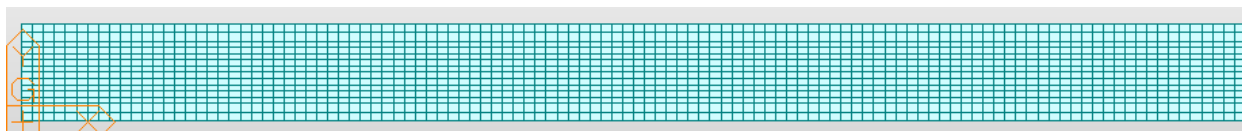


Imagen 10: Vista en planta del tablero tipo placa

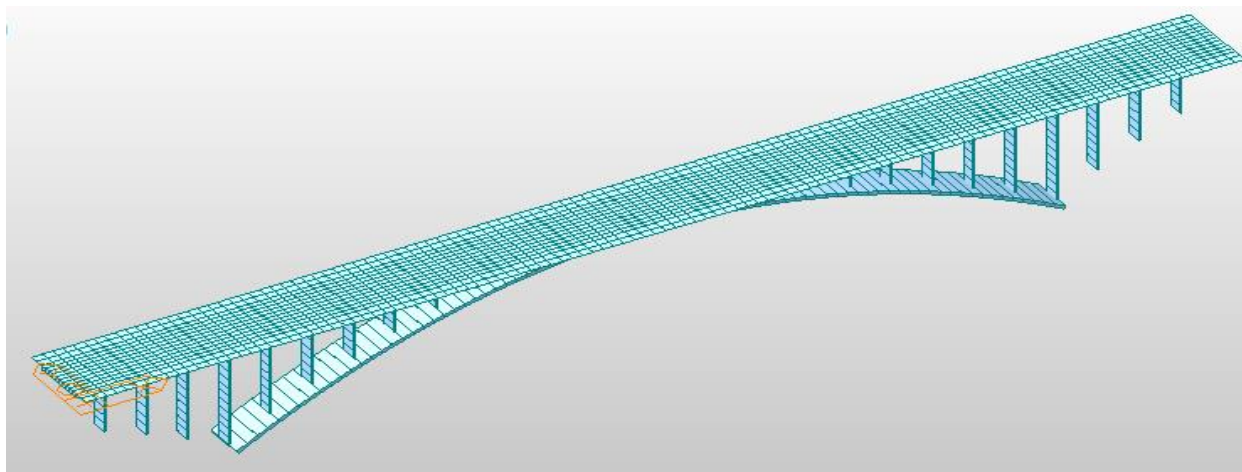


Imagen 11: Vista en perspectiva de la estructura

Como se puede comprobar el tablero está formado por elementos tipo placa con una dimensión de 1.25 x 1.25 metros cada una, que recorre los 140 metros de longitud que tiene el tablero. Se ha discretizado más en las particiones donde se encuentran los estribos y los pilares, es decir, cada 5 metros de los extremos incluyendo éstas también, para así tener un mejor análisis, con un total de 30 discretizaciones (diafragmas) hasta alcanzar los 140 metros. Estas placas poseen un espesor, la cual varían según donde se encuentren, es decir, en la superficie superior tienen un espesor de 0.25m; en la superficie inferior (base) tiene un espesor de 0.2m y finalmente, las superficies que forman los laterales de la viga cajón y sus particiones interiores (diafragmas) tienen un espesor de 1m.

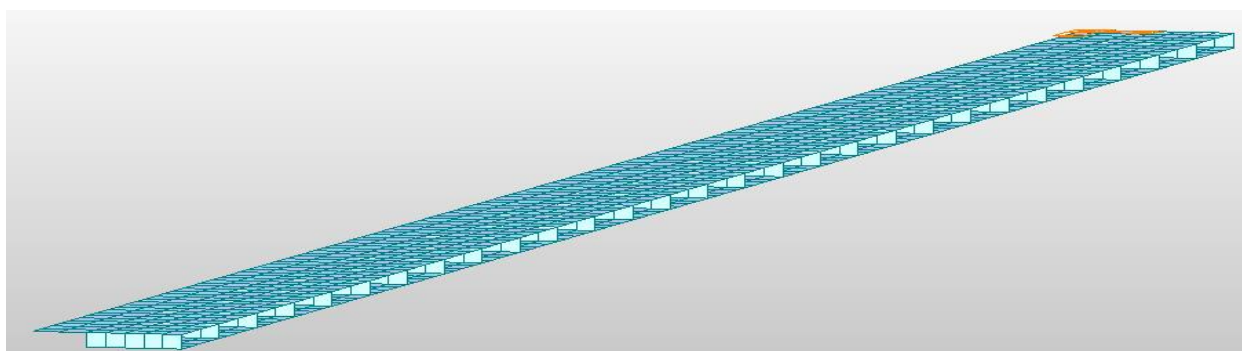


Imagen 12: Vista en perspectiva del tablero

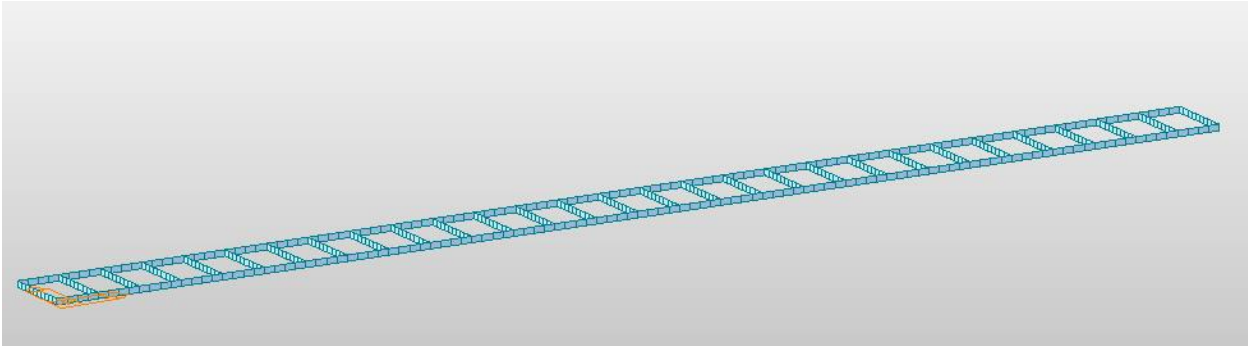


Imagen 13: Vista en perspectiva de los diafragmas del tablero

Ya comentado anteriormente, las secciones del nuevo modelo son idénticas al del modelo previo, tanto tablero, arco y pilares, sin embargo, el tablero como está diseñada con modelo tipo placa, se aprecia la siguiente manera:

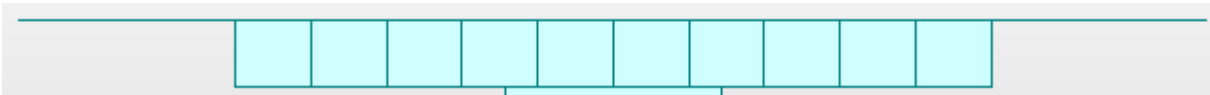


Imagen 14: Vista de la sección del tablero

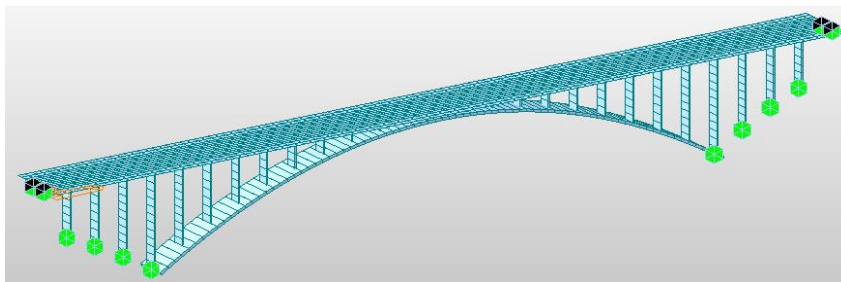
2.2 Materiales

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 .

2.3 Apoyos y condiciones de contorno

Las condiciones de contorno como los de apoyo, se mantienen iguales al modelo de Antonio, que eran:

- La conexión del arco con el terreno se encuentra biempotrada, garantizando la restricción total de movimientos en sus extremos. Adicionalmente, se han aplicado condiciones de contorno de empotramiento en los pilares situados entre el extremo del arco y los estribos.
- En los estribos, se ha considerado una condición que permite tanto el desplazamiento en dirección longitudinal como el giro en el plano transversal.
- La vinculación entre los pilares, el arco y el tablero se ha definido como una conexión biempotrada, asegurando la transmisión integral de esfuerzos. En la clave del arco, la conexión entre este y el tablero se realiza mediante un pilar de 1 metro de altura.



Node	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz	Rwl	Group
19	0	1	1	1	0	0	0	Default
23	0	1	1	1	0	0	0	Default
2932	0	1	1	1	0	0	0	Default
2936	0	1	1	1	0	0	0	Default
2939	1	1	1	1	1	1	0	Default
2940	1	1	1	1	1	1	0	Default
2941	1	1	1	1	1	1	0	Default
2942	1	1	1	1	1	1	0	Default
3022	1	1	1	1	1	1	0	Default
3023	1	1	1	1	1	1	0	Default
3024	1	1	1	1	1	1	0	Default
3025	1	1	1	1	1	1	0	Default

Imagen 15: Vista de las condiciones de apoyos y contorno de la estructura

2.4 Cargas

Las cargas aplicadas al puente son las que empleó J. Manterola en su estudio, donde se puede distinguir dos cargas:

2.4.1. Cargas modelo previo

- Carga excéntrica, por la existencia de una sobrecarga sobre la mitad transversal del puente que recorre todo el tablero. El valor de dicha sobrecarga es de 23.5 kN/m (400 kg/m^2), valorando además la carga del peso propio de la losa en toda la sección transversal del puente, de valor 11.8 kN/m (100 kg/m^2).
- Carga transversal, correspondiente al viento, que en su caso es idéntica tanto en el arco y como en el dintel, cuyo valor es de 0.98 kN/m .

2.4.2. Cargas modelo nuevo

En el presente modelo, las cargas que incumbe al tablero tienen otro valor, pero tienen el mismo efecto que el modelo previo

- Carga excéntrica, debido a una sobrecarga (pavimento y sobrecarga) que actúa sobre el tablero. Consta de una sobrecarga aplicada en toda la longitud del tablero cuyo valor es de 0.98 kN/m (100 kg/m^2) y otra sobrecarga que se encuentra en la mitad de la sección recorriendo todo el puente de valor 3.92 kN/m (400 kg/m^2). También se tiene en cuenta la carga del peso propio.

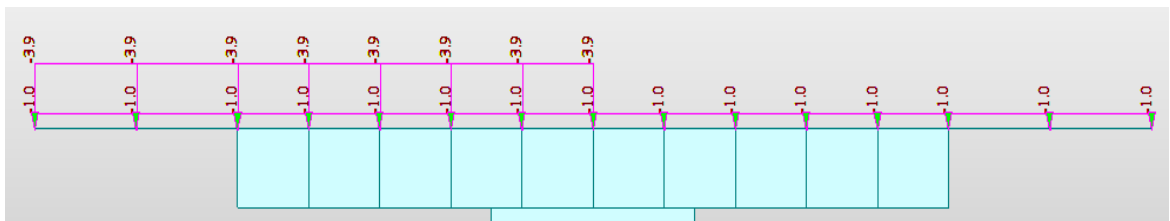


Imagen 16: Carga excéntrica del modelo nuevo

- Carga transversal (viento) que se encuentra aplicada uniformemente en todo el arco, con un valor de 0.98 kN/m y otra en el dintel de un lado del tablero, cuyo valor es de 1.5696 kN/m

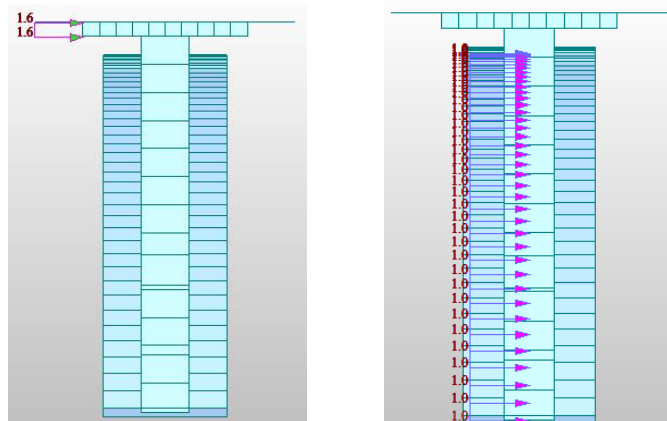


Imagen 17: Carga transversal del modelo nuevo

2.5 Resultados

Seguidamente, se va a explicar cómo se ha obtenido los resultados de dicho estudio y seguidamente se va a mostrar los resultados que se ha adquirido graficamente y concluyendo conjuntamente con las de Antonio para así visualizar perfectamente las diferencias y así analizar y explicar las conclusiones que se ha a obtenido.

2.5.1. Teoría de placas

Como bien se explicaba al inicio, todo el estudio se ha modelizado con el programa MIDAS CIVIL [3], y en este caso el tablero del puente está diseñado con elementos tipo placa, que permiten simular el comportamiento estructural en dos direcciones (flexión biaxial y cortante).

- Cada elemento de placa tiene 6 grados de libertad por nodo (3 traslacionales y 3 rotacionales).
- Esta modelización es más precisa que una modelización con elementos tipo barras, ya que captura la distribución tridimensional de esfuerzos y momentos en el tablero.

Seguidamente, como MIDAS CIVIL [3] aplica la teoría de placas, se va a explicar brevemente en que consiste dicho estudio. Las placas son elementos estructurales que se caracterizan por tener una dimensión, el espesor, mucho menor que las otras dos. Los elementos “Plate” está definido por tres o cuatro nodos colocados en el mismo plano. Este elemento es capaz de tomar en cuenta comportamiento de tensión/compresión dentro del plano, cortantes dentro y fuera del plano, flexión fuera del plano. La rigidez fuera del plano se puede tomar en cuenta de dos maneras:

- Como un elemento discreto con la teoría de Kirchhoff (thin plate).
- Como un elemento discreto con la teoría de Mindlin-Reissner (thick plate).

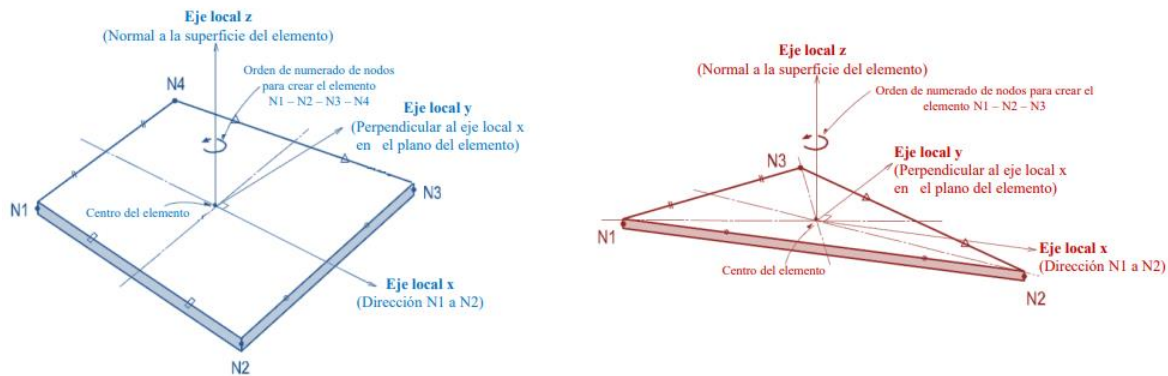


Imagen 18: Configuración geométrica y orientación de los ejes locales en elementos finitos tipo placa [9]

- Kirchhoff - Placas delgadas no toma en cuenta deformaciones por cortante:

$$\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} = \frac{p(x, y)}{D}$$

- Reissner – Mindlin – Placas gruesas, si toma en cuenta las deformaciones por cortante:

$$\nabla^2 w(x, y) + \frac{t^2(2-\nu)}{10(1-\nu)} \nabla^3 w(x, y) = \frac{p(x, y)}{D}$$

donde

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$\nabla^2 w(x, y) = \left(\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad \nabla^3 w(x, y) = \left(\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} \right)^3$$

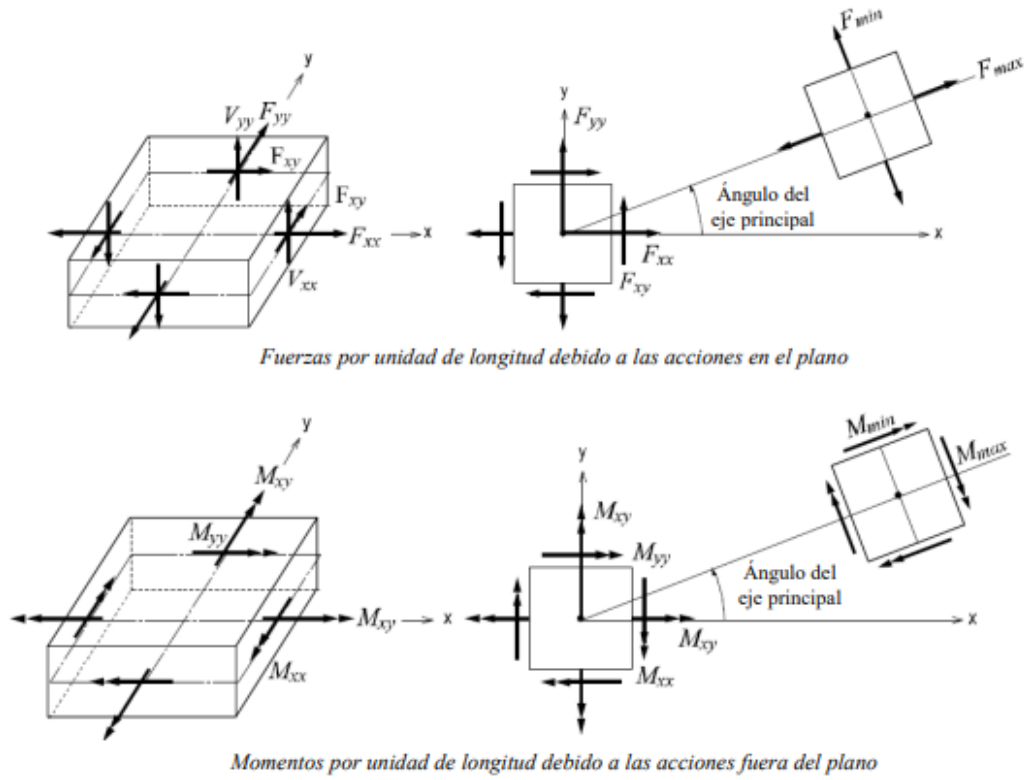


Imagen 19: Momentos por unidad de longitud [9]

σ_x : Esfuerzos Axiales en el eje local x

σ_y : Esfuerzos Axiales en el eje local y

τ_{xy} : Esfuerzos Cortantes en el plano local xy

$$\sigma_1 : \text{Esfuerzos Principales Máximos} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2 : \text{Esfuerzos Principales Mínimos} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{xy} : \text{Esfuerzos Cortantes Máximos} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

θ : ngulo entre el eje local x y el eje principal 1

$$\sigma_{eff} : \text{Esfuerzos Von Mises} = \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)}$$

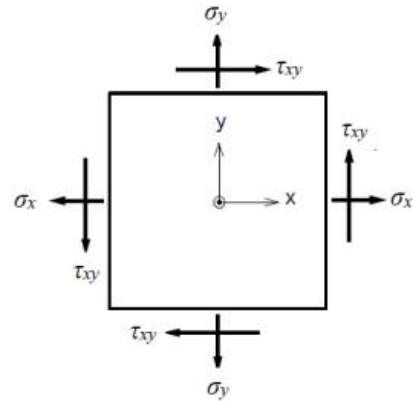


Imagen 20: Esfuerzos de placa [9]

El campo de desplazamientos de una placa se define por los desplazamientos u , v y w de acuerdo con los ejes coordenados x , y y z , respectivamente, y por las rotaciones θ_x y θ_y (Imagen 21). Los desplazamientos en un punto de la placa se descomponen en aquellos relacionados con un problema elástico de tensión plana, asociados a las componentes $u_0(x,y;z=0)$ y $v_0(x,y;z=0)$, y los desplazamientos producidos por la flexión de la placa, que determinan el desplazamiento transversal w y las rotaciones θ_x y θ_y del plano medio de la placa ($z=0$):

$$u(x,y,z) = u_0(x,y) - z\theta_x(x,y)$$

$$v(x,y,z) = v_0(x,y) - z\theta_y(x,y)$$

$$w(x,y,z) = w(x,y)$$

Ecuaciones: (1)

El campo de desplazamientos dado por las Ecuaciones anteriores presenta como variables independientes del problema de flexión de la placa las componentes w , θ_x y θ_y . Los desplazamientos en un punto de la placa $u(x;y;z)$ y $v(x;y;z)$ se calculan a partir del valor las rotaciones $\theta_x(x;y)$ y $\theta_y(x;y)$, y de la distancia z al plano medio. Los desplazamientos transversales $w(x;y)$ son uniformes en el espesor de la placa en un determinado punto de acuerdo a la segunda hipótesis realizada.

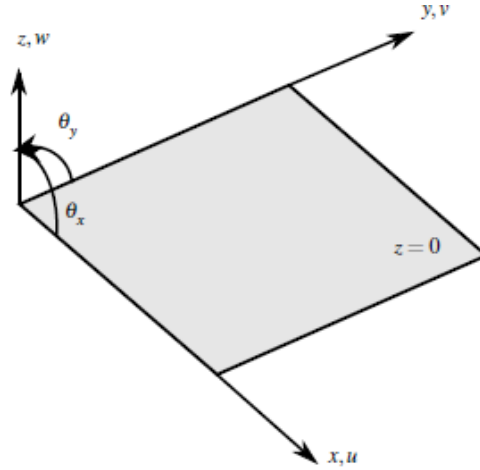


Imagen 21: definición del campo de desplazamientos en una placa y definición del giro [10]

El estado tensional que se genera en una placa (Imagen 22) cuando actúa un conjunto de acciones externas puede definirse a partir de las deformaciones y de la matriz de comportamiento del material $\mathbf{D}$: $\sigma = \mathbf{D}\epsilon$

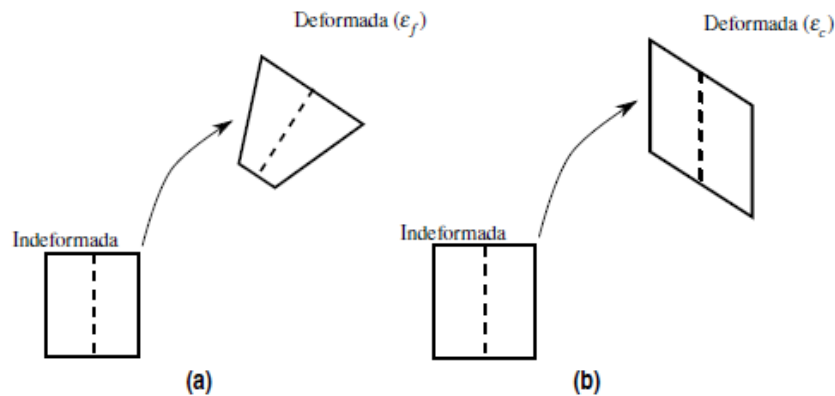


Imagen 22: Deformación de una sección (a) por flexión (ϵ_f) y (b) por cortante (ϵ_c). [10]

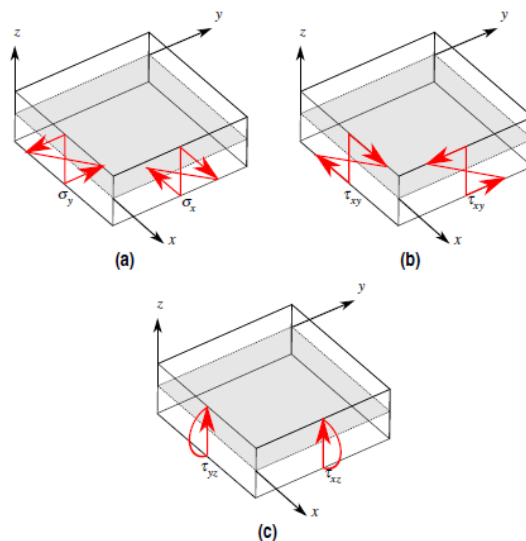


Imagen 23: Estado tensional en una placa: (a) tensiones normales y (b,c) tensiones tangenciales. [10]

Sustituyendo las expresiones de las deformaciones en función de los desplazamientos se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x(x,y,z) &= -z \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial \theta_x(x,y)}{\partial x} + \nu \frac{\partial \theta_y(x,y)}{\partial y} \right) \\
 \sigma_y(x,y,z) &= -z \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial \theta_y(x,y)}{\partial y} + \nu \frac{\partial \theta_x(x,y)}{\partial x} \right) \\
 \tau_{xy}(x,y,z) &= -zG \left(\frac{\partial \theta_x(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y(x,y)}{\partial x} \right) \\
 \tau_{xz}(x,y) &= G \left(-\theta_x(x,y) + \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \right) \\
 \tau_{yz}(x,y) &= G \left(-\theta_y(x,y) + \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right)
 \end{aligned}$$

Ecuaciones (2)

Si se consideran las curvaturas definidas por:

$$\begin{aligned}
 \chi_x(x,y) &= \frac{\partial \theta_x(x,y)}{\partial x} \\
 \chi_y(x,y) &= \frac{\partial \theta_y(x,y)}{\partial y} \\
 \chi_{xy}(x,y) &= \frac{\partial \theta_x(x,y)}{\partial y} \\
 \chi_{yx}(x,y) &= \frac{\partial \theta_y(x,y)}{\partial x}
 \end{aligned}$$

Ecuaciones (3)

se obtienen las siguientes expresiones para las componentes del tensor de tensiones asociadas a la flexión de la placa:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x(x,y,z) &= -z \frac{E}{1-\nu^2} (\chi_x(x,y) + \nu \chi_y(x,y)) \\
 \sigma_y(x,y,z) &= -z \frac{E}{1-\nu^2} (\chi_y(x,y) + \nu \chi_x(x,y)) \\
 \tau_{xy}(x,y,z) &= -zG (\chi_{xy}(x,y) + \chi_{yx}(x,y))
 \end{aligned}$$

Ecuaciones (4)

El estado tensional de la placa permite definir los esfuerzos representados en la Imagen 24: i) momentos flectores M_x y M_y producidos por las tensiones normales que actúan sobre el espesor de la sección σ_x y σ_y , respectivamente; ii) momento torsor M_{xy} debido a la tensión tangencial τ_{xy} ; y iii) esfuerzos cortantes Q_x y Q_y definidos por las tensiones tangenciales τ_{xz} y τ_{yz} .

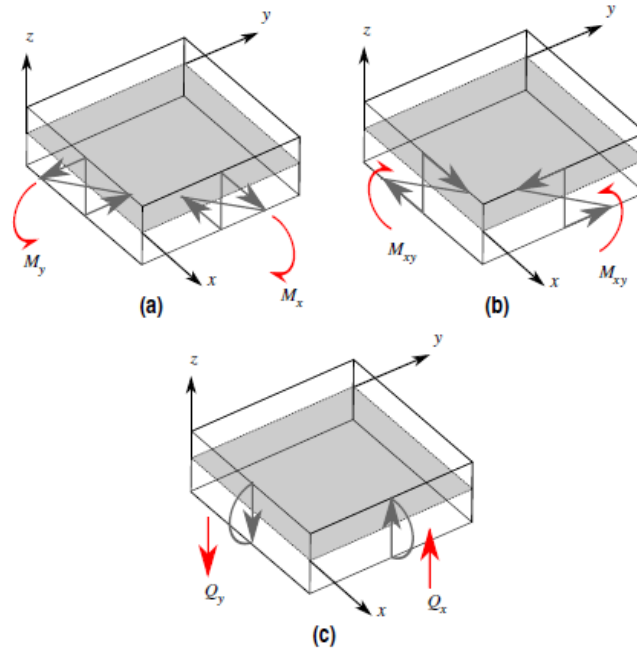


Imagen 24: Definición de los esfuerzos (a) flectores, (b) torsores y (c) cortantes [10]

Sustituyendo las definiciones de las deformaciones en función de los desplazamientos en las relaciones anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones que relacionan los esfuerzos con el campo de desplazamientos:

$$\begin{aligned}
 M_x(x,y) &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \nu \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) \\
 M_y(x,y) &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial y} + \nu \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right) \\
 M_{xy}(x,y) &= -\frac{G^*t^3}{12} \left(\frac{\partial \theta_x(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y(x,y)}{\partial x} \right) \\
 Q_x(x,y) &= G^*t \left(-\theta_x(x,y) + \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \right) \\
 Q_y(x,y) &= G^*t \left(-\theta_y(x,y) + \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \right)
 \end{aligned}$$

Ecuaciones (5)

donde G^* es el módulo de rigidez transversal equivalente. Es necesario introducir este valor equivalente ya que la distribución de tensiones tangenciales reales es como la presentada en la Imagen 24, siendo nula en los bordes de la placa. Sin embargo, según las hipótesis realizadas, las tensiones tangenciales de la teoría de placas $t_{xz}(x,y)$ y $t_{yz}(x,y)$ son constantes en el espesor.

Los momentos pueden expresarse en función de la curvatura de la placa como:

$$\begin{aligned}
 M_x(x,y) &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (\chi_x(x,y) + \nu \chi_y(x,y)) \\
 M_y(x,y) &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (\chi_y(x,y) + \nu \chi_x(x,y)) \\
 M_{xy}(x,y) &= -\frac{G^*t^3}{12} (\chi_{xy}(x,y) + \chi_{yx}(x,y))
 \end{aligned}$$

Ecuaciones (6)

Es importante indicar que los esfuerzos definidos por las Ecuaciones de M_x y M_y son esfuerzos por unidad de longitud. Por ejemplo, el momento M_x [Nm=m] representa una distribución de momentos aplicada en un lado de la placa con x constante. De igual modo, el cortante Q_y [N=m] representa una distribución de fuerzas aplicada en un lado de la placa con y constante.

En las secciones anteriores se ha desarrollado la teoría de placas general o de Reissner- Mindlin en la que las variables independientes del campo de desplazamientos son el desplazamiento transversal w , y las rotaciones σ_x y σ_y . Los giros de la placa pueden definirse como la superposición del giro producido por la flexión más la rotación debida a la deformación por cortante. La componente del giro por flexión está relacionada con la variación de la flecha de la placa a lo largo de una determinada dirección α , $\theta_\alpha^f = \partial w / \partial \alpha$. Así mismo, el giro producido por el efecto del cortante está definido por la rotación σ_α^c . De esta forma, el giro total viene dado

mediante la siguiente expresión: $\theta_\alpha = \frac{\partial w}{\partial \alpha} + \theta_\alpha^c$ donde α representa indistintamente las direcciones definidas por los ejes x e y . Los giros de la placa se obtienen directamente a partir de los desplazamientos transversales w :

$$\begin{aligned}\theta_x(x,y) &= \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \\ \theta_y(x,y) &= \frac{\partial w(x,y)}{\partial y}\end{aligned}\quad \text{Ecuaciones (7)}$$

El campo de desplazamiento definido por las ecuaciones (1) se aproxima como:

$$\begin{aligned}u(x,y,z) &= -z \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \\ v(x,y,z) &= -z \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \\ w(x,y,z) &= w(x,y)\end{aligned}\quad \text{Ecuaciones (8)}$$

donde la única componente independiente de los desplazamientos es $w(x,y)$.

La definición de las deformaciones de la placa mediante las ecuaciones anteriores permite obtener el estado tensional expresado como una función del desplazamiento transversal:

$$\begin{aligned}\sigma_x(x,y,z) &= -z \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y(x,y,z) &= -z \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy}(x,y,z) &= -2zG \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\end{aligned}\quad \text{Ecuaciones (9)}$$

También, las definiciones de los esfuerzos dadas por las Ecuaciones (1) se modifican de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}M_x(x,y) &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_y(x,y) &= -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy}(x,y) &= -\frac{G^* t^3}{12} \left(2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)\end{aligned}\quad \text{Ecuaciones (10)}$$

Puede comprobarse que los esfuerzos cortantes Q_x y Q_y son nulos de acuerdo con la definición de las rotaciones de la placa dada por las Ecuaciones (7). Son nulas ya que no existen tensiones tangenciales, τ_{xz} y τ_{yz} , producidas por la deformación por cortante. Sin embargo, para que se cumpla el equilibrio de fuerzas verticales en la placa estos términos no pueden anularse.

El desplazamiento vertical de una placa se obtiene mediante la integración de la ecuación de equilibrio aplicando condiciones de contorno. Una vez que se ha obtenido la solución de esta ecuación se calculan el campo de desplazamiento, las deformaciones, las tensiones y los esfuerzos en la placa de acuerdo a las expresiones presentadas en esta sección.

La formulación de la teoría de placas se basa en el desacoplamiento de los esfuerzos definidos en el plano de la placa (N_x , N_y y N_{xy}) de los efectos de flexión (M_x , M_y , M_{xy} , Q_x y Q_y) cuando sólo actúan cargas transversales q . En esa situación, los esfuerzos en el plano son nulos. En el caso que existan cargas en el plano los esfuerzos se pueden calcular de manera desacoplada.

Como detalladamente describía en el punto “2.1.2.1. Secciones transversales del modelo nuevo”, las placas tienen espesores, la cual éstas influyen directamente en la rigidez y los momentos generados.

2.5.2. Resultados: rigidez a torsión predominante en el dintel en el nuevo modelo

Como el tablero se encuentra modelizado con placas, para generar las gráficas mediante el programa «Microsoft Excel,» 2016 [11], se ha tenido que generar un corte por el eje del tablero, cortando por cada punto central de cada placa y con esos puntos se ha podido obtener dichos datos.

- Desplazamientos transversales:

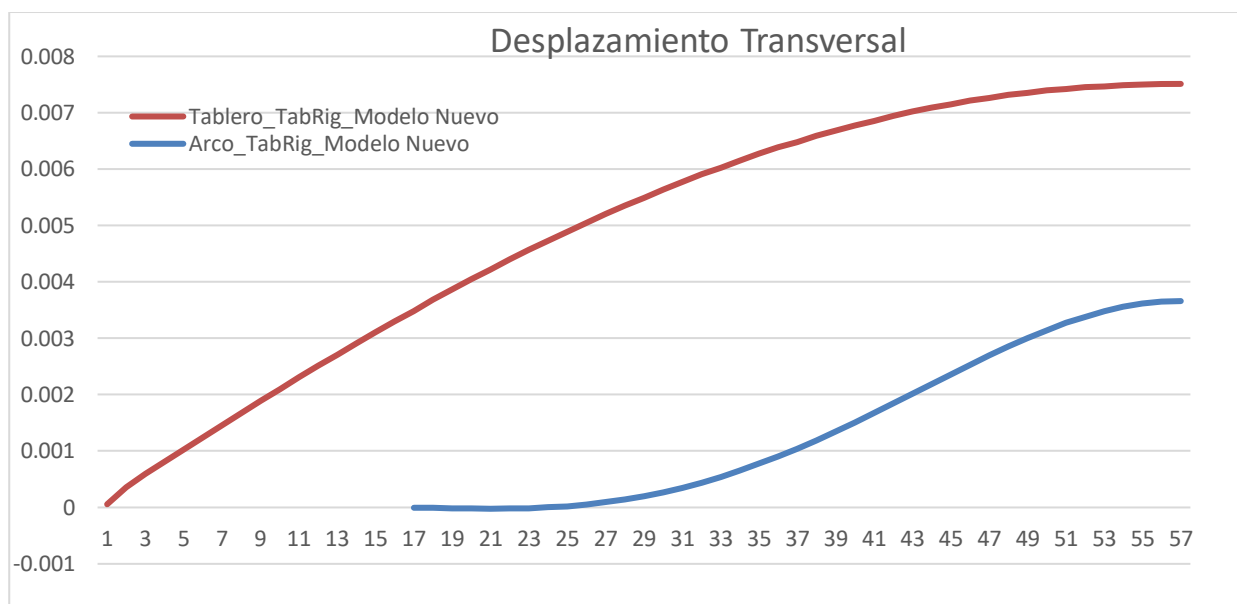


Imagen 25: Desplazamiento transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero

- Flectores transversales:

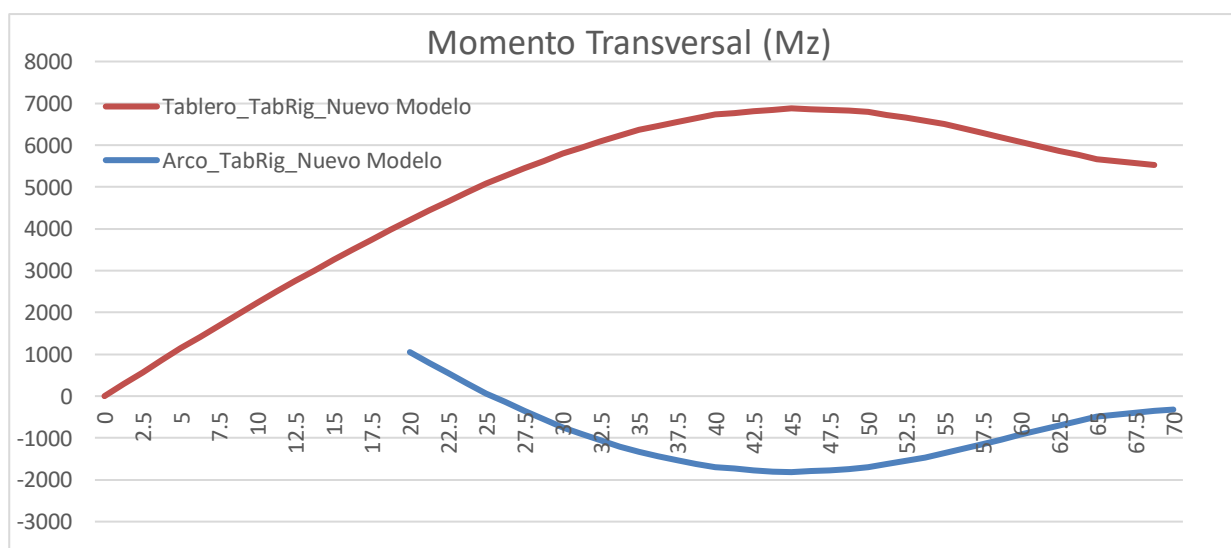


Imagen 26: Momento flector transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero

- Momentos torsores:

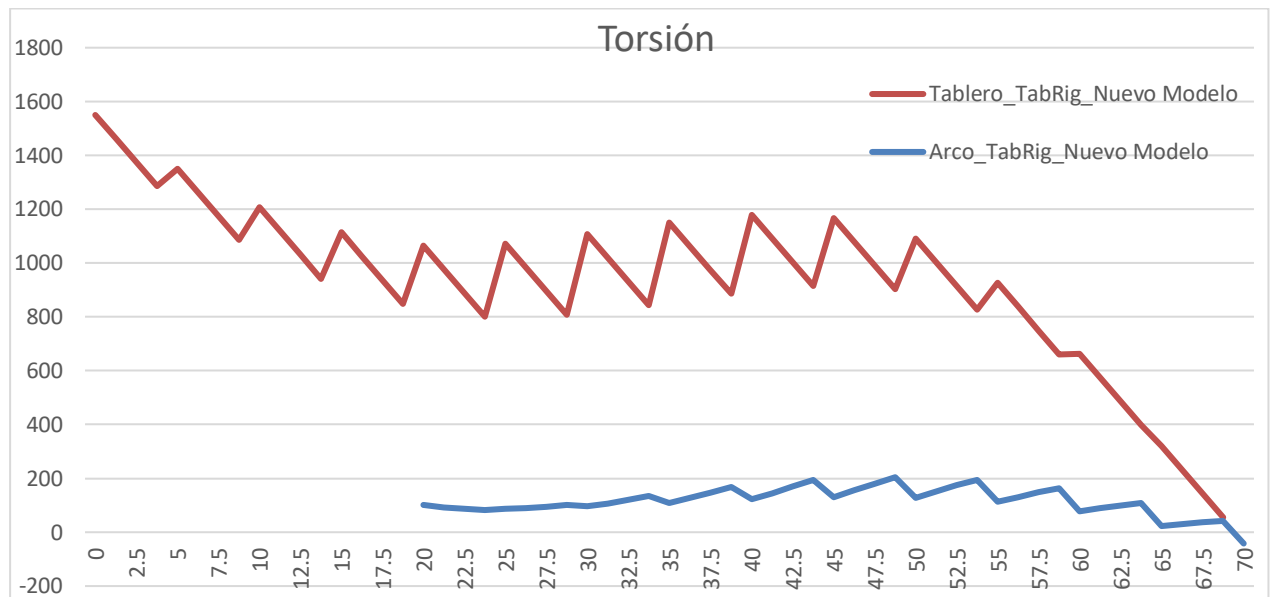


Imagen 27: Momento torsor ante carga excéntrica, rigidez en tablero

- Cortantes transversales:

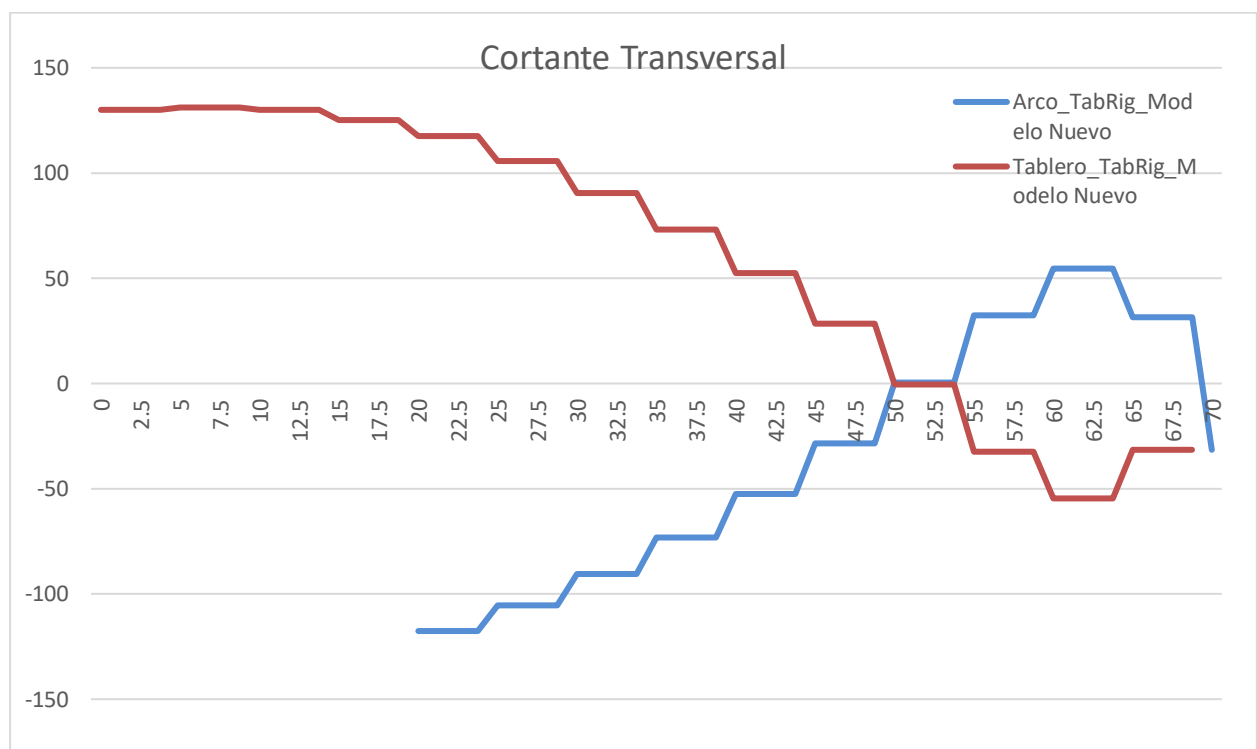


Imagen 28: Cortante transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero

Carga transversal

- Desplazamientos transversales:

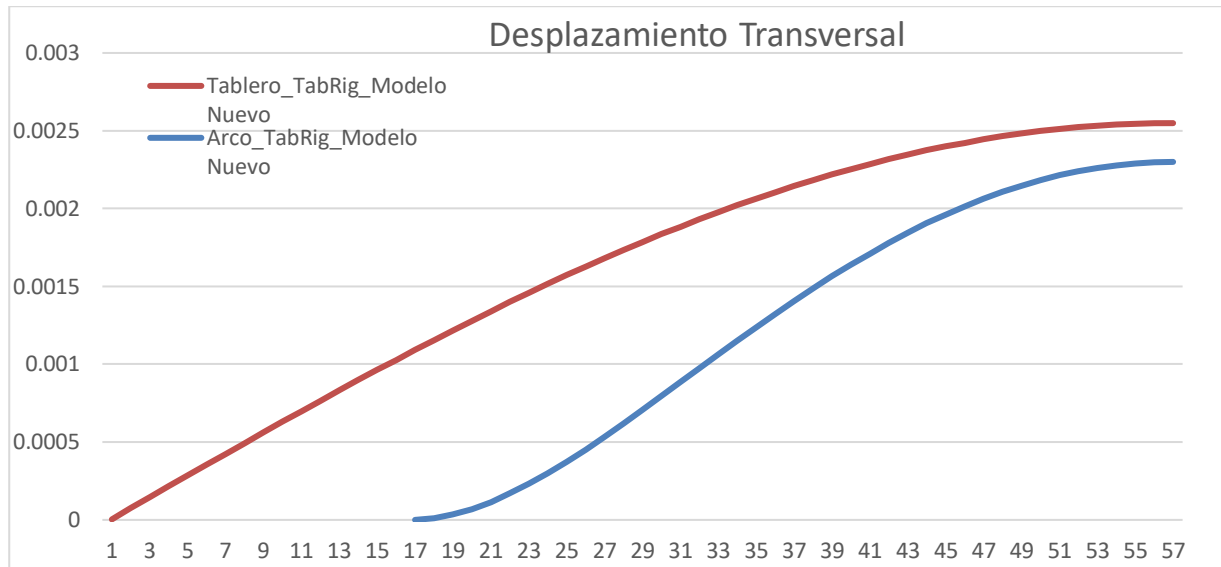


Imagen 29: Desplazamiento transversal ante carga transversal, rigidez en tablero

- Momentos torsores:

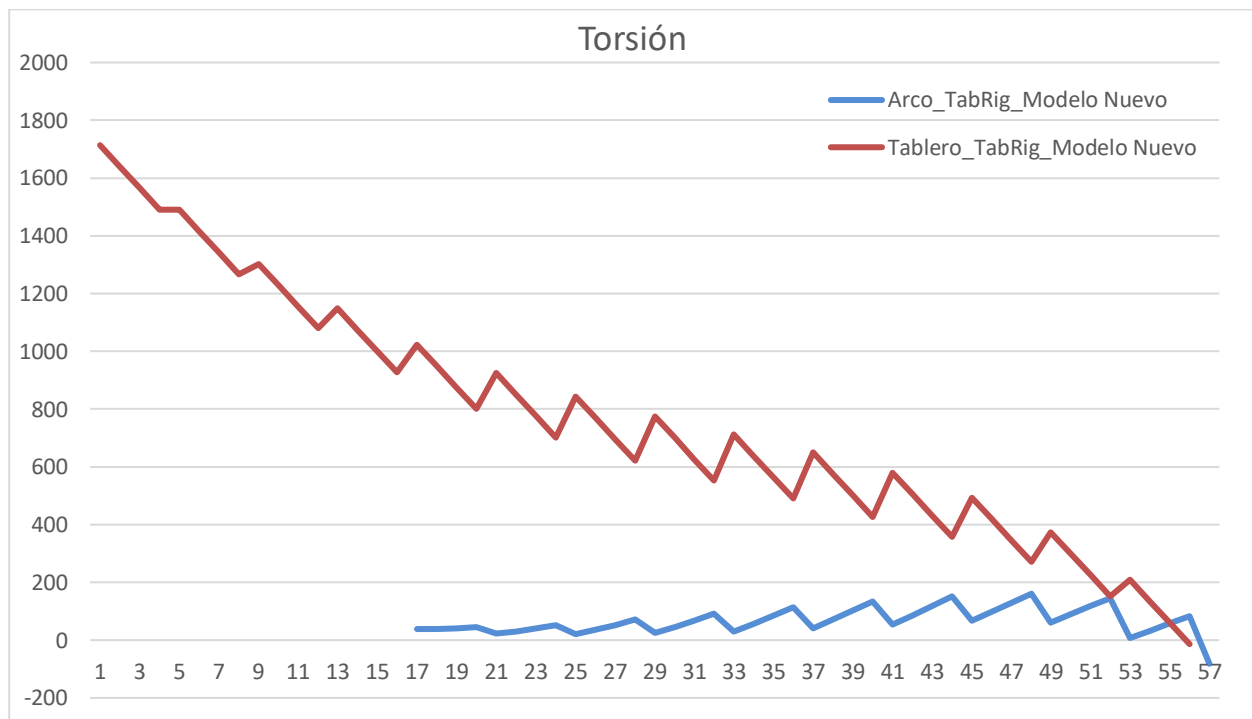


Imagen 30: Momento torsor ante carga transversal, rigidez en tablero

- Cortantes transversales:

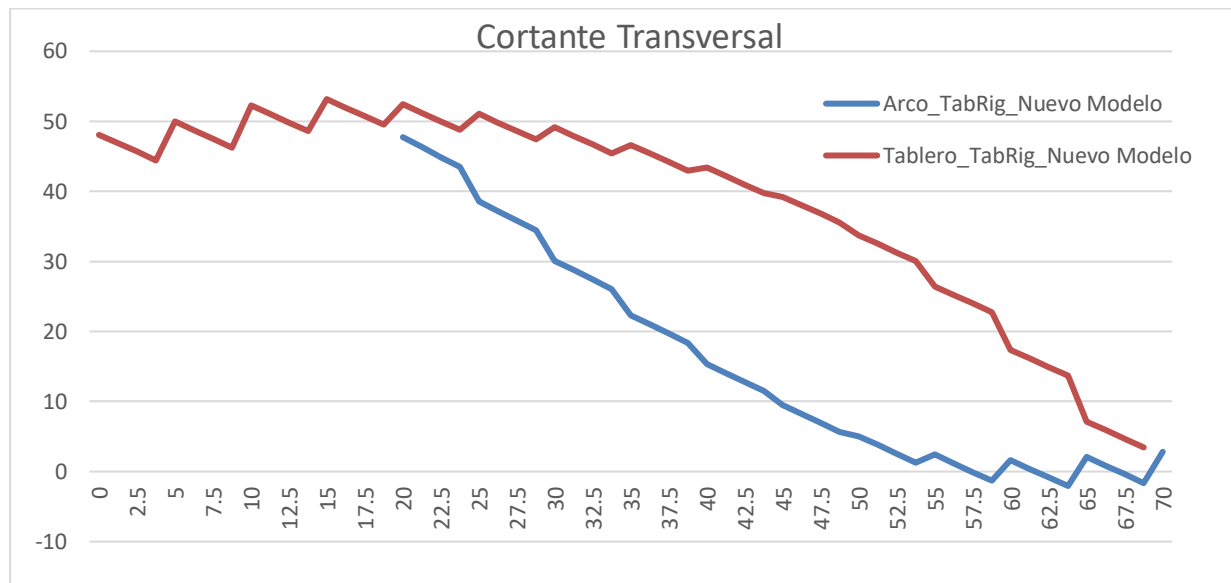


Imagen 31: Cortante transversal ante carga transversal, rigidez en tablero

- Flectores transversales:

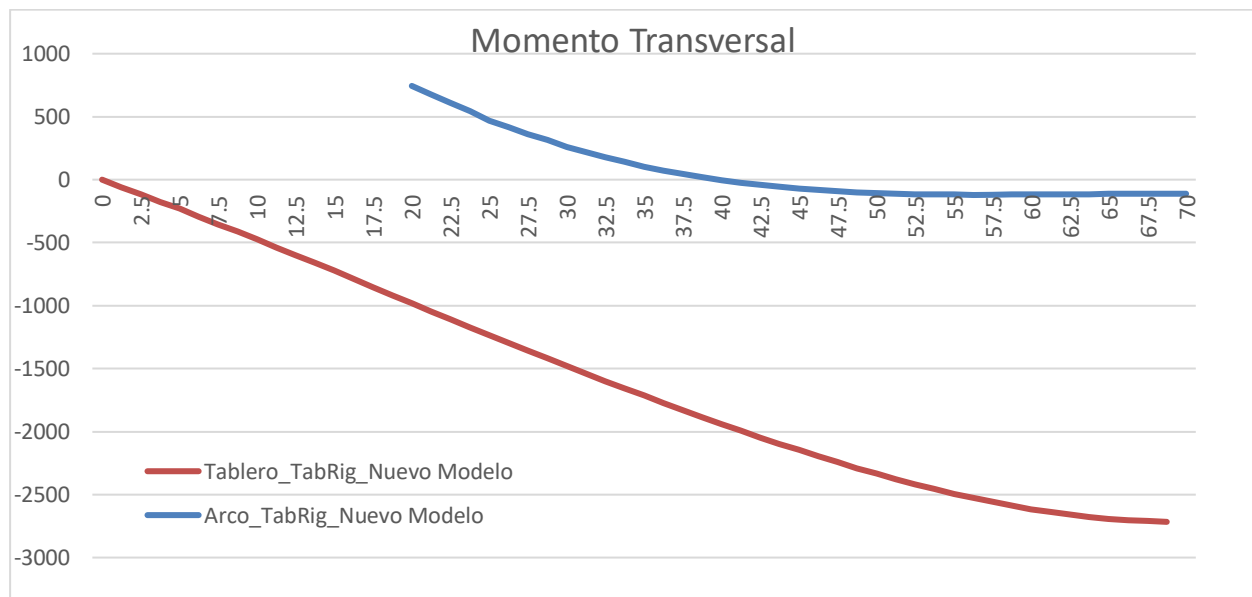


Imagen 32: Momento flector transversal ante carga transversal, rigidez en tablero

2.5.3. Análisis de resultados

El estudio que planteó J. Manterola [1] sobre la relación arco-tablero bajo cargas excéntricas y transversales nos va a ayudar a entender un poco más sobre el comportamiento del puente arco, que es lo que se va a analizar en todo este proyecto.

Carga excéntrica

J. Manterola [1] realizó el estudio con un puente arco donde la rigidez a torsión predominaba en el arco, pero en este caso ambos modelos tienen localizados la rigidez a torsión en el tablero, por lo tanto, se va a explicar a continuación cómo llegamos a las conclusiones que se llega en los siguientes análisis.

Como bien desarrollaba J. Manterola [1] y exponía A. Domínguez [4], la disposición de pilares con una

separación de 5 metros proporciona una elevada rigidez al cajón del arco, lo que permite simplificar el análisis considerando únicamente la acción torsional inducida por cargas actuando de forma asimétrica, es decir, aplicadas sobre una sola mitad transversal del tablero. Así, el estudio se centra en el comportamiento torsional longitudinal del conjunto arco-tablero.

La respuesta estructural frente a esta acción torsora externa se traduce en un sistema de pares de fuerzas cortantes en sentido transversal que actúan sobre el arco y el tablero, acompañados de sendos momentos de torsión aplicados en ambos elementos. La magnitud de estas sollicitaciones dependerá de la rigidez relativa entre el arco y el tablero, lo que requiere conocer con precisión las condiciones de apoyo en los extremos —pilas fuera del arco y estribos— así como la forma en que el arco está vinculado en sus apoyos y su rigidez transversal. Estos factores condicionan tanto las fuerzas como los momentos desarrollados.

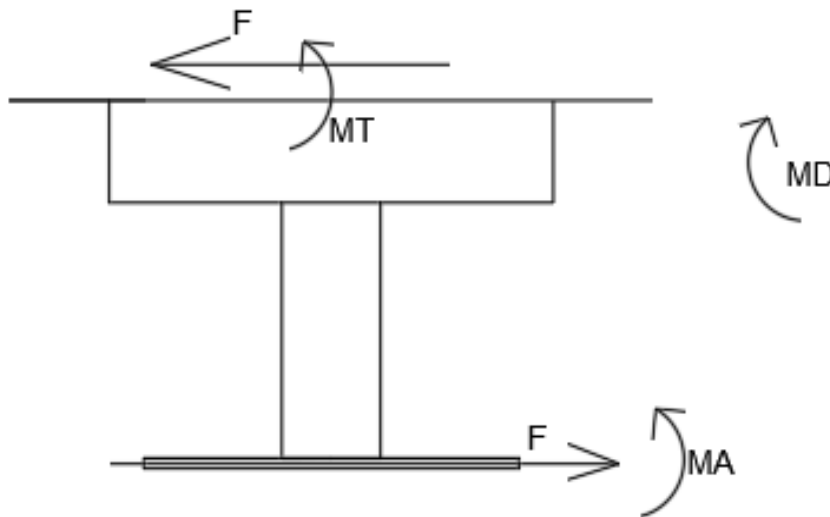


Imagen 33: Sollicitación torsora y sistema de par de fuerzas, rigidez torsora predominante en el tablero

En las gráficas que se muestran en el punto “2.5.2 Resultados: rigidez a torsión predominante en el dintel en el nuevo modelo” confirman que el tablero soporta momentos torsores significativamente mayores que los registrados en el arco. Esta distribución de esfuerzos se debe al comportamiento particular del sistema, originado por la notable diferencia de rigidez entre ambos elementos (siendo el tablero considerablemente más rígido que el arco) y por la variación progresiva de la altura de los pilares desde su base hasta la clave del arco.

Los esfuerzos cortantes transversales que se generan en el arco y el tablero son iguales en magnitud, pero de sentido opuesto, formando así el par torsor característico entre estos dos elementos. Se aprecia un cambio de signo en estos cortantes alrededor del primer cuarto de luz del arco, lo cual indica que tanto el arco como el tablero giran hacia el lado donde actúa la carga excéntrica, desplazándose en la misma dirección. A medida que los pilares se reducen en altura hacia la clave, es necesario que los esfuerzos transversales se inviertan para que el tablero pueda acompañar los desplazamientos laterales del arco en las zonas próximas al centro del vano.

Este comportamiento se confirma al analizar los diagramas de desplazamientos transversales y de momento transversal. En las proximidades de los arranques, la curvatura del arco y del tablero presenta signos opuestos, en coherencia con el mecanismo estructural ilustrado. Hacia el centro del vano, las fuerzas asociadas al par torsor cambian de signo, lo que genera un rápido incremento del momento de torsión, ya que debe absorber tanto la torsión externa como la inducida por los cortantes. Una vez que se produce la inversión de esfuerzos transversales en los cuartos de luz, contrarrestando el torsor externo, el momento torsor en el tablero deja de incrementarse. Este mecanismo es altamente eficiente: aproximadamente el 72% de la sollicitación torsora total es resistido mediante el par de cortantes, mientras que el 28% restante se transmite como torsión directamente al tablero.

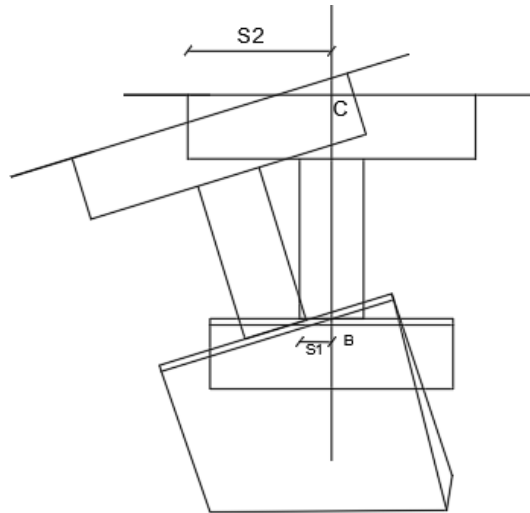


Imagen 34: Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica [1]

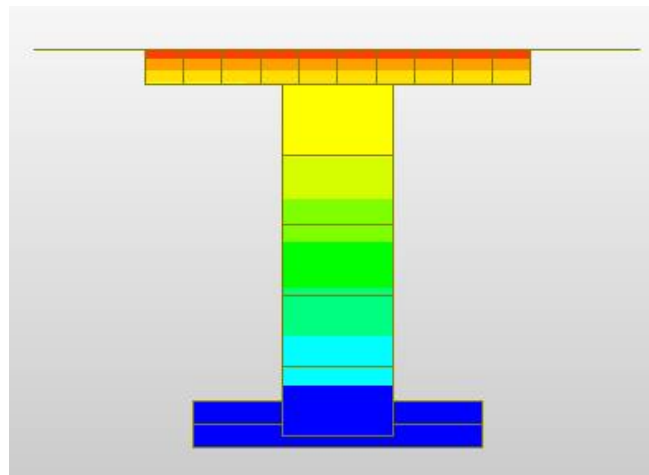


Imagen 35: Efecto generado en la estructura por la carga excéntrica (Modelo MIDAS CIVIL [4])

Carga transversal

La acción transversal debida al viento puede descomponerse en dos efectos estructurales principales: una sollicitación transversal directa y una sollicitación de tipo torsional.

Los esfuerzos cortantes que aparecen tanto en el arco como en el tablero resultan de la superposición de ambos efectos. En el caso de la sollicitación transversal pura, se genera una respuesta simétrica en ambos elementos estructurales. Analizando los diagramas de momento torsor, donde se observa que, bajo la acción de dicho par, la torsión inducida en el arco es mínima.

Si se examina el comportamiento frente a la flexión transversal, se aprecia un fenómeno análogo. La reducción de la carga transversal que el arco absorbe —debido a su contribución a la resistencia torsional frente a la carga externa— provoca que las deformaciones por flexión en él sean muy reducidas. Por el contrario, el dintel o tablero, que asume una mayor parte de la sollicitación directa, presenta valores de flexión transversal significativamente más elevados.

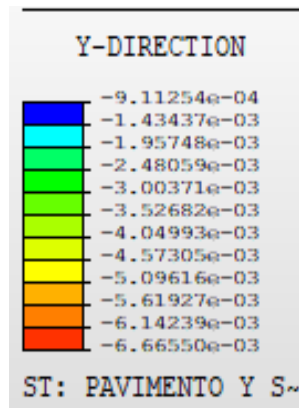
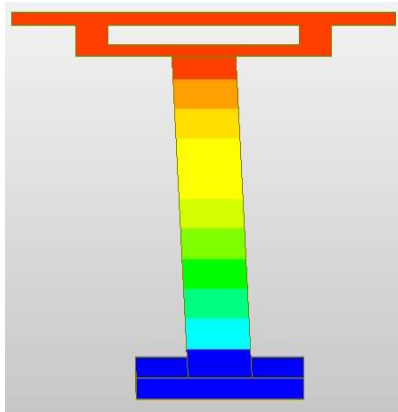
2.5.4. Análisis comparativo de los resultados de ambos modelos

En este apartado se va a explicar los resultados obtenidos en el modelo que predomina la rigidez en el dintel.

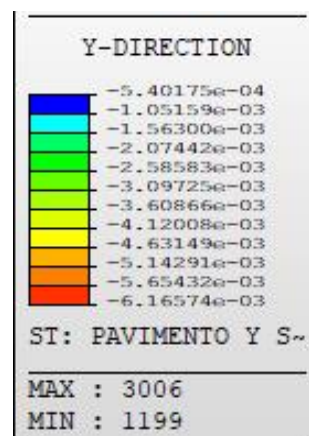
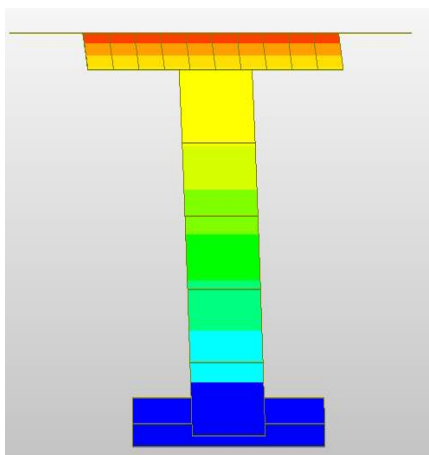
2.5.4.1. Carga excéntrica

- Desplazamientos transversales

- Modelo previo



- Modelo nuevo



En estas imágenes se puede apreciar los desplazamientos transversales que experimenta el modelo previo y el nuevo modelo, en la misma coordenada que lo estudió Antonio [4], en $X = 98.75\text{m}$. A simple vista, se aprecia que hay algunos cambios en los desplazamientos transversales, en el caso del modelo con sección placa está mejor analizado por el hecho de estar mejor discretizado, y podemos ver que prácticamente en el tablero hay mucho menos desplazamientos, solo una parte de la sección superior donde se encuentran los valores máximos y aun así son menores que los que experimenta en el primer modelo, al igual que pasa a lo largo del pilar y finalmente el pilar que une con el arco adquieren unos desplazamientos muchos menores como se puede apreciar en la leyenda. Pero ambos tienen unos valores muy bajos, por los cuales son despreciables los desplazamientos.

Imagen 36: Comparación de efecto generado por carga excéntrica (Sección: $x = 98.75\text{ m}$)

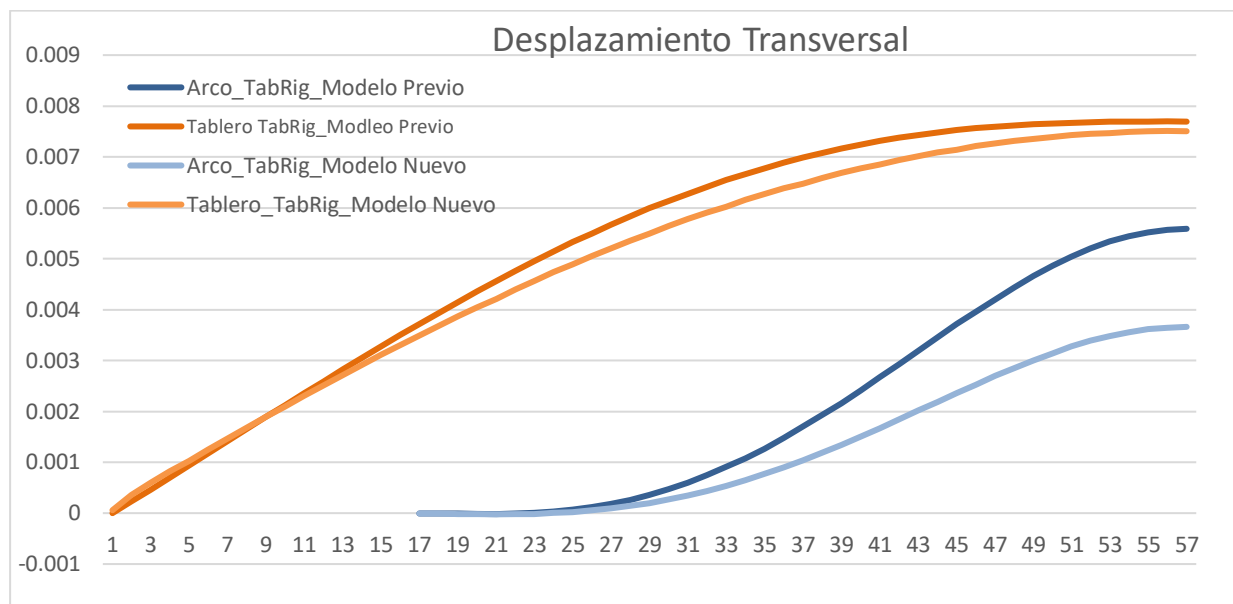


Imagen 37: Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica

- Flectores transversales:

Ambas curvas que se aprecian a continuación presentan un comportamiento similar en cuanto a la evolución del momento transversal, con un descenso progresivo hasta alcanzar un valor mínimo y luego un incremento hacia el extremo opuesto del tablero. El mínimo del momento transversal se encuentra aproximadamente en la misma posición en ambas configuraciones. La curva "Tablero TabRig_Modelo Previo" tiene valores de momento más negativos a lo largo de la mayor parte del tablero, lo que indica una mayor demanda torsional en esa configuración. La curva "Tablero_TabRig_Modelo Nuevo" muestra valores absolutos menores, lo que sugiere que en esta configuración la torsión está mejor distribuida, esto indica que tendrá una mejor distribución de esfuerzos en el sistema estructural y posiblemente una mayor eficiencia en la transmisión de cargas.

Se evidencia que, si bien los desplazamientos transversales en el modelo de placas son aproximadamente un 9 % inferiores, los esfuerzos máximos se reducen en más de un 30 %. Este comportamiento sugiere una mayor flexibilidad estructural del modelo de placas en comparación con el modelo de barras sometidas a flexión. La diferencia puede atribuirse, en parte, a la consideración de la deformación por cortante y a la mayor capacidad de deformación de la sección transversal, efectos que no son capturados en el modelo de barras. Esta observación permite anticipar una mayor influencia de los efectos torsionales en el modelo de placas.

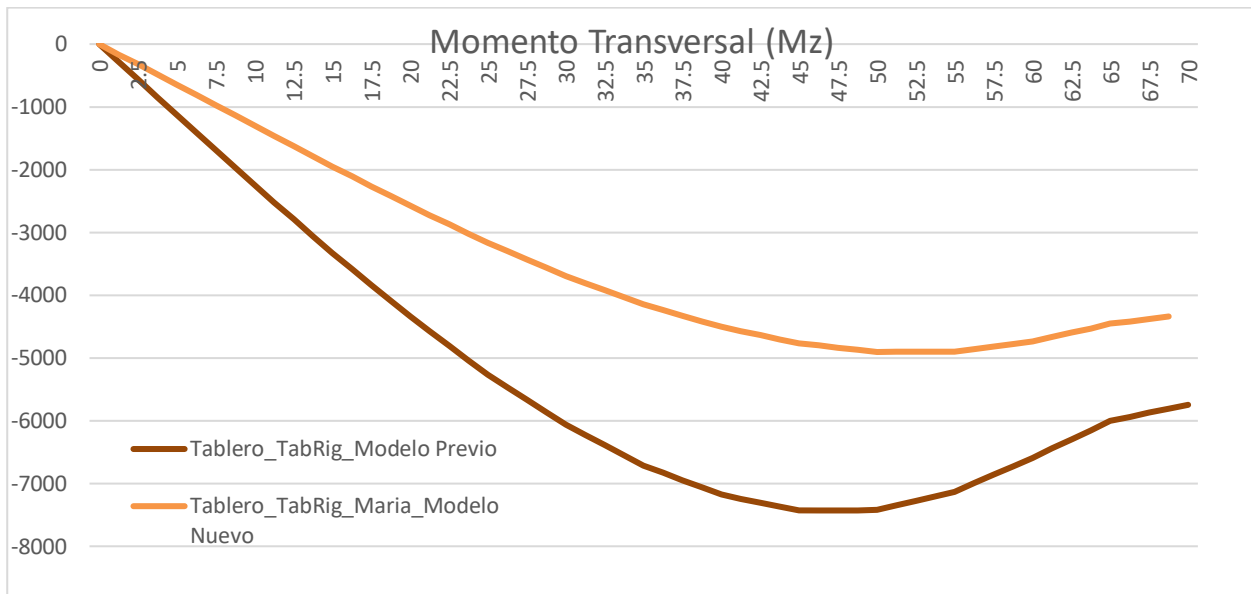


Imagen 38: Comparación de Momentos Transversal en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica

Las siguientes curvas representan el momento transversal que tiene el arco cuando la rigidez predomina en el dintel. Nuevamente, se puede apreciar que en el modelo nuevo su arco percibe valores inferiores, lo que sugiere una distribución más uniforme de cargas o una menor rigidez relativa en el sistema. Sin embargo, el modelo previo experimenta mayores esfuerzos transversales, lo que podría implicar una mayor demanda estructural en el arco. La reflexión tiene que ver con el reparto de la torsión entre los dos mecanismos, par de fuerzas, torsión en el elemento rígido a torsión, por eso se observa que el par de fuerzas tiene una mayor relevancia en el modelo previo, lo que explica el incremento de los momentos flectores transversales, tanto en el arco como en el dintel. Esta diferencia pone de manifiesto cómo la formulación del modelo influye en la distribución de esfuerzos internos, especialmente en lo relativo a la flexión transversal (se apreciará mejor en la gráfica de curvas de cortante).

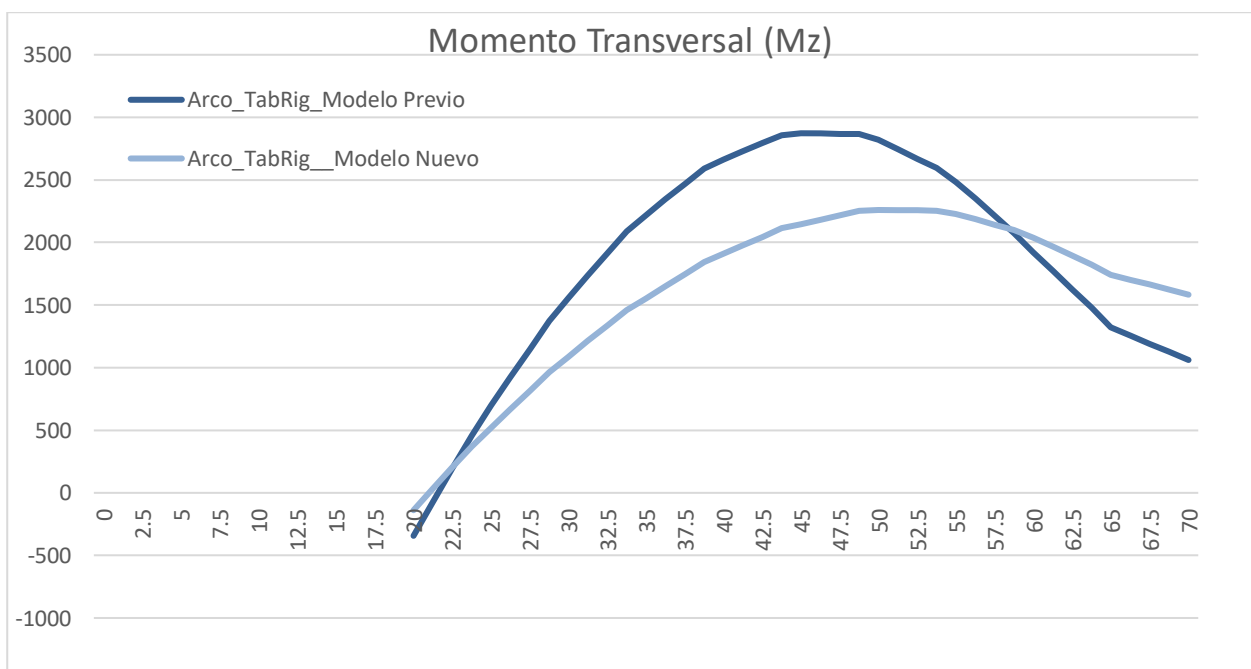


Imagen 39: Comparación de Momentos Transversal en el arco según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica

- Momentos torsores:

Como bien explicó mi compañero, el momento torsor se produce debido a la carga excéntrica que hay sobre el tablero, por lo que se forma dicho momento en el tablero y es absorbida mayoritariamente por éste y no requiere del paso pilar-arco, reduciéndose así el dentado de las leyes de torsión en el arco.

En primer lugar, ambas curvas que tratan del tablero tienen en común una tendencia descendente a lo largo de éste, lo que indica que la torsión disminuye progresivamente en ambas configuraciones. La configuración "Tablero_TabRig_Modelo Nuevo" los valores de momento torsor son superiores a los de "Tablero_TabRig_Modelo Previo" en la mayoría del tablero, especialmente en la zona inicial del tablero, es decir, en los extremos donde se encuentran los estribos. En la mitad del tablero, ambas curvas convergen a valores cercanos a cero, indicando una disipación progresiva de la torsión. Un punto a destacar es que la curva de Antonio tiene unos picos y valles más pronunciados, lo que da a entender que tiene una mayor variabilidad en la torsión a lo largo del tablero. En cambio, la curva de María los cambios en la torsión son más uniformes, lo que podría indicar una mejor distribución de esfuerzos torsionales en el tablero.

El punto donde coinciden las cuatro curvas representa un instante crítico en la interacción entre el arco y el tablero, donde la torsión está en equilibrio y se redistribuye entre los elementos estructurales (arco, pilar, tablero) aunque la mayor parte se lo lleve el tablero ya que tiene la rigidez predominante. Punto de conexión estructural en el que los esfuerzos se reparten de forma más homogénea, lo que sugiere que después de este nodo, los esfuerzos torsionales comienzan a disiparse de manera diferenciada en cada elemento.

Desde el punto de vista comparativo, el análisis de las curvas muestra que "Arco_TabRig_Modelo Previo" experimenta momentos torsionales más elevados y con mayor variabilidad en comparación con "Arco_TabRig_Modelo Nuevo", que presenta oscilaciones más suaves y con valores más bajos. Al igual que sucede en las curvas del tablero, la de "Arco_TabRig_Modelo Previo" tiene un comportamiento torsional más pronunciado y potencialmente más crítico, mientras que "Arco_TabRig_Modelo Nuevo" se aprecia que está mejor distribuido, lo que representa una solución más estable desde el punto de vista de los esfuerzos torsionales en el arco.

Como se ha mencionado, la reflexión principal radica en que el par de fuerzas tiene una menor incidencia en el modelo nuevo. En el modelo previo, dicho par inducía un incremento del momento torsor en las proximidades de la clave, mientras que generaba una reducción del mismo en las zonas de arranque. Esta distribución asimétrica del torsor se traduce en valores más elevados en la clave y menores en los arranques dentro del modelo previo, en contraste con el comportamiento más uniforme que se observa en el modelo nuevo.

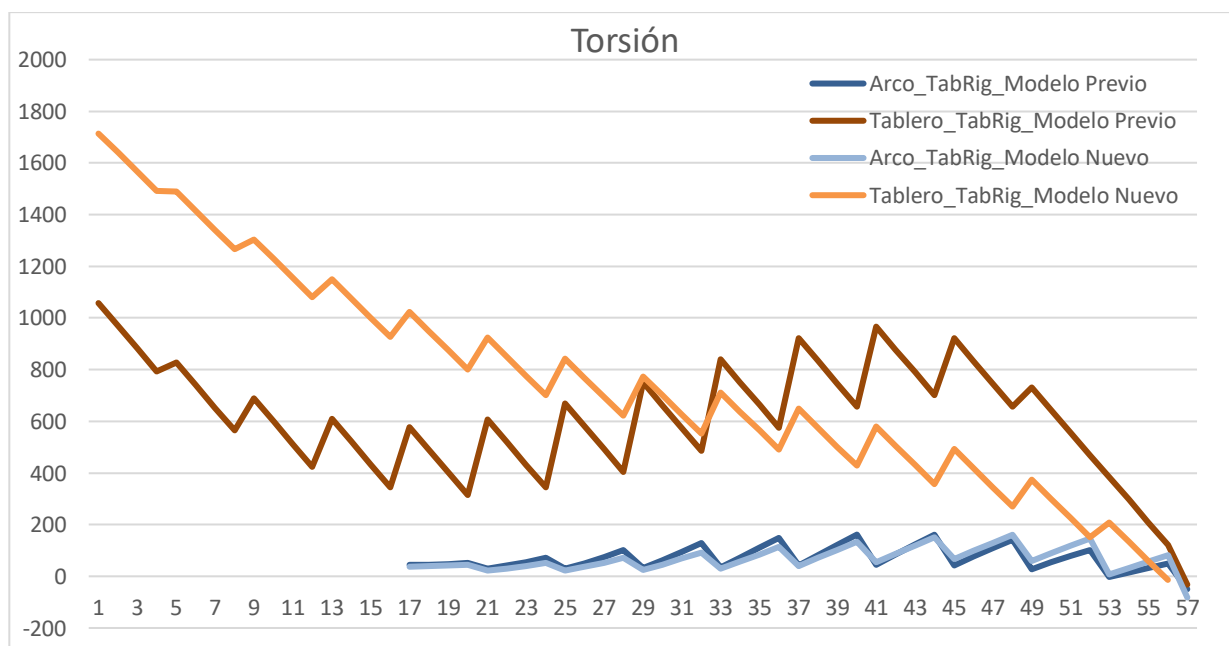


Imagen 40: Comparación de Momento Torsor en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica

- Cortantes transversales:

Esta gráfica representa el cortante transversal en distintos puntos del puente, que a continuación, se va a desarrollar un estudio distinguiendo varias partes:

- Se aprecia que la curva “Tablero_TabRig_Modleo Previo” presenta una tendencia descendente y escalonada, lo que sugiere una distribución de cortante en varios tramos con cambios discretos en los valores. A medida que se avanza en la longitud del tablero, el cortante disminuye, indicando que la estructura va transfiriendo esfuerzos a otros elementos. En cambio, la curva “Tablero_TabRig_Modelo Nuevo” muestra una evolución similar a la curva anterior, pero con valores ligeramente menores. Esto indica que, en la configuración de María, el cortante en el tablero es menor, debido a una mejor distribución de cargas entre el tablero y el arco.
- Como se puede apreciar, las curvas de los arcos tienen un comportamiento opuesto al del tablero, con valores negativos de cortante, que a su vez va aumentando a lo largo del tramo. Su estructura escalonada nos indica que el arco está absorbiendo gran parte del cortante que le transfiere desde el tablero, por ello el arco y el tablero tienen cada vez menos esfuerzo cortante. Nuevamente, la curva “Arco_TabRig_Modelo Nuevo” tiene valores menores que la del “Arco_TabRig_Modelo PRevio”, por lo que tiene mejor distribución de esfuerzos.
- Finalmente, haciendo una comparativa conjunta, se observa que hay un punto de intersección a tres cuartos del tablero, donde la curva del tablero y arco coinciden (cada una con sus respectivas configuraciones). Este punto representa una zona clave de equilibrio estructural, donde la transferencia de esfuerzos entre el tablero y el arco es óptima. Como ya explicado anteriormente, en la parte inicial de la gráfica, el cortante en el tablero es positivo y decreciente, mientras que en el arco es negativo y creciente, lo que confirma que el tablero transfiere esfuerzos al arco. La configuración de "Modelo Nuevo" ofrece una distribución más homogénea, reduciendo los valores de cortantes extremos y mejorando la eficiencia estructural del puente.

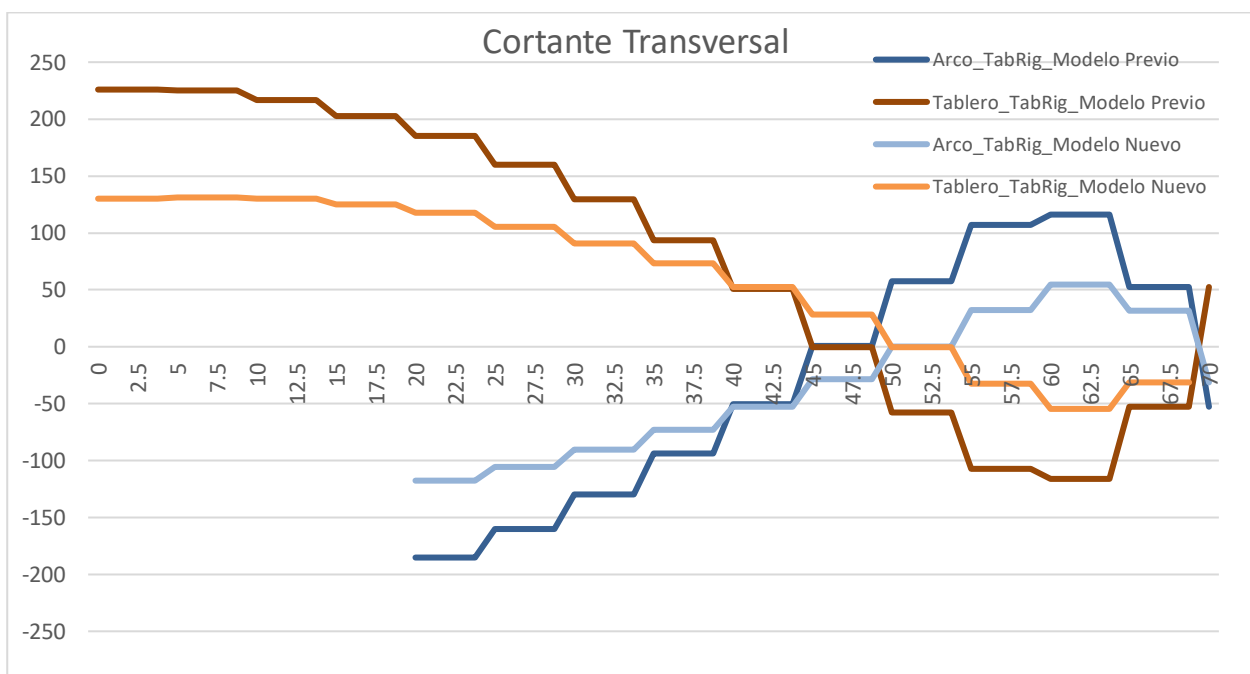


Imagen 41: Comparación de Cortante Transversal en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga excéntrica

2.5.4.2. Carga Transversal

- Desplazamientos transversales:
 - Modelo Previo y Modelo Nuevo, respectivamente

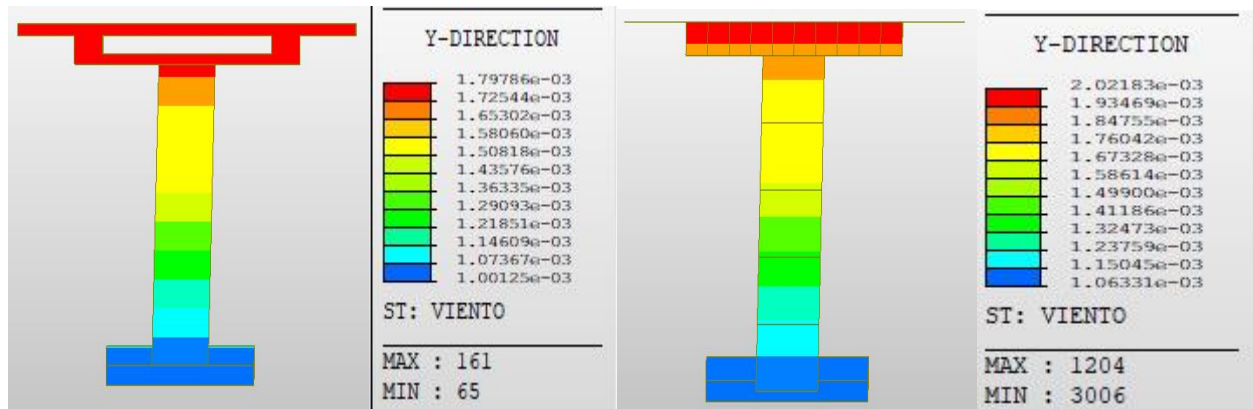


Imagen 42: Comparación de efecto generado por carga transversal (Sección: $x = 98.75$ m)

Nuevamente, como en el caso de carga excéntrica, se ha estudiado los desplazamientos transversales de ambos modelos en el mismo punto que lo realizó Antonio, $X=98.75$ m. Sucede lo mismo, es decir, ambos modelos tienen una rigidez transversal similar, aunque en el caso de “Modelo Nuevo” presenta unos valores superiores, aunque no muy relevante, como bien explicó mi compañero, el caso de carga excéntrica, el conjunto de la estructura es más flexible cuando concentramos la rigidez a torsión en el dintel.

Queda nuevamente evidenciada la mayor flexibilidad del modelo de placas, el cual, al estar sometido a una carga transversal aplicada directamente, presenta deformaciones superiores a las registradas en el modelo de barras.

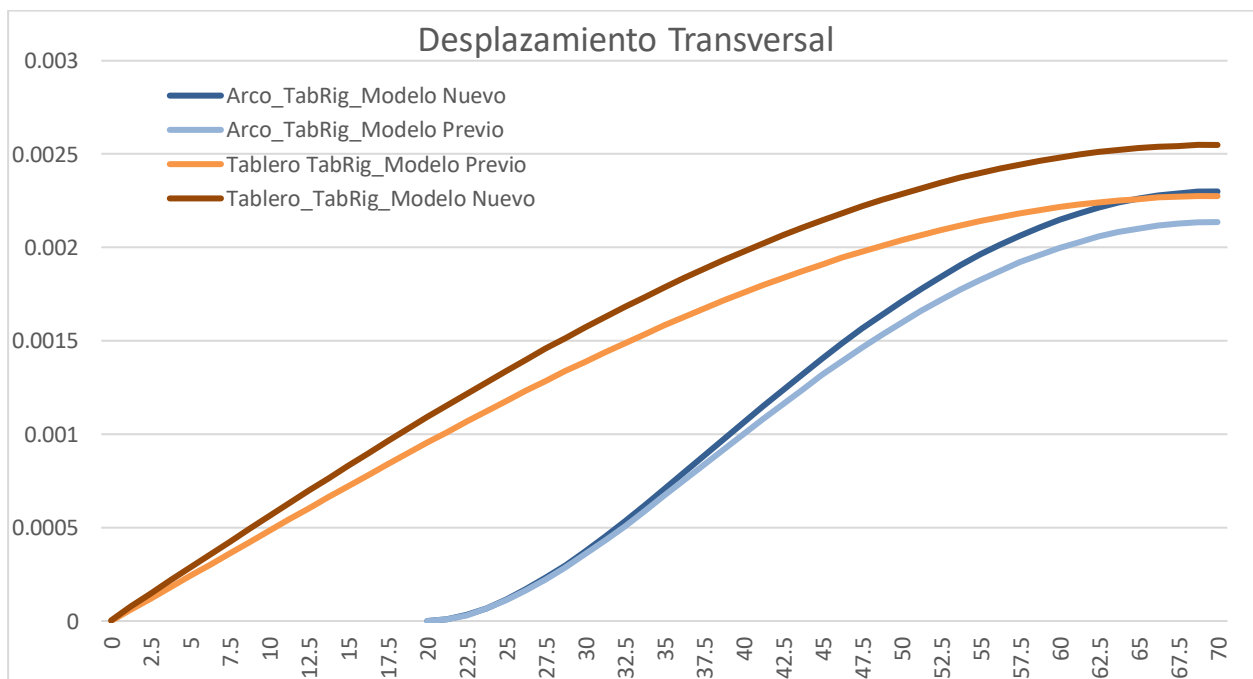


Imagen 43: Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante en el tablero ante carga transversal

- Flectores transversales:

Se aprecia que se mantiene prácticamente constante los momentos transversales tanto en el tablero como en el arco.

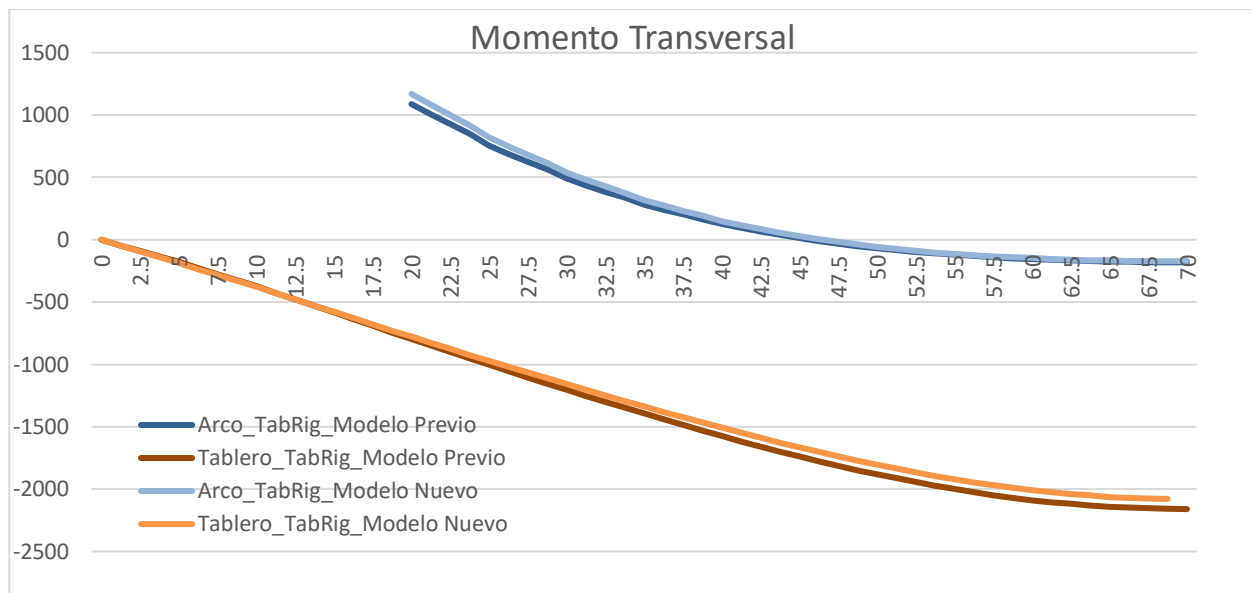


Imagen 44: Comparación de Momentos Transversal con rigidez predominante en el tablero ante carga transversal

- Momentos torsores:

Comparando con la carga excéntrica, la carga de viento induce menos esfuerzos torsionales tanto en el tablero como en el arco. Ambas curvas decrecen progresivamente. La grafica de carga transversal, los esfuerzos torsionales están más distribuidos y uniformes en la estructura, mientras que en la de carga excéntrica los valores en el tablero son más elevados, con un comportamiento oscilatorio más marcado.

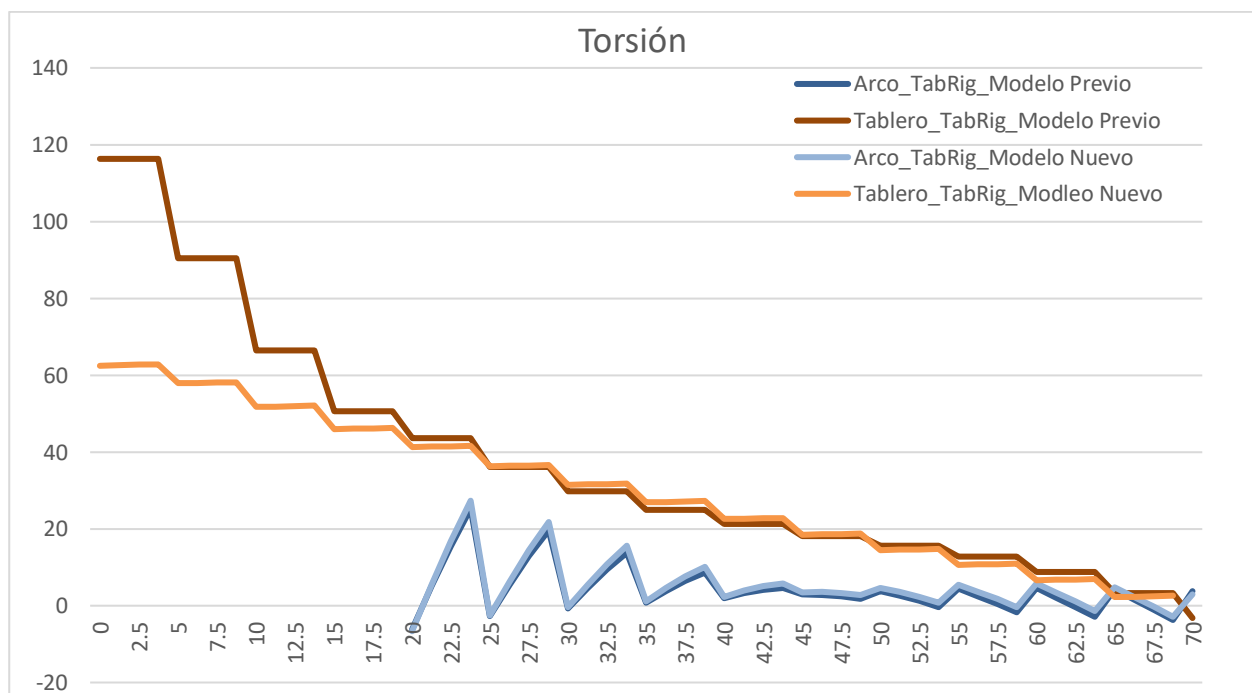


Imagen 45: Comparación de Momento Torsor en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga transversal

- Cortantes transversales:

Seguidamente se va a realizar un estudio de las siguientes curvas producidas por los esfuerzos cortantes provenientes de la carga de viento:

- Ambas curvas del tablero son prácticamente idénticas, lo que indica que la variación de rigidez tiene un impacto mínimo en el cortante transversal del tablero bajo carga de viento. Presentan una tendencia decreciente y finalmente se observan pequeñas oscilaciones en el inicio, lo que sugiere que hay fluctuaciones locales en la distribución del esfuerzo.
- El esfuerzo cortante en el arco es mayor que en el tablero. A medida que avanza la estructura, las curvas del arco descienden más rápidamente en comparación con las del tablero. Se puede observar que se produce una intersección alrededor del punto 27-29, lo que indica que a partir de este punto el tablero comienza a absorber mayor parte del cortante transversal en comparación con el arco.

Y se confirma, aumenta un poco el cortante en el arco por la mayor flexibilidad del modelo de placas, y en consecuencia la deformación transversal en el arco

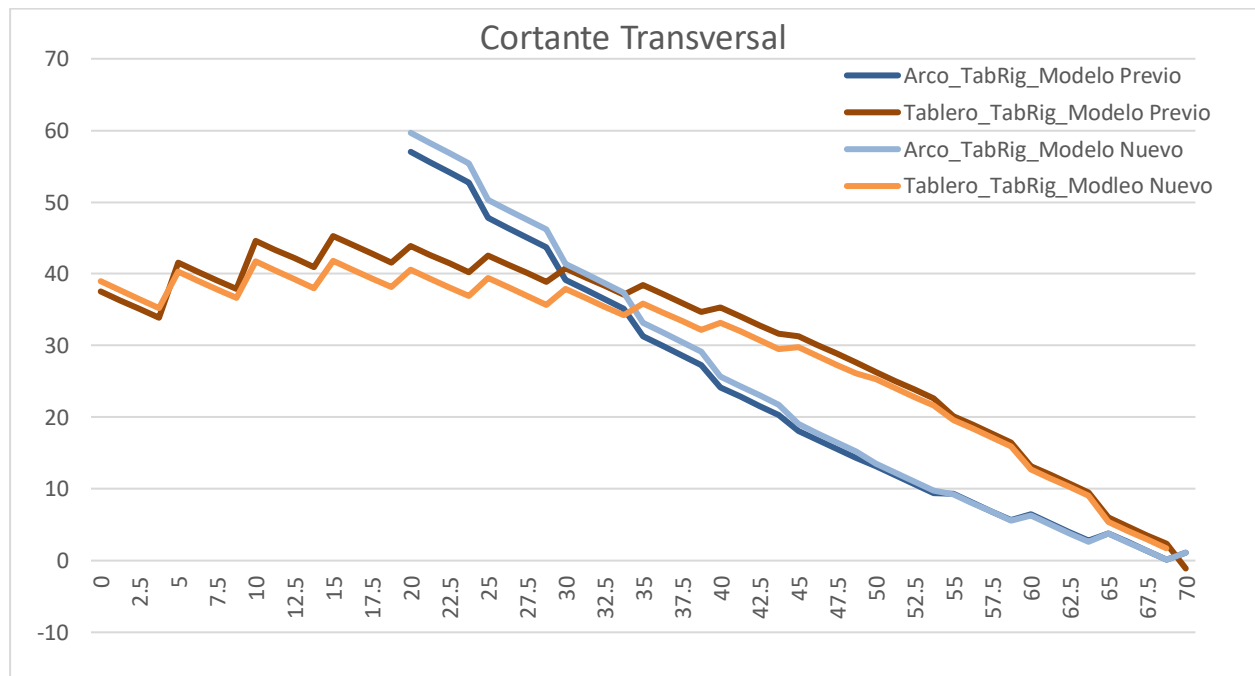


Imagen 46: Comparación de Cortante Transversal en el tablero según rigidez predominante en el tablero ante carga transversal

2.6. Conclusiones

Derivado del estudio desarrollado, se extraen las siguientes conclusiones:

- Misma estructura modelizada con modelo de barras o con modelo de placas, en esta estructura se está viendo que es más flexible el modelo nuevo que en el otro modelo que se había previsto. Y esto se ve claro cuando se ve en los desplazamientos y deformaciones. El modelo de placas es más preciso que el modelo de barras. ¿Es muy relevante eso en una estructura con estas características? Al principio parecía que no, pero se comprueba que tiene una cierta relevancia.
- El par de fuerzas es más relevante en el modelo previo, que era más rígido y por eso los flectores transversales son mayores tanto en el arco como en el dintel.
- Si el tablero es más flexible, los cortantes son menores y si estos son más pequeños el torsor es mayor.
- El par de fuerzas es más relevante en el modelo previo donde es más rígido y por eso los flectores transversales son mayores tanto en el arco como en el dintel.

3 INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ A TORSIÓN DE ARCO Y TABLERO

En este apartado se va a desempeñar el mismo estudio que realizó mi compañero Antonio [4], la comparativa del comportamiento del puente cuando la rigidez a torsión predomina en el arco (Modelo de J. Manterola [1]) con otro modelo donde en éste la rigidez a torsión predomina en el tablero. Este modelo es con secciones nuevas, con unas características específicas, diferentes a la de Antonio que se definirán a continuación. Ambos modelos están ejecutados con el software MIDAS Civil [3].

Se conserva lo que comentó Antonio [4], que las nuevas secciones del puente mantienen la rigidez conjunta aproximada a la de J. Manterola [1], por lo que se ha tenido que mantener constante la relación entre inercias de las secciones de arco y tablero y conservando constante el área de las secciones.

Se ha decidido proceder nuevamente este análisis debido a que las secciones elegidas por A. Domínguez [4] se basaron en que la rigidez conjunta sea aproximadamente la misma al modelo de J. Manterola [1], y esto lo consiguió manteniendo constante la relación entre inercias de las secciones de arco y tablero y manteniendo constante el área de las secciones. En este estudio se ha prestado mayor atención y se ha sido más minucioso en el proceso de definición de las secciones.

Las nuevas secciones tendrán como objetivo tener un área y una inercia respecto al eje X concretas (sección arco), apoyándonos en las secciones definidas por J. Manterola [1] y en la sección del tablero sucede lo mismo, pero en los parámetros de inercias respecto el eje X y Z.

3.1 Cálculo de secciones

Se mantiene el valor de la relación entre rigideces a torsión entre arco y dintel, donde estos valores son sacados del software MIDAS Civil [3].

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

Como en las nuevas secciones la rigidez a torsión se encuentra en el tablero, se va a invertir la relación anterior, y como explicó mi compañero, al realizar este cambio, la sección del tablero será tipo cajón y la del arco será sección rectangular llena.

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

A continuación, se muestran unas tablas donde especifican las características de las secciones en ambos casos, tanto en la rigidez predominante en el arco como en el tablero. En este caso, el objetivo de las nuevas secciones es que tuviera las siguientes peculiaridades (basándonos en algunos aspectos del modelo original (de J. Manterola), rigidez predominante en el arco):

- Buscamos una sección del arco con 2.28 m² de área, I_{xx} = 0.25 m⁴, y una I_{zz} lo más parecida a 5.2 m⁴ posible. Pero lo importante son A e I_{xx}.
- En el tablero queremos que I_{xx} sea 2.5 m⁴ (esto es lo más importante), I_{zz} = 57 m⁴. El área e I_{yy} son menos importantes, pero buscamos que sean 4.8 m² y 0.06 m⁴ (esto último es poco menos que imposible), luego olvídate de I_{yy}.

- **Arco**
 - Área = 2.28 m²
 - I_{xx} = 0.25 m⁴
- **Tablero**
 - I_{xx} = 2.5 m⁴
 - I_{zz} = 57 m⁴

Rigidez predominante en el Tablero			
	Arco	Tablero	
Área	2.280E+00	6.945E+00	m ²
Asy	1.900E+00	5.765E+00	m ²
Asz	1.900E+00	2.444E-01	m ²
I _{xx}	2.464E-01	2.535E+00	m ⁴
I _{yy}	6.840E-02	8.448E-01	m ⁴
I _{zz}	2.744E+00	5.719E+01	m ⁴

Rigidez predominante en el Arco			
	Arco	Tablero	
Área	2.280E+00	4.800E+00	m ²
Asy	1.800E+00	4.000E+00	m ²
Asz	6.400E-01	4.000E+00	m ²
I _{xx}	2.540E+00	2.510E-01	m ⁴
I _{yy}	9.460E-01	6.400E-02	m ⁴
I _{zz}	5.260E+00	5.760E+01	m ⁴

Tabla 1: Características de las secciones

Para conseguir estos valores, se ha ejecutado en primer lugar un modelo en MIDAS Civil [3] con sección viga cajón en el tablero, en la cual se ha diseñado de tal manera que tengan las características específicas anteriores, para luego hacer un segundo modelo en la cual el tablero del puente nuevamente será proyectado con sección tipo placa y éste será nuestro modelo de estudio.

a) Sección viga cajón del tablero

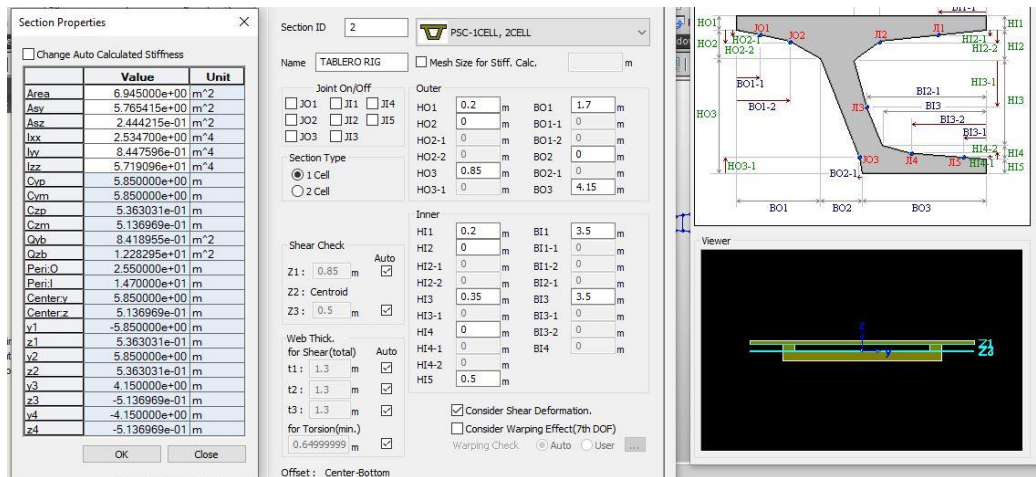


Imagen 47: Sección Viga cajón del tablero del Modelo Nuevo

b) Sección del arco

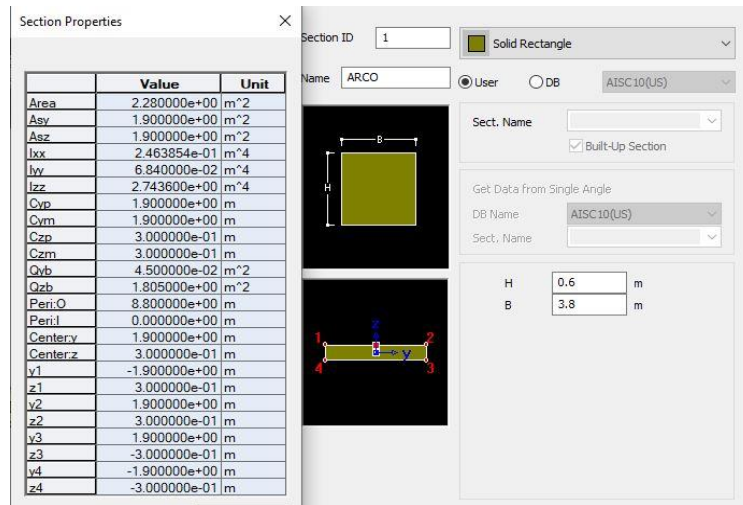


Imagen 48: Sección Arco del Modelo Nuevo

Seguidamente, se va a mostrar una imagen de cómo es la nueva sección del puente y acotada. Lo único que se mantiene constante del modelo de Antonio es la sección de los pilares, que son 0.2x2 metros y su longitud varía a lo largo del arco (en la Imagen su longitud es de 4 metros).

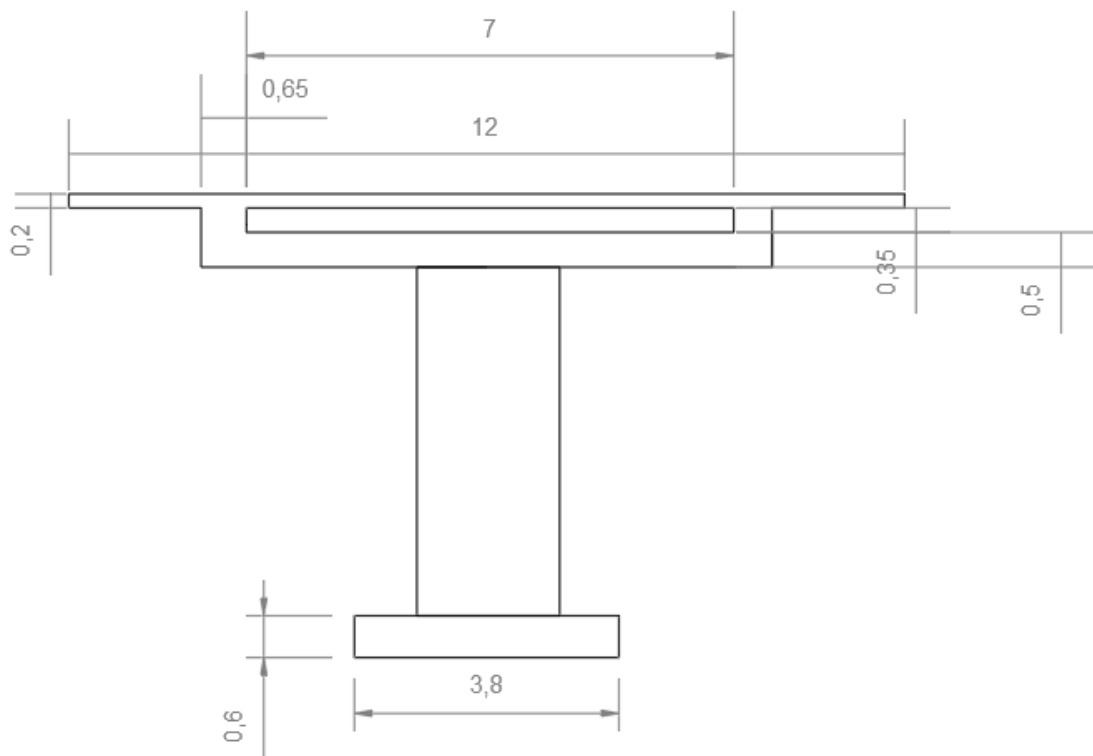


Imagen 49: Sección transversal del puente con rigidez a torsión predominante en tablero, Modelo Nuevo

3.2 Modelo de J. Manterola

El modelo de J. Manterola, como ya comentado anteriormente, la rigidez a torsión predominaba en el arco y como recordatorio, se va a mostrar la geometría de las secciones, sus cargas y resultados de su modelo de para

que a la hora de la comparación sea más fácil.

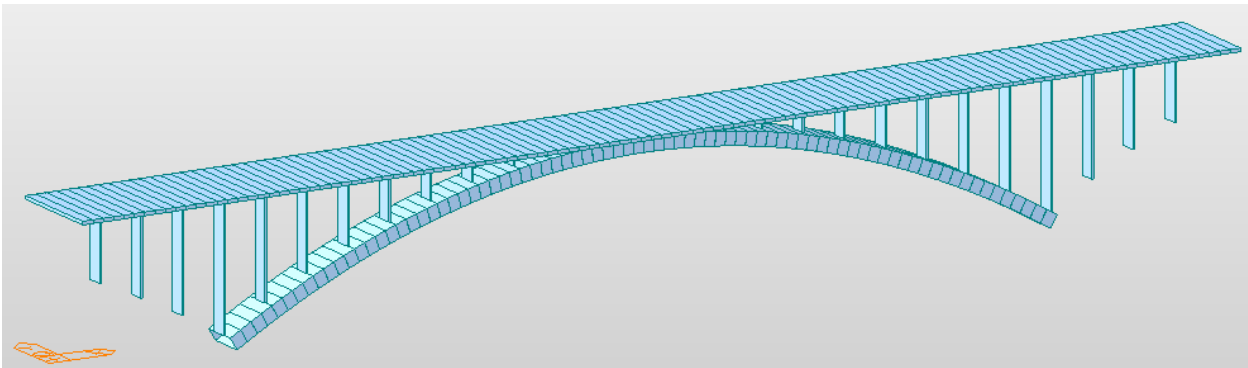


Imagen 50: Vista en perspectiva de la estructura

3.2.1 Secciones transversales

Estudio de J. Manterola:

- Tablero: sección rectangular de 12m x 0.4m
- Arco: sección rectangular hueca, con dimensiones de 4.5mx1.6m y con espesor de 0.2m.
- Pilares: la sección no varía al llegar al tablero, se ha usado una sección rectangular constante de 2m x 0.2m.

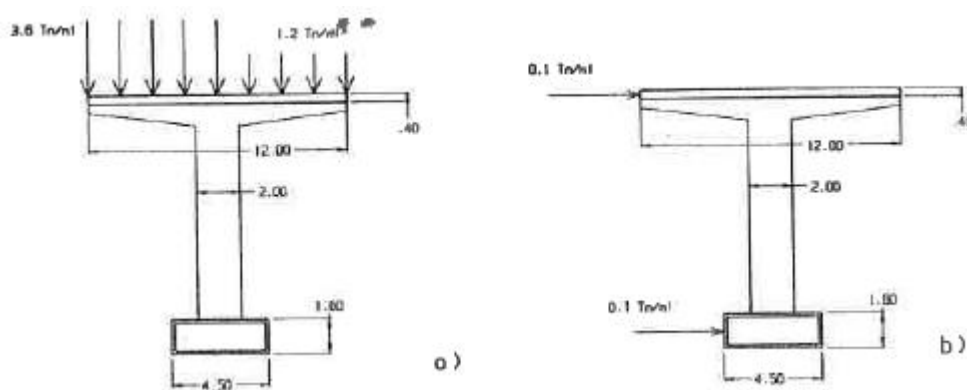


Imagen 51: Sección tipo, modelo de J. Manterola

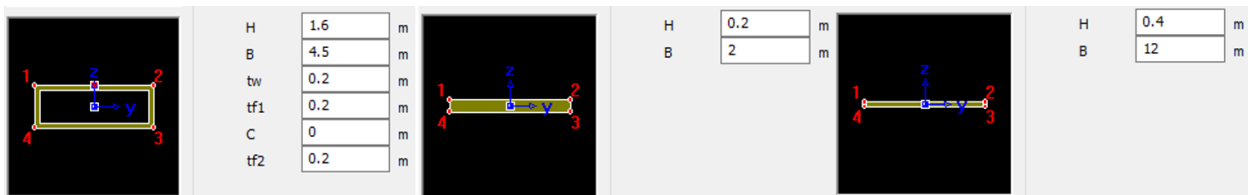


Imagen 52: Secciones tipo, modelo propuesto (arco, pilares y tablero)

3.2.2 Materiales

Mismo material mostrado en el apartado 2.2. *Materiales*.

3.2.3 Apoyos y condiciones de contorno

Mismas condiciones mostrado en el apartado 2.3. *Apoyos y condiciones de contorno*.

3.2.4 Cargas

Las cargas son las mismas que en el apartado 2.4. *Cargas*, ya que las que se ha utilizado en todo momento son

las que definió J. Manterola en su estudio, donde distinguimos dos casos de carga:

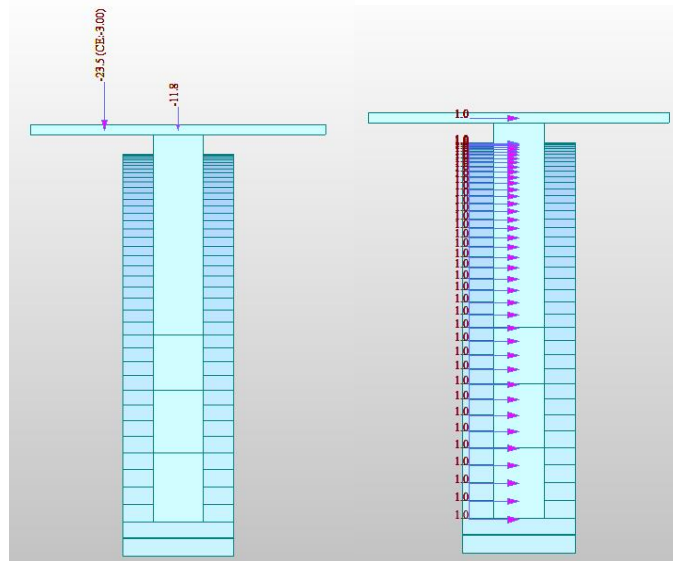


Imagen 53: Carga excéntrica y transversal

3.2.5 Resultados

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos por J. Manterola en su estudio en comparación con los que obtuvo Antonio durante el desarrollo del trabajo con el software MIDAS Civil [3]. Dichas graficas pertenecen al modelo donde predomina la rigidez del arco sobre la del dintel.

La solución del estudio de J. Manterola han sido tomados del libro: *Puentes II: Apuntes para su diseño y construcción*, pags. 960 y 962 [1].

Carga excéntrica:

- Flechas transversales:

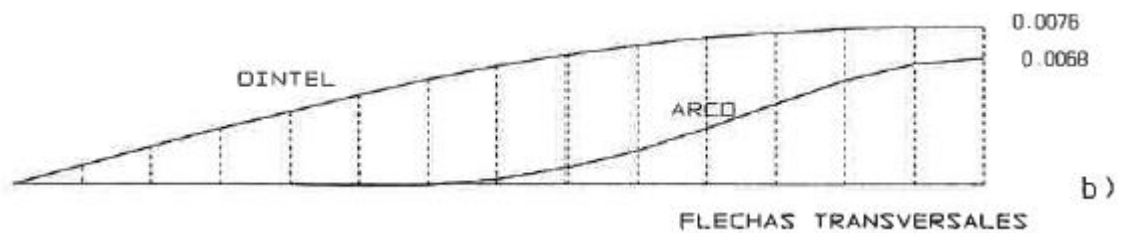


Imagen 54: Flecha transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola

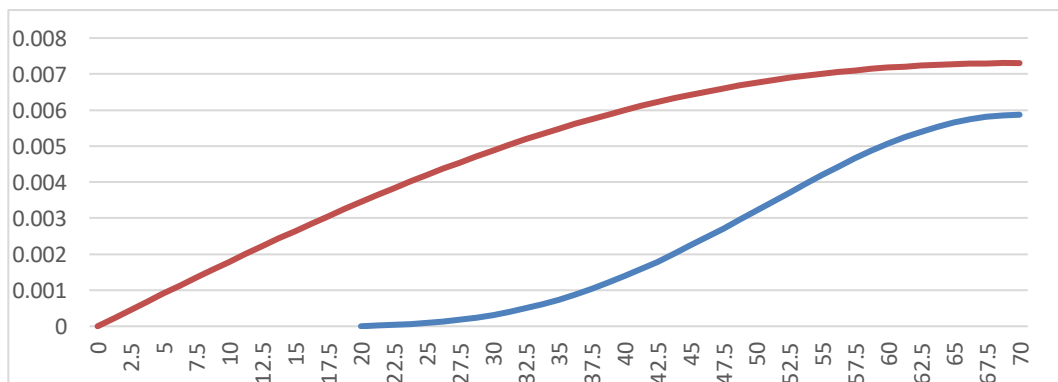


Imagen 55: Flecha transversal ante carga excéntrica modelo propuesto

- Momentos torsores:

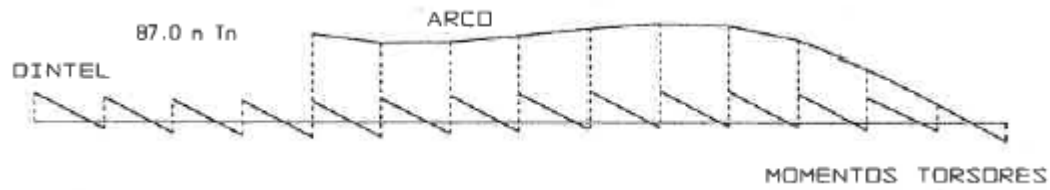


Imagen 56: Momento torsor ante carga excéntrica modelo J. Manterola

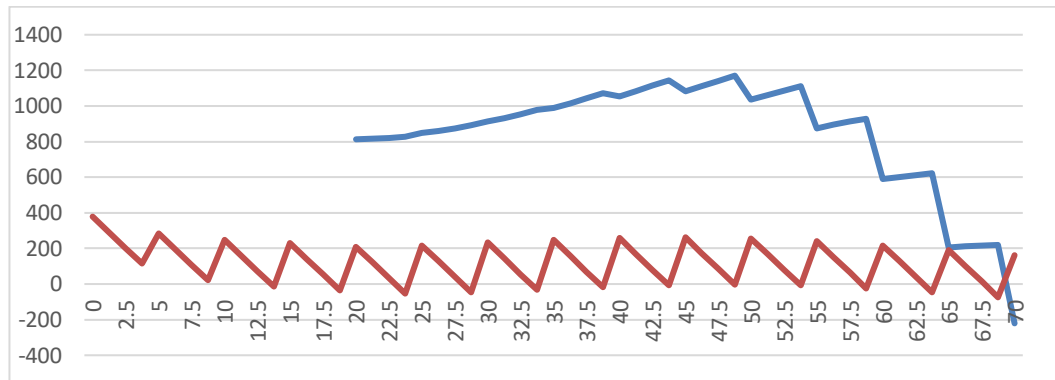


Imagen 57: Momento torsor ante carga excéntrica modelo propuesto

- Cortantes transversales:

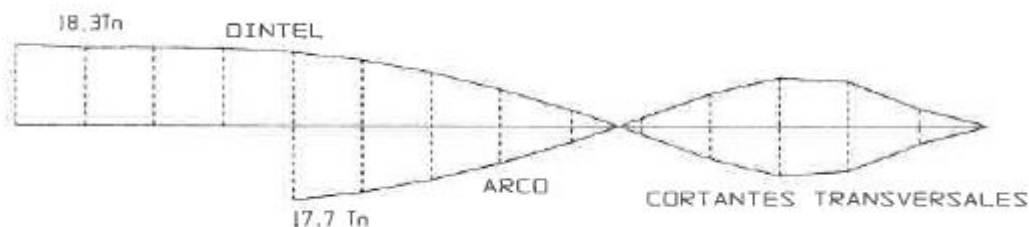


Imagen 58: Cortante transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola

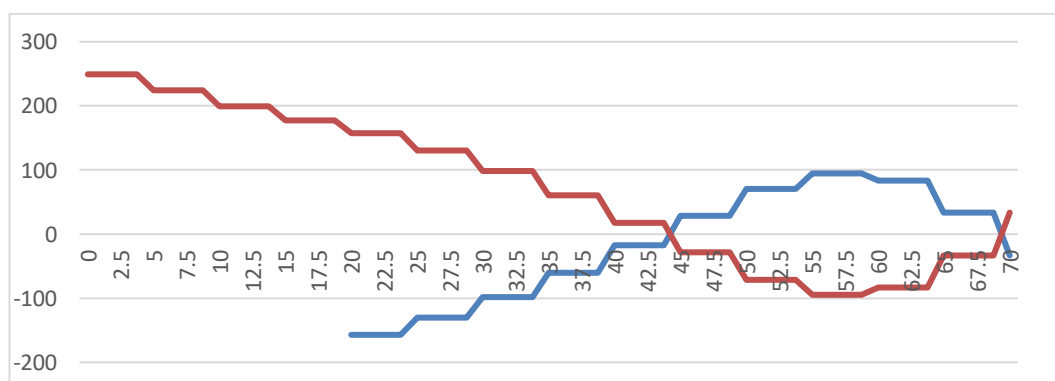


Imagen 59: Cortante transversal ante carga excéntrica modelo propuesto

- Flectores transversales:

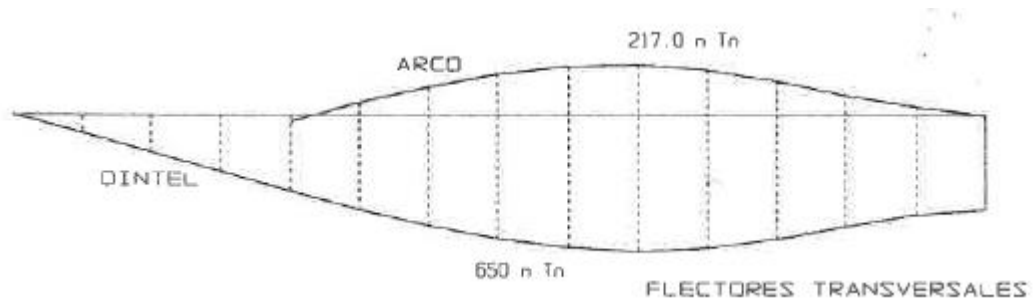


Imagen 60: Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo J. Manterola

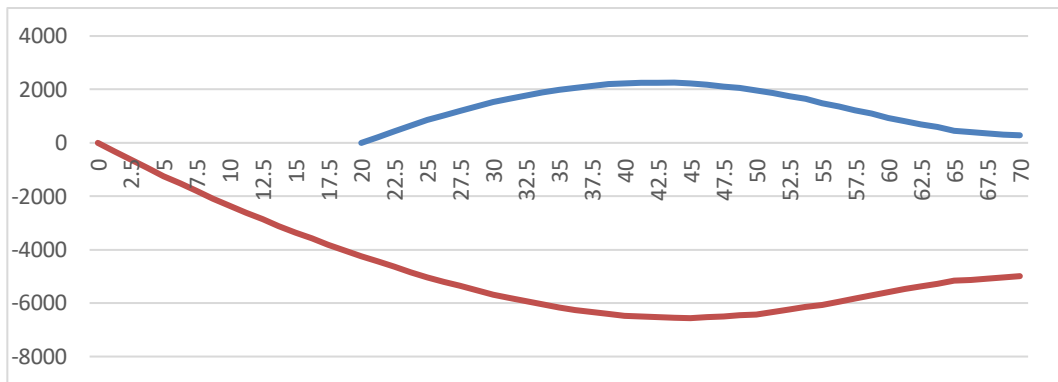


Imagen 61: Momento flector transversal ante carga excéntrica modelo propuesto

Carga transversal:

- Flechas transversales:

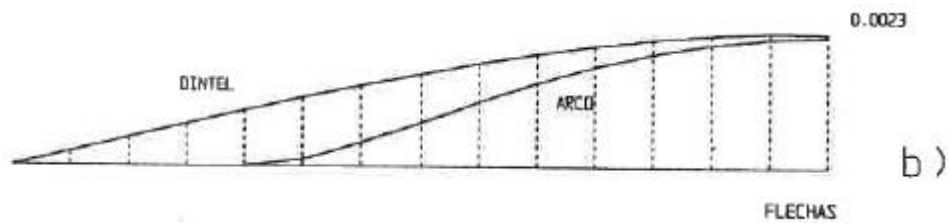


Imagen 62: Flecha transversal ante carga transversal modelo J. Manterola

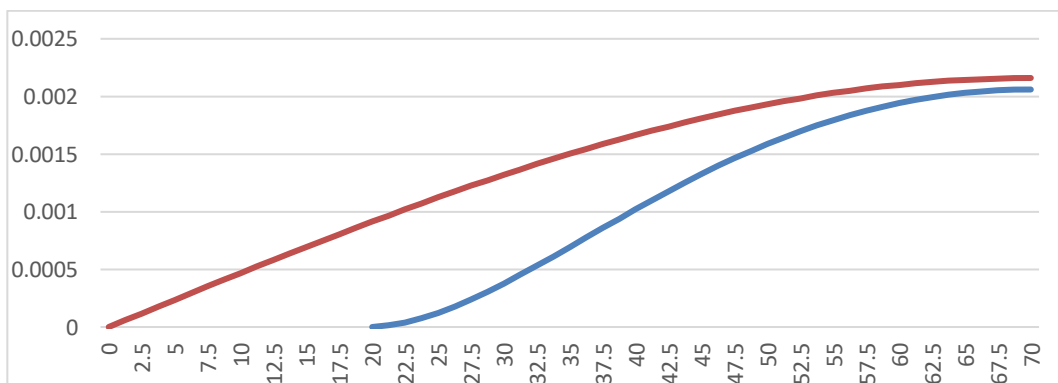


Imagen 63: Flecha transversal ante carga transversal modelo propuesto

- Momentos torsores:

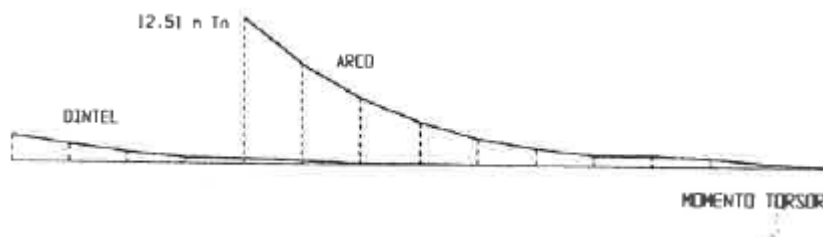


Imagen 64: Momento torsor ante carga transversal modelo J. Manterola

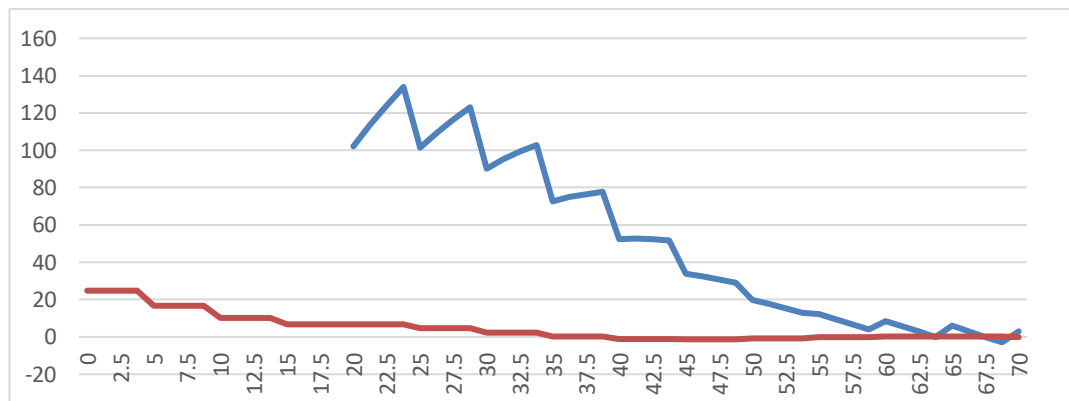


Imagen 65: Momento torsor ante carga transversal modelo propuesto

- Cortantes transversales:

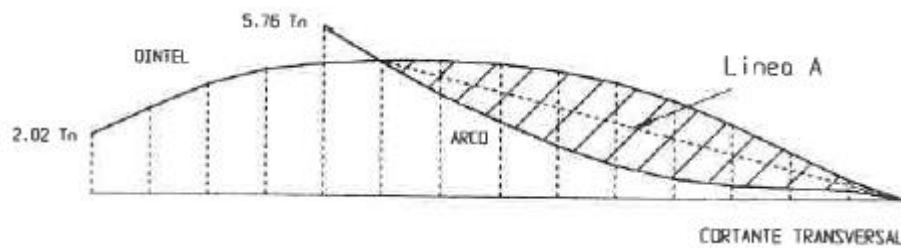


Imagen 66: Cortante transversal ante carga transversal modelo J. Manterola

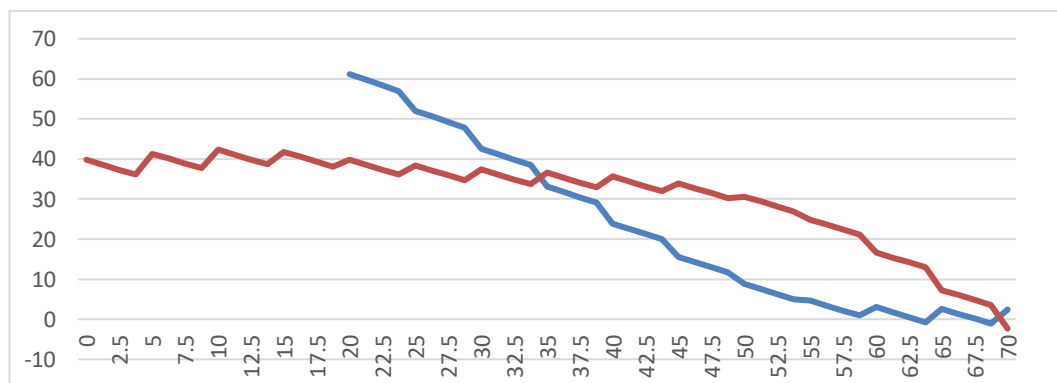


Imagen 67: Cortante transversal ante carga transversal modelo propuesto

- Flectores transversales:

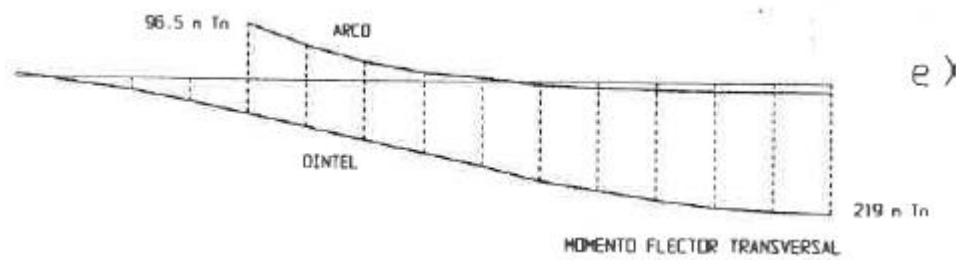


Imagen 68: Momento flector transversal ante carga transversal modelo J. Manterola

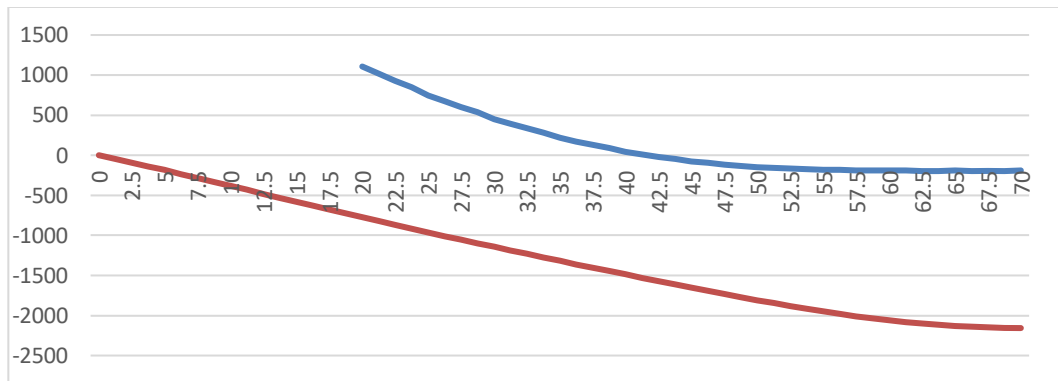


Imagen 69: Momento flector transversal ante carga transversal modelo propuesto

Como se puede observar y como bien exponía mi compañero, los resultados obtenidos se aproximan bastante a los que obtiene J. Manterola.

3.3 Modelo nuevo

3.3.1 Sección transversal modelo nuevo

Como ya he expuesto al inicio, las características geométricas del tablero están definidas en el punto “3.1 Cálculo de secciones”, a continuación, se mostrarán imágenes de como se aprecia la sección del tablero realizadas con sección placa.



Imagen 70: Vista en planta del tablero del Modelo Nuevo

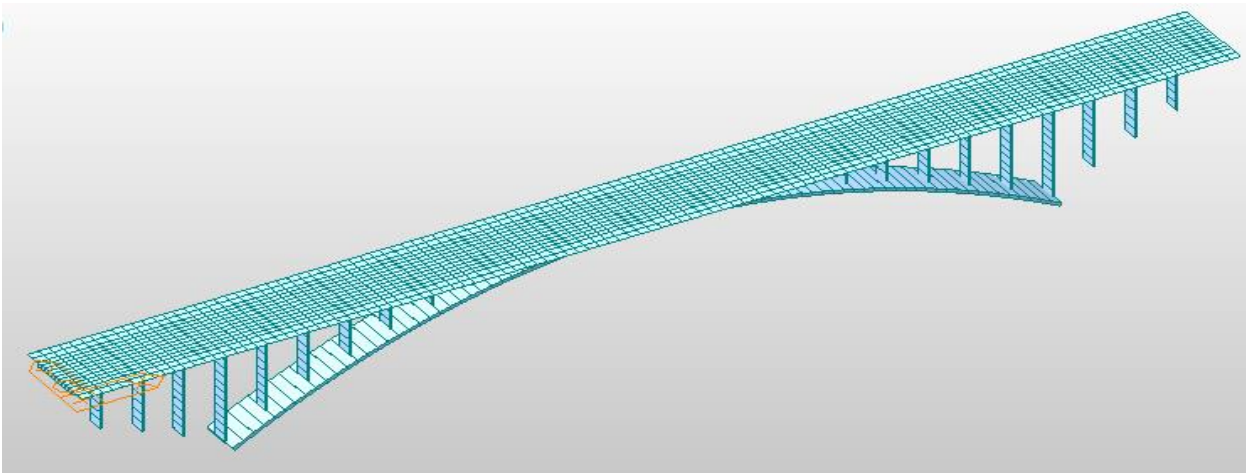


Imagen 71: Vista en perspectiva de la estructura del Modelo Nuevo

Nuevamente, como en el punto “2 COMPARATIVA MODELO PREVIO” el tablero está formado por elementos tipo placa con una dimensión de 1.25 x 1.25 metros cada una, que recorre los 140 metros de longitud que tiene el tablero. Se ha discretizado más en las particiones donde se encuentran los estribos y los pilares, es decir, cada 5 metros de los extremos incluyendo éstas también, para así tener un mejor análisis, con un total de 30 discretizaciones (diafragmas) hasta alcanzar los 140 metros. Estas placas poseen un espesor, la cual varían según donde se encuentren, es decir, en la superficie superior tienen un espesor de 0.2m; en la superficie inferior (base) tiene un espesor de 0.5m y finalmente, las superficies que forman los laterales de la viga cajón y sus particiones interiores (diafragmas) tienen un espesor de 0.65m.

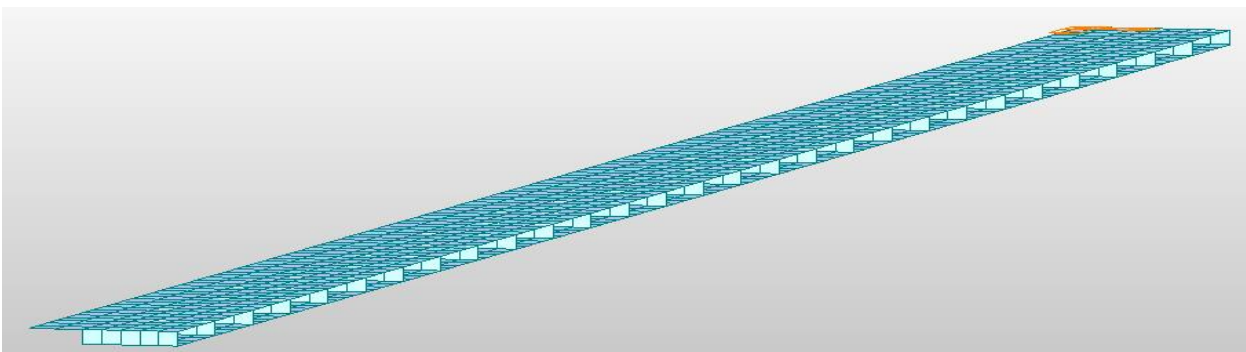


Imagen 72: Vista en perspectiva del tablero del Modelo Nuevo

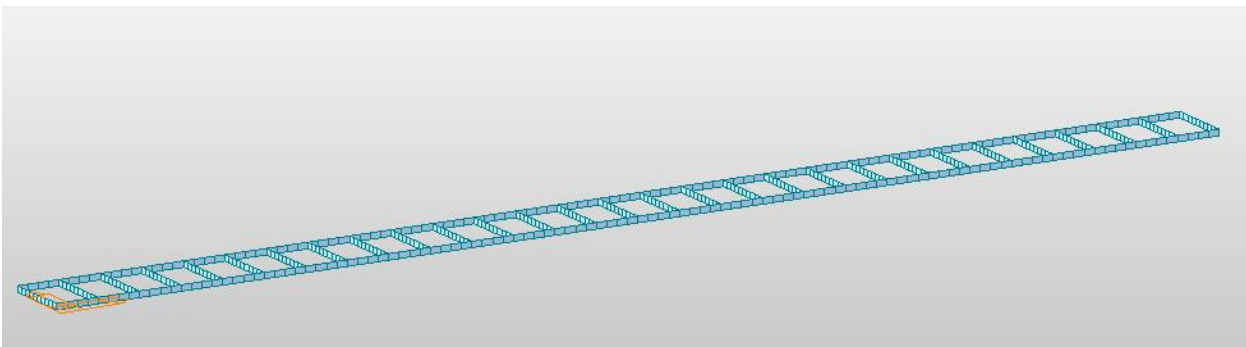


Imagen 73: Vista en perspectiva de los diafragmas del tablero del Modelo Nuevo

3.3.2 Materiales

Mismo material mostrado en el apartado 2.2. *Materiales*.

3.3.3 Apoyos y condiciones de contorno

Mismas condiciones mostrado en el apartado 2.3. *Apoyos y condiciones de contorno*.

3.3.4 Cargas

Mismas cargas mostradas en el apartado 2.4.2. *Cargas del Modelo Nuevo*

3.4 Resultados de las nuevas secciones

Seguidamente se mostrarán los resultados obtenidos del modelo nuevo donde la rigidez a torsión predomina en el dintel.

3.4.1 Rigidez a torsion predominante en el tablero: Modelo Nuevo

Carga excéntrica

- Desplazamientos transversales:

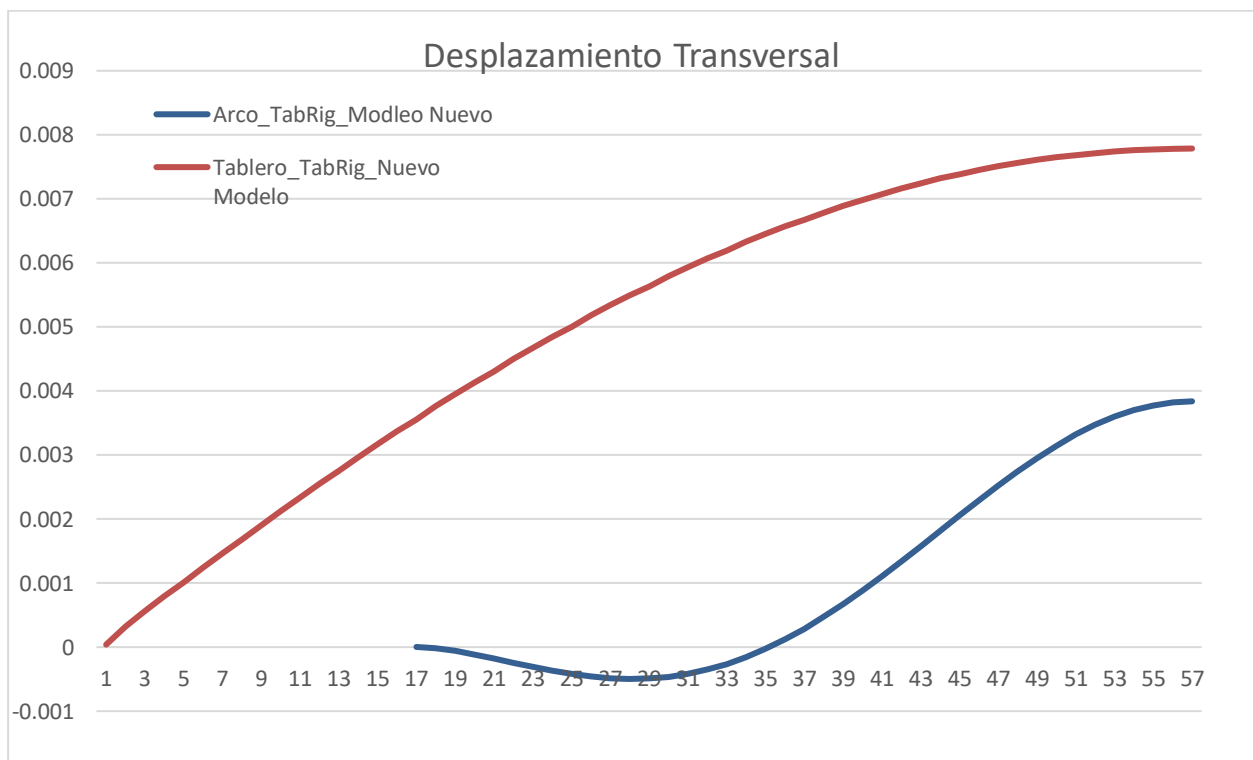


Imagen 74: Desplazamiento transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

- Momentos torsores:

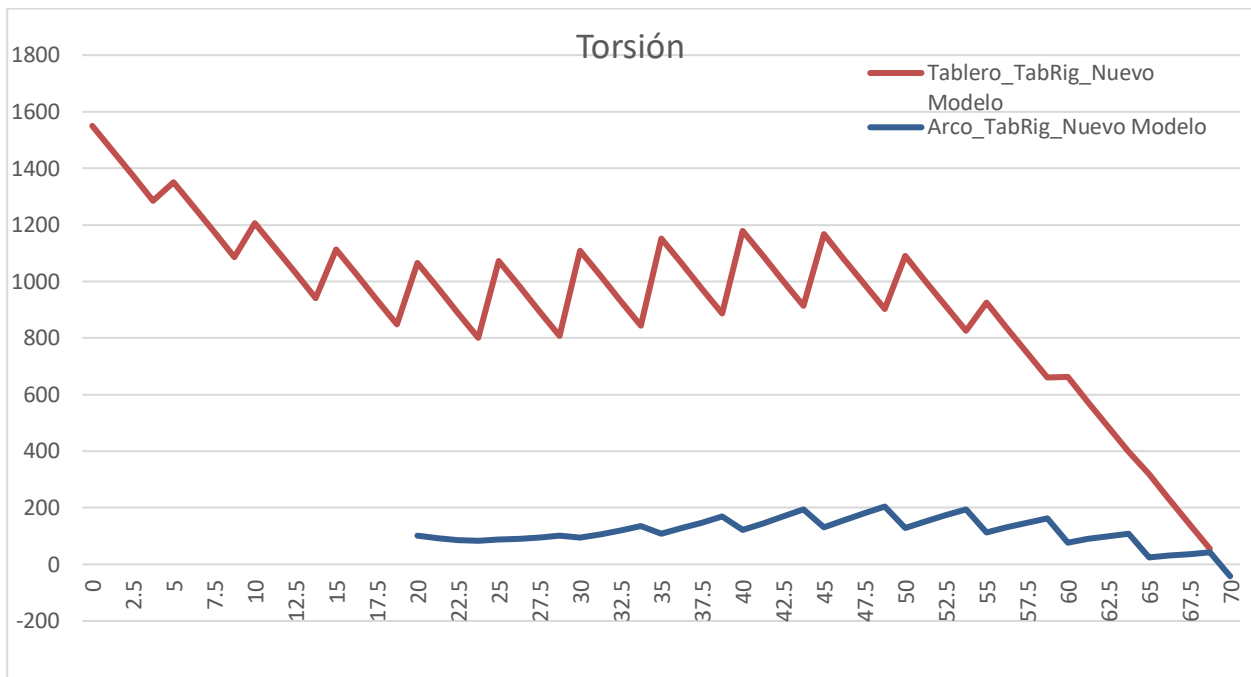


Imagen 75: Momento torsor ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

- Cortantes transversales:

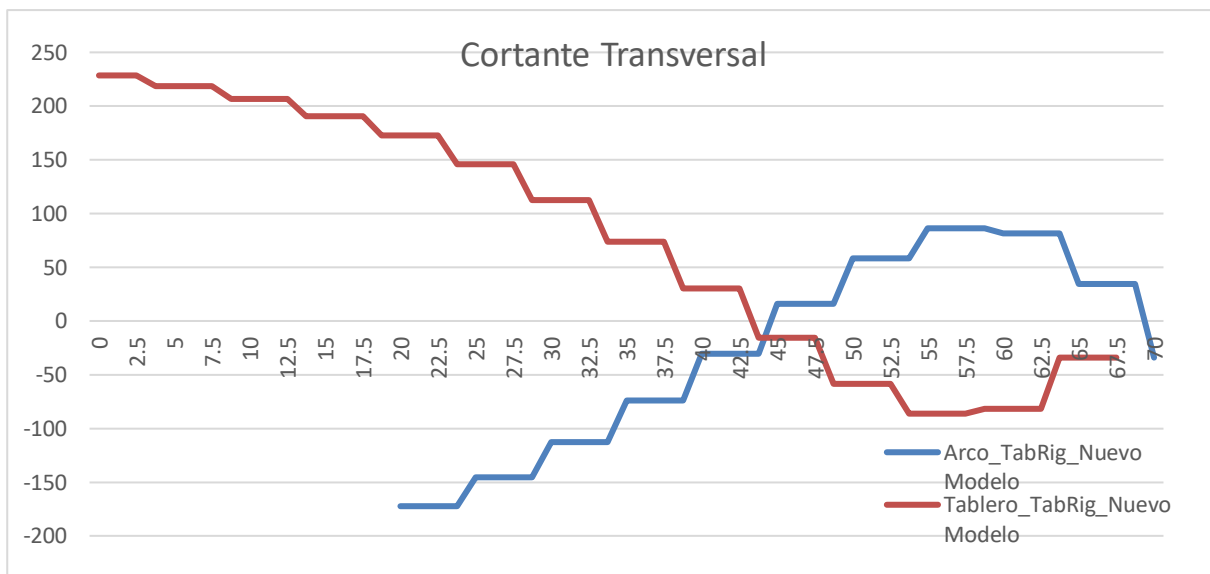


Imagen 76: Cortante transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

- Flectores transversales

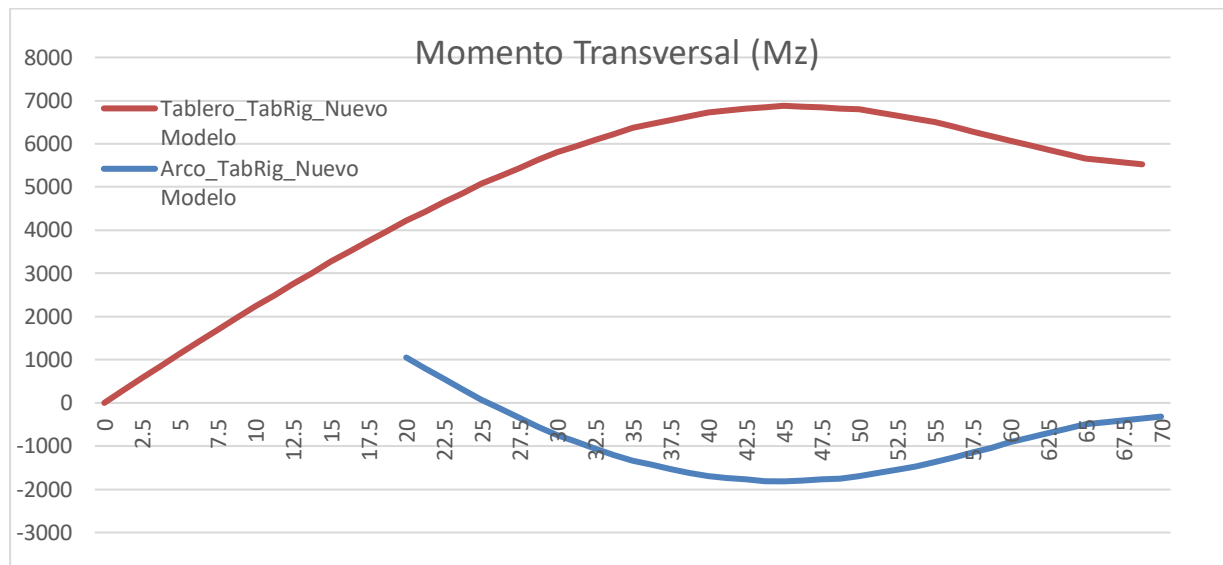


Imagen 77: Momento flector transversal ante carga excéntrica, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

Carga transversal

- Desplazamientos transversales:

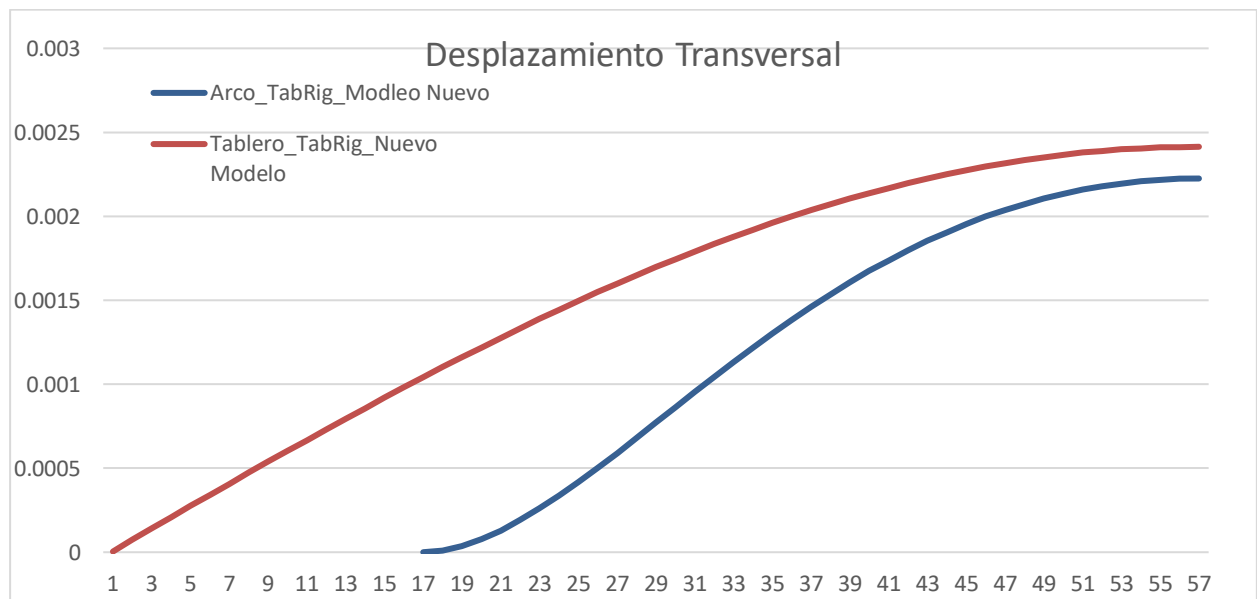


Imagen 78: Desplazamiento transversal ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

- Momentos torsores:

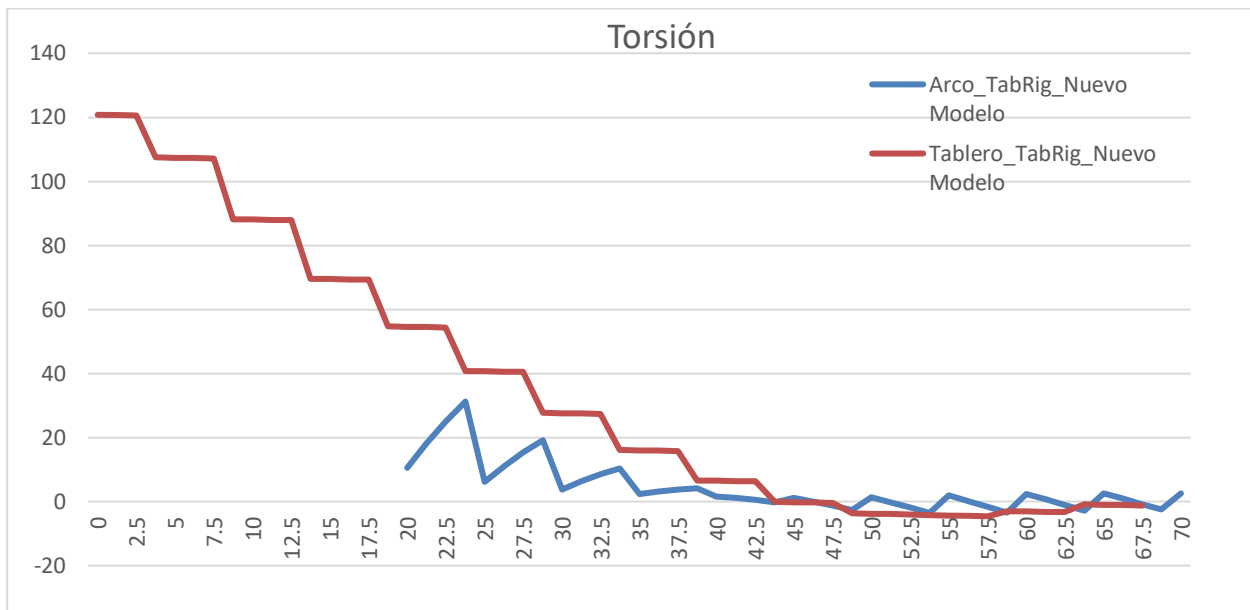


Imagen 79: Momento torsor ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

- Cortantes transversales:

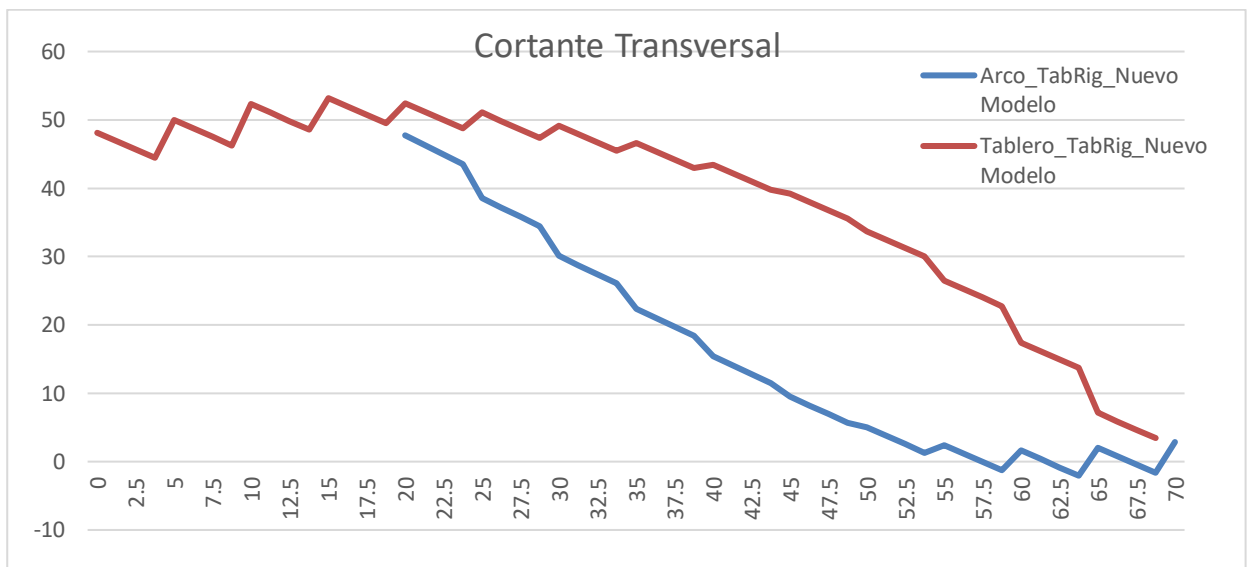


Imagen 80: Cortante transversal ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

- Flectores transversales

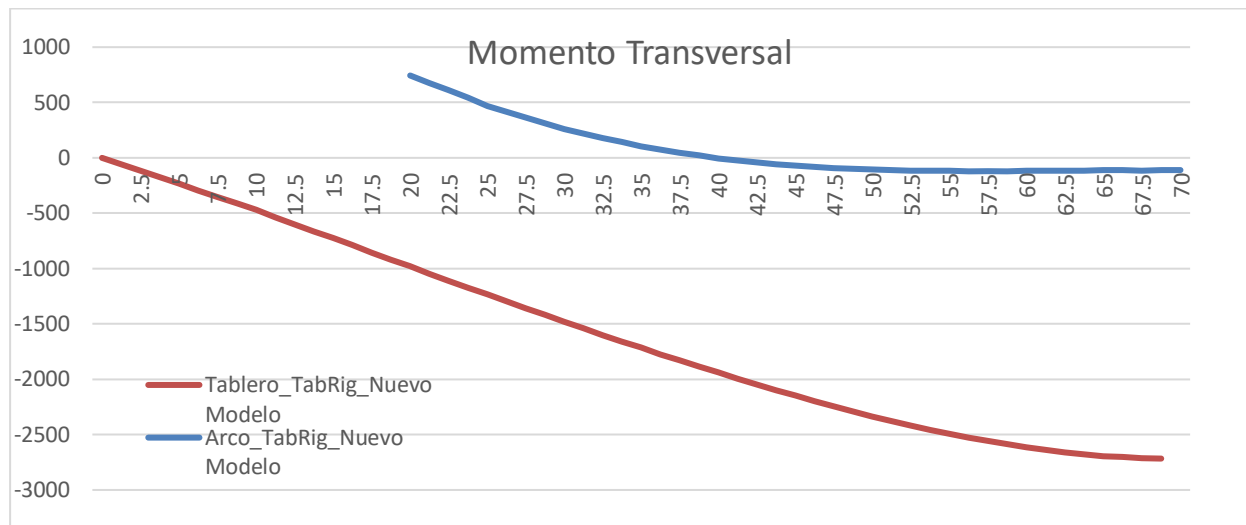


Imagen 81: Momento flector transversal ante carga transversal, rigidez en tablero, Modelo Nuevo

3.4.2 Análisis de resultados

Reiteradamente se va a comentar los resultados obtenidos, comparando el modelo nuevo con predominación en rigidez a torsión en el dintel a los que obtuvo J. Manterola donde la rigidez predominaba en el arco.

3.4.2.1. Carga excéntrica

- Desplazamientos transversales:

Se asemeja mucho como en el caso del apartado “2.6.2. Cargas excéntricas”. Ambas imágenes están representadas en la coordenada $X = 98.75\text{m}$. A simple vista, se aprecia que hay algunos cambios en los desplazamientos transversales, y podemos ver que solo en la mitad del tablero de la sección nueva, sufre los máximos esfuerzos que se parecen al modelo de J. Manterola. Esto también influye en que los esfuerzos se encuentren mejor distribuidos a lo largo del pilar hasta alcanzar al arco. Como bien explicó mi compañero, dado que la rigidez a torsión se encuentra predominantemente en el tablero, el centro de rigidez torsional se aproxima a esta estructura, lo que genera incrementos en los giros del tablero y esto hace que los desplazamientos transversales sean más bajos. El descenso del eje de giro provoca que el momento torsional genere un efecto de desplazamiento hacia el exterior del tablero.

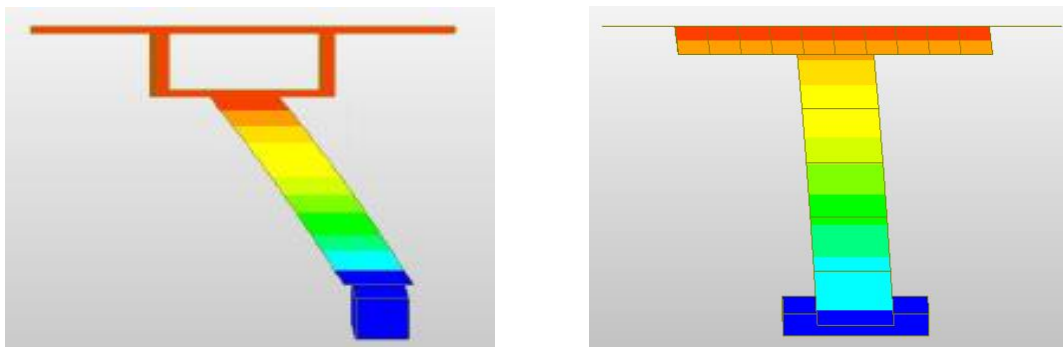


Imagen 82: Comparación de efecto generado por carga excéntrica (Sección: $x = 98.75\text{ m}$)

La curva “Arco_ArcRig_Modelo Previo” presenta mayores valores de desplazamiento en comparación con “Arco_TabRig_Modelo Nuevo”. Esto indica que cuando la rigidez a torsión está concentrada en el arco, la

estructura experimenta un mayor desplazamiento transversal. En el caso donde la rigidez se concentra en el tablero, el desplazamiento transversal del arco es menor, lo que sugiere que el tablero está restringiendo parte del movimiento lateral del arco.

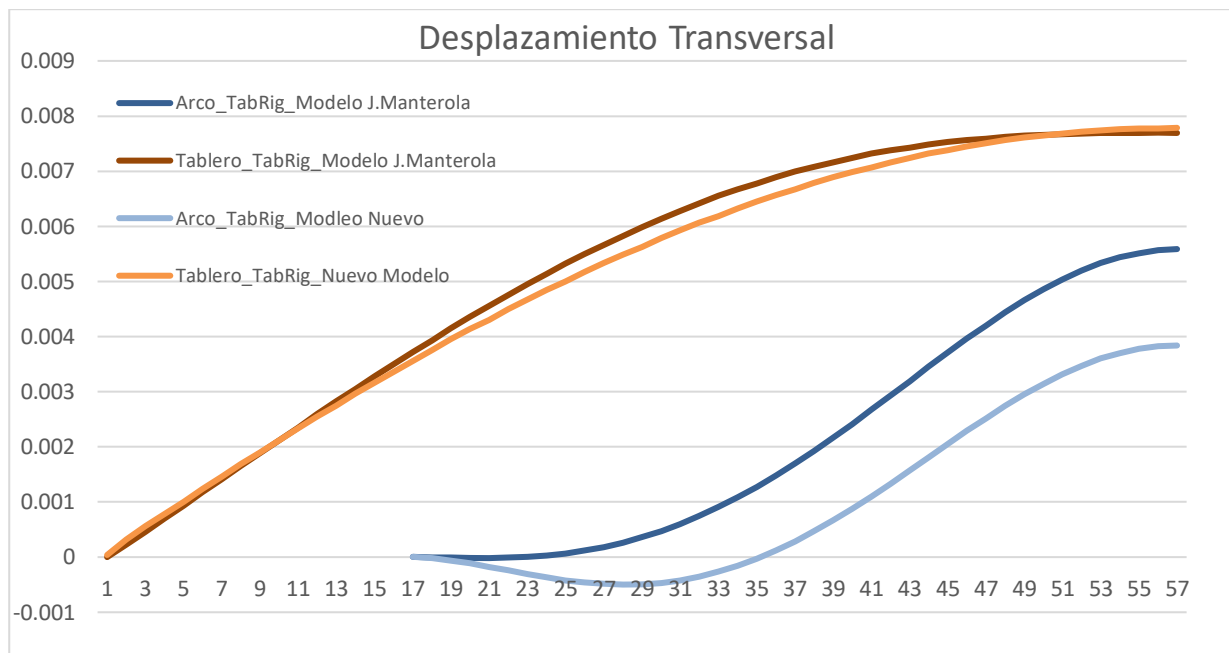


Imagen 83: Comparación de Desplazamiento Transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica

- Momentos torsores:

Se puede apreciar que en la configuración que tiene la rigidez a torsión predominante en el arco, el arco tiene momentos torsores muy notables respecto a los del tablero, en cambio, en el modelo donde la rigidez a torsión predomina en el tablero, sucede lo contrario, es decir, ahora el tablero es que está soportando mayores momentos torsores que en el arco.

En la sección nueva de María, al tener la rigidez predominante a torsión en el tablero, esto hace que la estructura redistribuya mejor los esfuerzos torsionantes, reduciendo la carga transmitida al arco y evitando sobreesfuerzos en las conexiones entre ambos elementos. También se observa en este modelo que, hasta el arranque del arco, el torsor del tablero tiene una distribución más suave, es decir, no tiene unos picos muy pronunciados, pero al llegar al punto de conexión con el arco, el torsor del dintel aumenta ya que asume la sollicitación de dicho tramo debido a que el par de fuerzas desaparece.

Se puede contemplar que, en ambos casos, al llegar a la mitad del tablero, los elementos arco-tablero alcanzan el punto de equilibrio, ya que coinciden en el punto cero, se equilibran los esfuerzos torsionales.

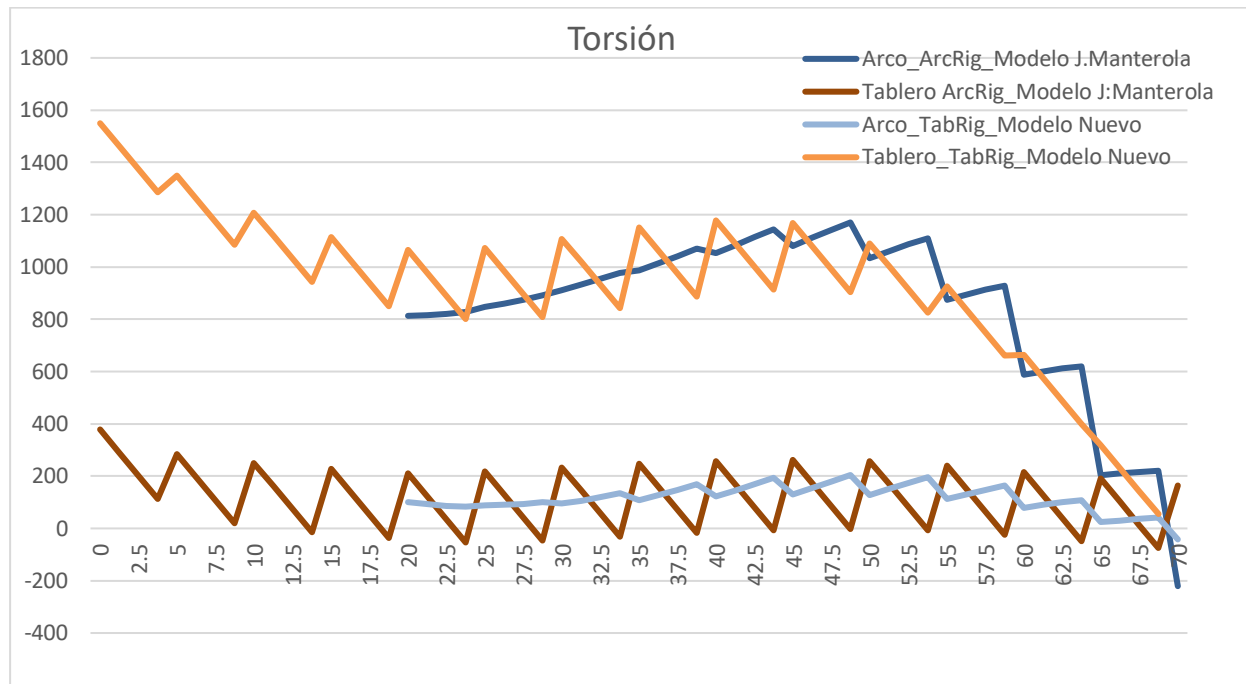


Imagen 84: Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga excéntrica

- Cortantes transversales:

Como bien explicó mi compañero en su día, en el caso de los cortantes transversales, en una estructura de arco con tablero, estos esfuerzos en ambos elementos son prácticamente iguales en magnitud, pero de signo opuesto, equilibrando así el momento torsor generado por la interacción entre el arco y el dintel. En ambos modelos a comparar, se observa un cambio de signo en estos esfuerzos aproximadamente en los cuartos de la luz del arco, lo que responde al efecto de la excentricidad de la carga, que induce rotaciones simultáneas en ambos elementos en la misma dirección. A medida que las pilas se acortan progresivamente hacia la clave, la inversión de las fuerzas a lo largo de la luz es necesaria para garantizar que los desplazamientos transversales del dintel se adapten a los del arco, especialmente en las zonas cercanas a la mitad del vano.

En conclusión, ambos casos suceden lo mismo en interacción tablero-arco. Comparando los valores, en el tablero con mayor rigidez a torsión tiene un pequeño comienzo con menores valores, pero según va avanzando obtiene mayores esfuerzos en comparación al tablero donde la rigidez a torsión es inferior. Relación entre ambos arcos, son ligeramente iguales, en arco con menor rigidez a torsión comienza con pequeños valores mayores, pero a partir del punto de intersección entre arco-tablero, comienza a tener menores valores en comparación al arco con más rigidez a torsión.

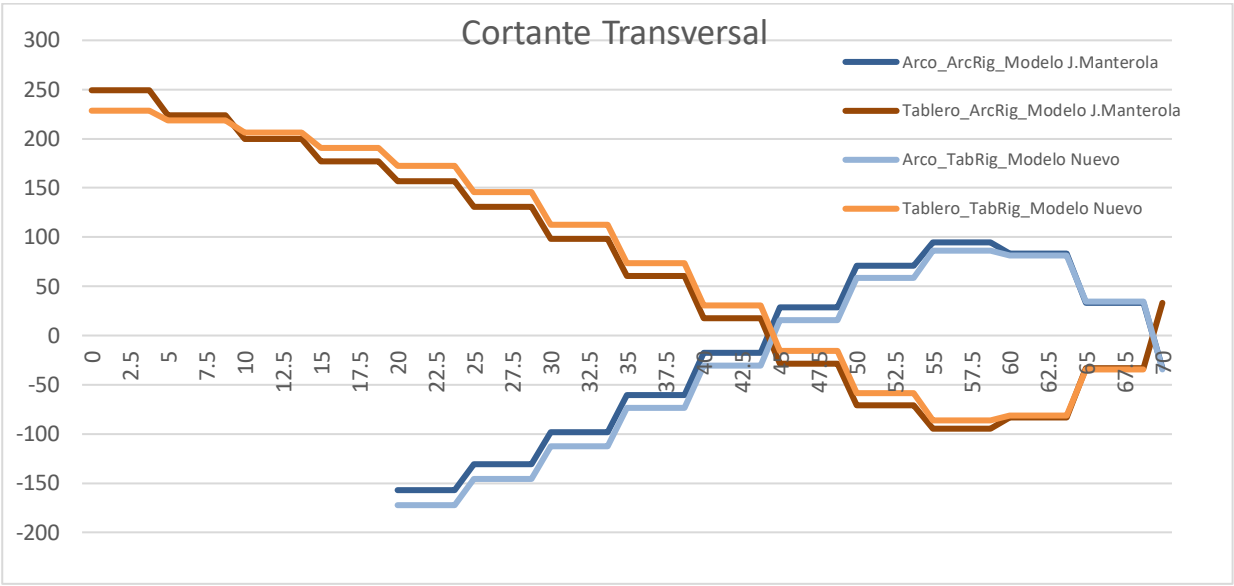


Imagen 85: Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica

En la siguiente tabla contiene algunos aspectos que muestra que el cortante soporta gran parte de la solicitación torsora a cuartos de la luz, al igual que en el caso que estudió Antonio [4]. Se muestran ambas configuraciones, tanto con rigidez a torsión concentrada en arco y tablero, y se ha estudiado para carga excéntrica. Se ha clasificado en los mismos puntos que lo realizó Antonio [4] y así exactamente comparar ambos acos (J. Manterola [1] y modelo nuevo). En la primera sección, se analiza la predominancia de la rigidez y la deformación transversal del arco en cada escenario, observándose que ambas coinciden. En la segunda y tercera sección, se presentan los valores del esfuerzo cortante y la torsión en el tablero y en el arco respectivamente para cada caso, junto con la especificación de la sección utilizada en el estudio. En la siguiente parte, se detallan varios parámetros clave: primero, se muestra la longitud del brazo de palanca que permite la interacción del par de fuerzas en la resistencia a la torsión. A continuación, se presenta el esfuerzo cortante total, resultado de la suma de los valores del arco y el dintel. Posteriormente, se calcula el torsor generado por el par de fuerzas, obtenido como el producto entre el torsor total y el brazo de palanca. Seguidamente, se proporciona el valor total del torsor, correspondiente a la suma de los torsores del arco y el dintel. Finalmente, en el último apartado, se indica el porcentaje de la carga torsora que es absorbida por cada uno de los elementos estructurales.

Se extrae de la tabla lo siguiente, que sucede lo mismo que en el modelo de Antonio [4]. Hasta un 80% de la solicitación torsora es absorbida por el par de fuerzas. Este fenómeno se debe a que, al concentrar la rigidez a torsión en el tablero, la rigidez global del sistema frente a torsión se reduce. Como consecuencia, se genera un incremento en el esfuerzo cortante, lo que amplifica la contribución del par de fuerzas en el mecanismo resistente a la torsión, optimizando así su capacidad de disipar dicha solicitación. En cambio, en momento torsor disminuye en comparación con el modelo de J. Manterola (rigidez a torsión predominante en el arco).

CARGA EXCÉNTRICA			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	m/m
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo 103 (26.25,0,16)			
V	130.70	112.63	kN
T	129.39	768.99	kNm
Arco, nodo 206/6 (26.25,0,3.52)			
V	-130.70	-145.79	kN
T	860.18	30.57	kNm
brazo	12.48	12.48	m
Vtotal	261.40	258.42	kN
Tv	3262.27	3226.12	kNm
Tt	989.57	799.56	kNm
%V	77%	80%	%
%T	23%	20%	%

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

- Flectores transversales

La forma de la curva de la nueva sección es similar al modelo original, pero los valores son menos negativos en comparación con la primera, indicando que el arco absorbe menos momento transversal cuando la rigidez a torsión es transferida al tablero.

La transferencia de rigidez torsional entre el tablero y el arco influye directamente en la redistribución del momento transversal. Cuando la rigidez está en el arco, este se comporta como el elemento principal resistente, mientras que cuando la rigidez se concentra en el tablero, el arco reduce su participación y el tablero asume un mayor esfuerzo.

Como bien redactó mi compañero Antonio, lo principal de esta grafica se encuentra en el comienzo del puente, es decir, la mayor importancia del par de fuerzas se refleja en una mayor curvatura en dicho punto, donde produce un incremento del momento transversal en arco y dintel.

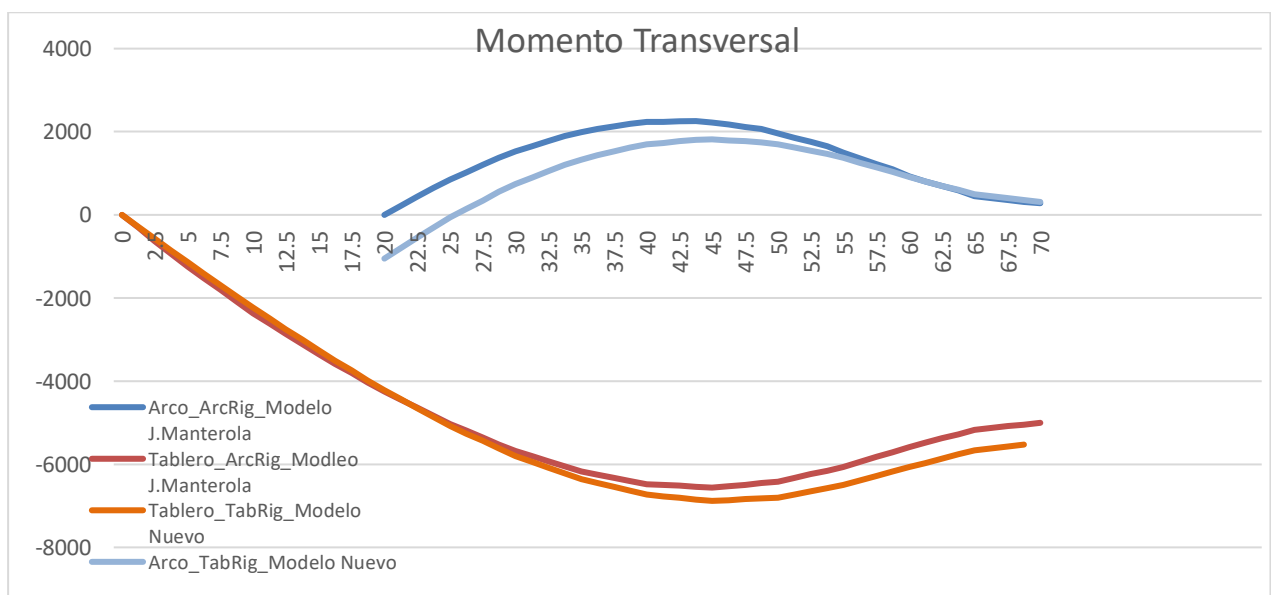


Imagen 86: Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga excéntrica, Modelo Nuevo

3.4.2.2. Carga transversal

La carga transversal inducida por la acción del viento sobre la estructura puede descomponerse en dos componentes principales: una sollicitación transversal global, que genera esfuerzos cortantes y momentos flectores en el sistema estructural, y una sollicitación torsora, originada por la excentricidad de la aplicación de la carga con respecto al eje de rigidez del conjunto. Esta última componente induce esfuerzos de torsión en los elementos estructurales, afectando la distribución de tensiones y desplazamientos, especialmente en configuraciones donde el tablero y el arco trabajan en interacción.

- Desplazamientos transversales:

Se observa que son similares ambos casos, solo a destacar que el arco padece más desplazamiento transversal cuando la rigidez predominante se encuentra en el tablero, y esto es debido a que la estructura es más flexible.

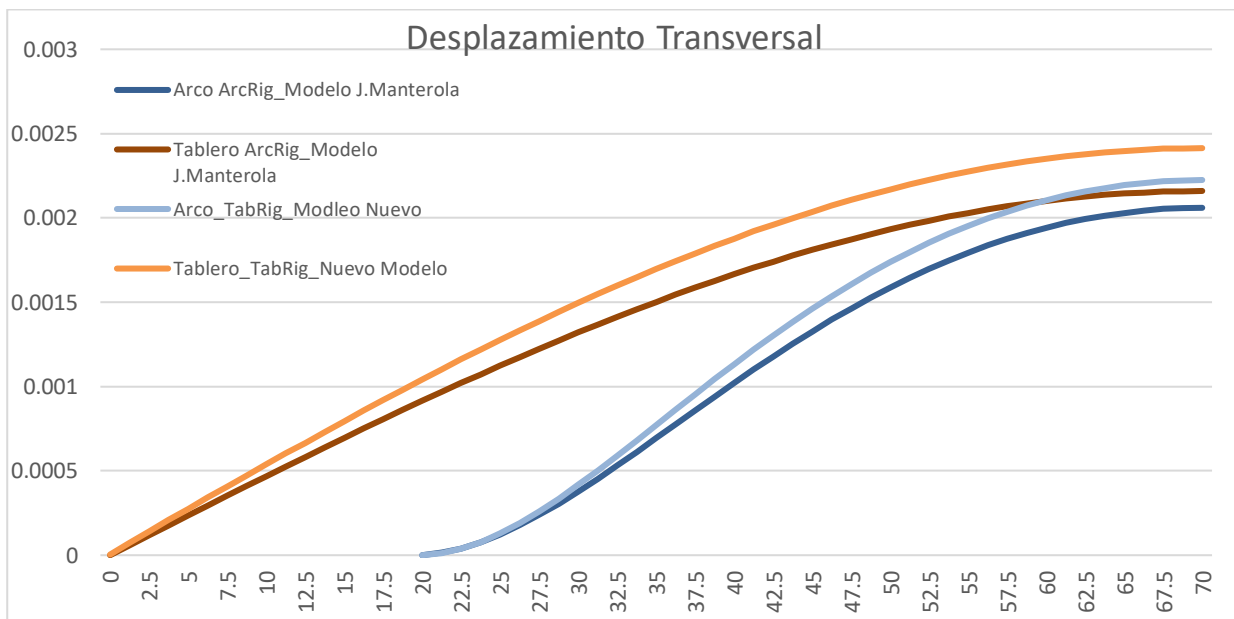


Imagen 87: Comparación de desplazamiento transversal según rigidez predominante ante carga transversal

- Momentos torsores y cortantes transversales:

Se va a efectuar un estudio conjuntamente momento torsor y cortante transversal similar al que hizo Antonio. J. Manterola señaló en su investigación que el cortante transversal en arco y tablero está constituido por dos magnitudes, la agrupación natural de carga transversal de viento y el par de fuerzas que se produce para disminuir el torsor sobre el arco.

Lo más visual es que al tener la torsión predominante en el tablero, se tiene que en el dintel trabaja a mayores esfuerzos torsionales que en el arco. Observamos que la torsión total es inferior en comparación con el modelo original, donde la rigidez se concentra principalmente en el arco. Esto sugiere inicialmente que, en el modelo con tablero rígido, la colaboración del par de fuerzas para resistir la torsión es más efectiva. Sin embargo, al analizar el diagrama de esfuerzos cortantes, se evidencia que esta suposición no se cumple.

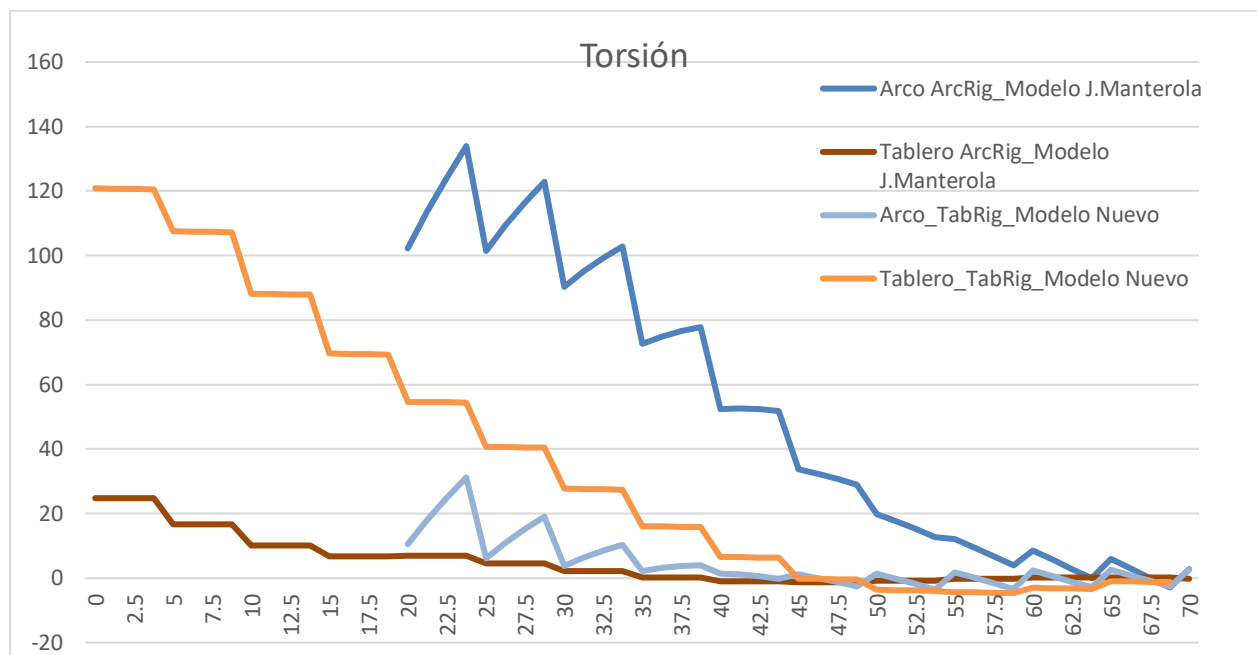


Imagen 88: Comparación de momento torsor según rigidez predominante ante carga transversal

Los esfuerzos cortantes transversales en el arco y el tablero resultan de la superposición de los efectos inducidos tanto por la solicitación transversal global como por la solicitación torsora. En contraste con la solicitación transversal, que tiende a generar un esfuerzo de igual magnitud, pero de sentido contrario en ambos elementos, la solicitación torsora introduce un par interno que se transmite entre el arco y el tablero. Este equilibrio de esfuerzos garantiza la compatibilidad de desplazamientos y la estabilidad estructural frente a cargas transversales.

Para verificar que ocurre lo explicado anteriormente con el momento torsor, se va a realizar la misma tabla de Antonio para ver como progresa la solicitación a lo largo del puente. Antonio eligió 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 solicitación 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.

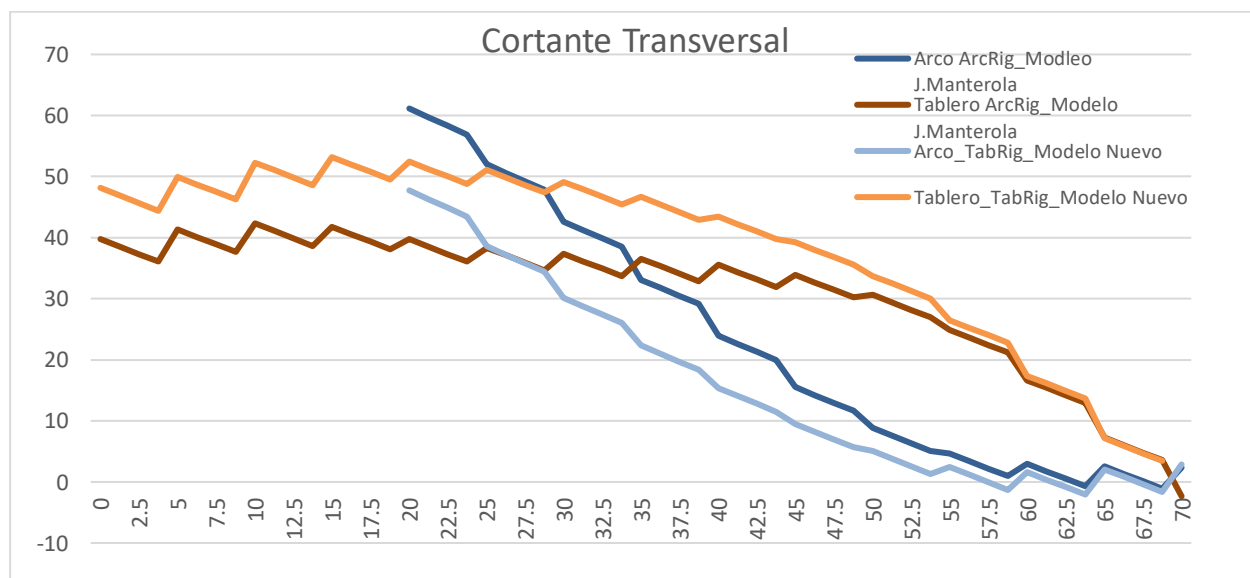


Imagen 89: Comparación de cortante transversal según rigidez predominante ante carga transversal

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	m/m
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (26.25,0,16)			
V	37.13	21.26	kN
T	4.63	27.53	kNm
Arco, nodo (26.25,0,X)			
V	50.61	34.96	kN
T	109.30	10.98	kNm
Vtotal	-13.48	-13.70	kN
Ttotal	113.93	38.51	kNm
Tarco	109.30	10.98	kNm
Solic. Torsora	-54.30	-132.52	kNm

Tabla 3: Solicitación torsora x = 26.25

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	m/m
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (32.5,0,16)			
V	34.91	21.45	kN
T	2.12	6.58	kNm
Arco, nodo (32.5,0,X)			
V	39.87	26.30	kN
T	99.30	8.58	kNm
Vtotal	-4.96	-4.85	kN
Ttotal	101.42	15.16	kNm
Tarco	99.30	8.58	kNm
Solic. Torsora	39.52	-45.39	kNm

Tabla 4: Solicitación torsora x = 32.5 m

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	m/m
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (45,0,16)			
V	33.91	14.22	kN
T	-1.28	-4.40	kNm
Arco, nodo (45,0,X)			
V	15.51	11.05	kN
T	33.79	1.19	kNm
Vtotal	18.40	3.17	kN
Ttotal	32.51	-3.21	kNm
Tarco	33.79	1.19	kNm
Solic. Torsora	262.14	36.36	kNm

Tabla 5: Solicitación torsora x = 45 m

CARGA TRANSVERSAL			
Rigidez predominante	Arco	Tablero	m/m
flecha	15.15	15.15	m
Dintel, nodo (55.25,0,16)			
V	24.85	2.74	kN
T	12.70	-1.22	kNm
Arco, nodo (55.25,0,X)			
V	2.17	3.98	kN
T	6.74	1.89	kNm
Vtotal	22.68	-1.24	kN
Ttotal	19.44	0.67	kNm
Tarco	6.74	1.89	kNm
Solic. Torsora	302.49	-14.81	kNm

Tabla 6 Solicitación torsora x = 57.5 m

- Flectores transversales

Si analizamos el comportamiento en términos de flexión transversal, observamos un fenómeno análogo. La necesidad de equilibrar la torsión inducida por la carga exterior provoca una redistribución de esfuerzos en la estructura. En particular, el arco transfiere parte de su capacidad resistente hacia la torsión, reduciendo significativamente los momentos flectores transversales en su sección. En contraste, el dintel asume una mayor demanda de flexión transversal, compensando así la disminución de carga resistente en el arco. Este mecanismo de redistribución estructural es clave para garantizar la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio del sistema frente a acciones transversales.

En este caso, en la sección nueva asume el tablero mayor momento transversal en comparación del modelo de J. Manterola y en el elemento arco presenta menores valores hasta alcanzar un punto donde obtiene unos valores superiores al del modelo original.

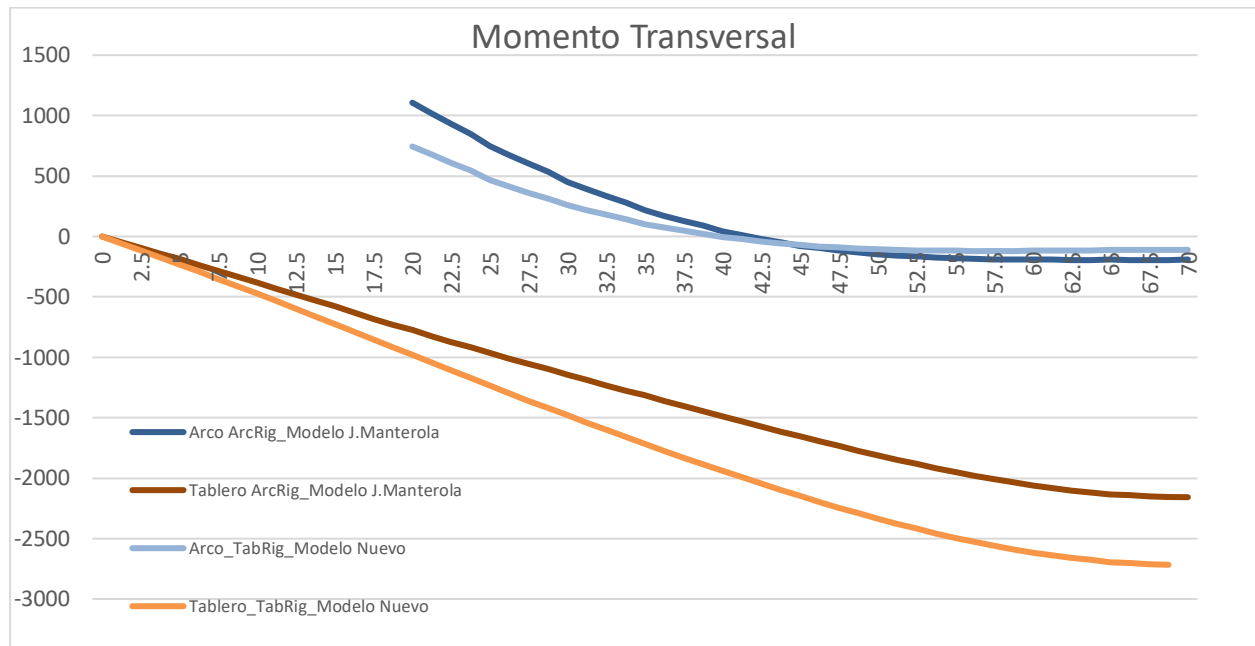


Imagen 90: Comparación de momento transversal según rigidez predominante ante carga transversal

3.5 Conclusiones

Las conclusiones a las cuales se llega con esta investigación son:

- Cuando la estructura está sometida a cargas excéntricas, una mayor concentración de rigidez a torsión en el tablero conlleva un incremento del efecto cortante como mecanismo de resistencia frente a la acción torsora.
- Por otro lado, al aplicar una carga transversal, se observa que aquellos modelos en los que la rigidez torsional se concentra en el tablero presentan una reducción en la magnitud de la solicitación torsional.

4. INFLUENCIA DE LA RELACIÓN FLECHA-LUZ

Como extensión del trabajo de Antonio [4], se presenta aquí una mirada complementaria sobre el comportamiento de los puentes arco ante cargas excéntricas y transversales, que como bien comentó Antonio, ambas cargas tienen relación flecha-luz del arco. En adelante, observaremos cómo la relación entre la flecha y la luz del arco influye en los esfuerzos que se generan en este tipo de puentes.

Nuevamente, se estudiarán los dos casos de carga que propone J. Manterola [1]: excéntrica y de viento, para cada una de las relaciones que estudiaremos. Este estudio permitirá evaluar con mayor precisión la influencia que ejerce la variación de la flecha en la respuesta estructural del arco frente a las cargas consideradas.

En dicho desarrollo se va a aplicar los siguientes aspectos:

1. Continuamos con el modelo de J. Manterola [1], 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 [1] en el estudio de referencia) y $f = \frac{L}{10}$.
2. Se mantiene la luz constante de 100 metros y será la flecha la que vaya variando según la relación entre ellas.
3. Se mantienen constante las secciones de los pilares y tablero.

Lo que se diferencia el estudio de Antonio con el mío es que, Antonio [4] calculó distintas secciones del arco para cada caso de relación flecha-luz, en cambio, mi análisis ha tenido en cuenta varios matices:

1. La flecha está relacionada con el axil y se ha querido mantener su relación, es decir, que como el axil es inversamente proporcional a la flecha, el nuevo axil calculado sería:

$$N * f = \frac{q * L^2}{8} = cte \rightarrow N = \frac{q * L^2}{f * 8} = cte \quad \text{Ecuación (11)}$$

Como el caso original estudiado de Manterola ha sido con $f=L/6.6$, pues se llega a las siguientes conclusiones:

$$Nm * fm = N1 * f1 = N2 * f2 = N3 * f3$$

$$N1 = Nm * \frac{fm}{f1} \rightarrow N1 = Nm * \frac{5}{6.6}$$

$$N2 = Nm * \frac{fm}{f2} \rightarrow N2 = Nm * \frac{10}{6.6}$$

$$N3 = Nm * \frac{fm}{f3} \rightarrow N3 = Nm * \frac{16}{6.6} \quad \text{Ecuaciones (12)}$$

2. Como quiero que la tensión σ_x sea constante, el área debe ser igual de proporcional que el axil:
 $A_i' = N_i * A_i$

$$A1' = A1 * \frac{5}{6.6}$$

$$A2' = A2 * \frac{10}{6.6}$$

$$A3' = A3 * \frac{16}{6.6}$$

Ecuaciones (13)

3. Se va a intentar que los valores de las inercias se mantengan constante a las originales, las inercias
 $I_{xx} \approx 2.5431801 \text{ m}^4$ e $I_{zz} \approx 5.2579056 \text{ m}^4$.

Todo esto se ha conseguido variando los parámetros geométricos de la sección del arco, siguiendo tipo cajón.

4.1. Cálculo de las secciones

Con el objetivo de llevar a cabo un análisis comparativo entre los diversos casos considerados, se ha obtenido los siguientes valores de los parámetros que definen a la sección del arco (H, B, tw, tf1, C, tf2=tf1) donde a su vez he tenido que calcular $Lm = B - tw$; $Hm = H - \frac{tf1}{2} - \frac{tf2}{2}$ para obtener el objetivo buscado.

A continuación, se van a mostrar las secciones de cada caso a través de MIDAS Civil [3]:

Caso 0: $f = L/6.6$

Luz := 100m

f0 := 15m

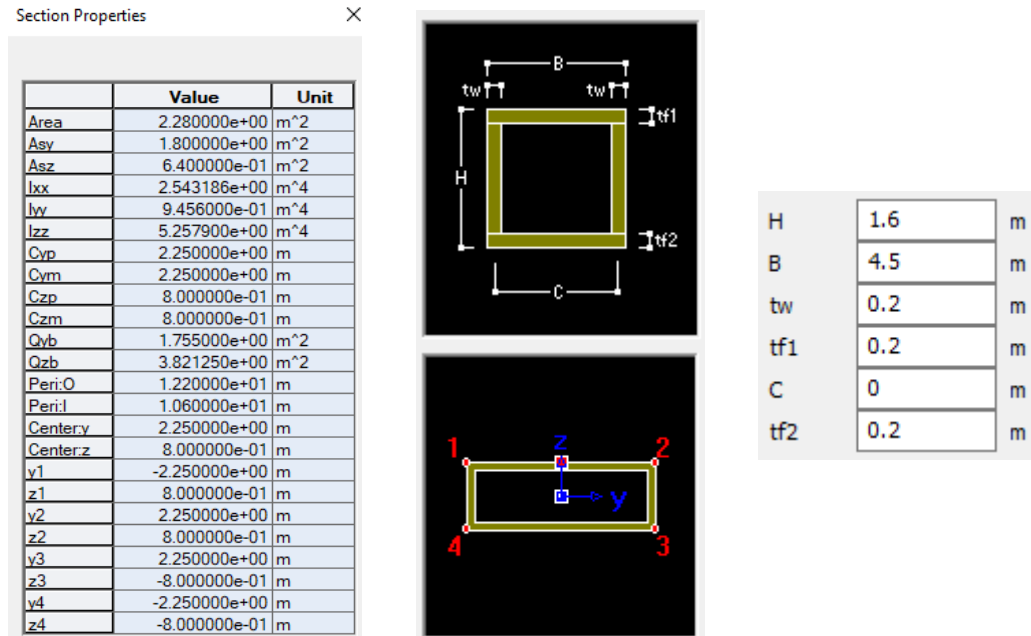


Imagen 91: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{6.6}$

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

Caso I: $f=L/5$

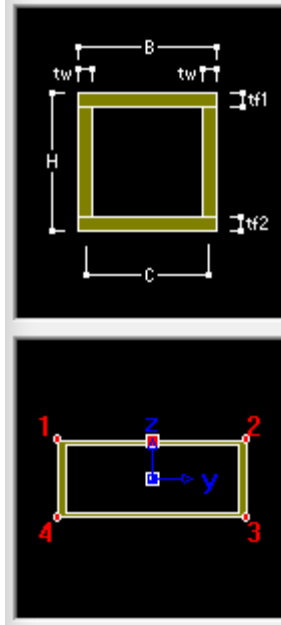
$$\text{Luz} := 100\text{r}$$

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

Section Properties

	Value	Unit
Area	1.711984e+00	m ²
Asy	9.996480e-01	m ²
Asz	8.034880e-01	m ²
Ixx	2.547315e+00	m ⁴
Iyy	9.762327e-01	m ⁴
Izz	5.261279e+00	m ⁴
Cyp	2.314000e+00	m
Cym	2.314000e+00	m
Czp	9.520000e-01	m
Czm	9.520000e-01	m
Qyb	1.419775e+00	m ²
Qzb	6.318951e+00	m ²
Peri:O	1.306400e+01	m
Peri:I	1.178800e+01	m
Center:y	2.314000e+00	m
Center:z	9.520000e-01	m
y1	-2.314000e+00	m
z1	9.520000e-01	m
y2	2.314000e+00	m
z2	9.520000e-01	m
y3	2.314000e+00	m
z3	-9.520000e-01	m
y4	-2.314000e+00	m
z4	-9.520000e-01	m

Close



H	1.904	m
B	4.628	m
tw	0.211	m
tf1	0.108	m
C	0	m
tf2	0.108	m

Imagen 92: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{5}$

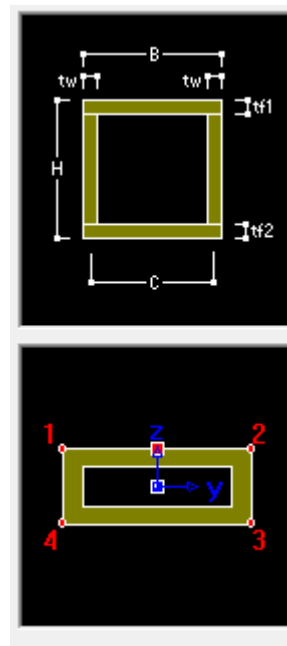
Caso II: $f=L/10$

$$\text{Luz} := 100\text{r}$$

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

Section Properties

	Value	Unit
Area	3.421412e+00	m ²
Asy	2.748654e+00	m ²
Asz	1.280682e+00	m ²
Ixx	2.542644e+00	m ⁴
Iyy	9.902886e-01	m ⁴
Izz	5.257973e+00	m ⁴
Cyp	1.903500e+00	m
Cym	1.903500e+00	m
Czp	7.605000e-01	m
Czm	7.605000e-01	m
Qyb	1.026486e+00	m ²
Qzb	2.600423e+00	m ²
Peri:O	1.065600e+01	m
Peri:I	7.528000e+00	m
Center:y	1.903500e+00	m
Center:z	7.605000e-01	m
y1	-1.903500e+00	m
z1	7.605000e-01	m
y2	1.903500e+00	m
z2	7.605000e-01	m
y3	1.903500e+00	m
z3	-7.605000e-01	m
y4	-1.903500e+00	m
z4	-7.605000e-01	m



H	1.521	m
B	3.807	m
tw	0.421	m
tf1	0.361	m
C	0	m
tf2	0.361	m

Imagen 93: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{10}$

Caso III: $L/f = 16$

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

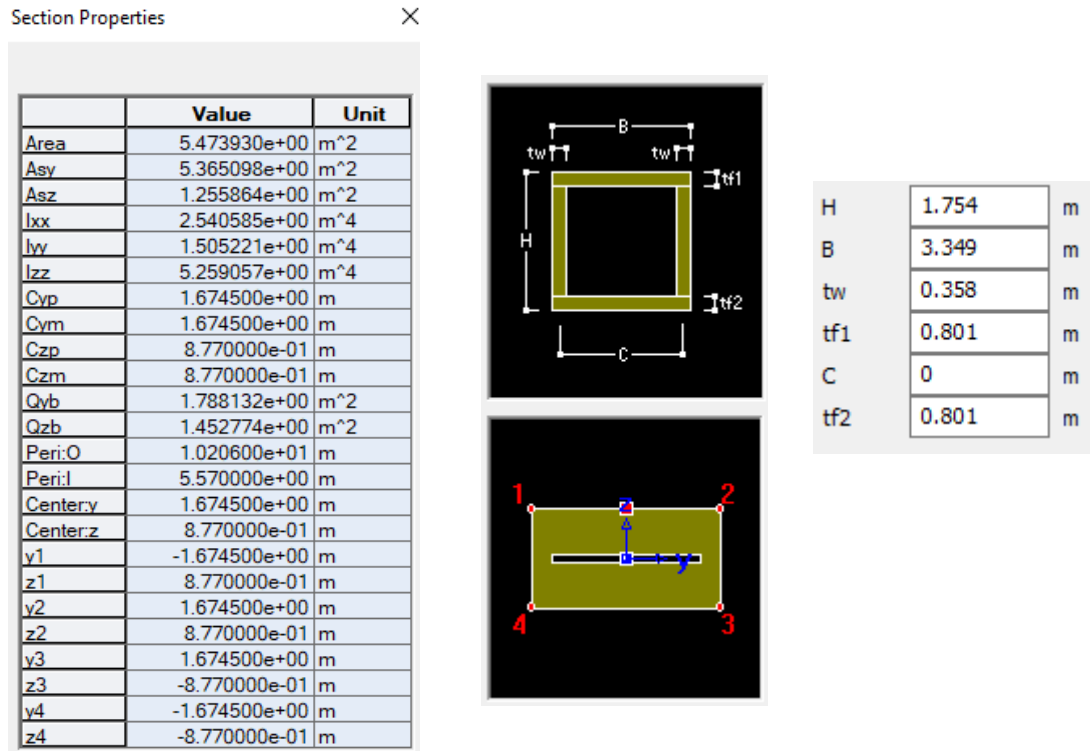


Imagen 94: Sección tipo del arco para $f = \frac{L}{16}$

4.2. Resultados**4.2.1. Caso 0: $f = \frac{L}{6.6}$** **Carga excéntrica:**

- Flechas transversales:

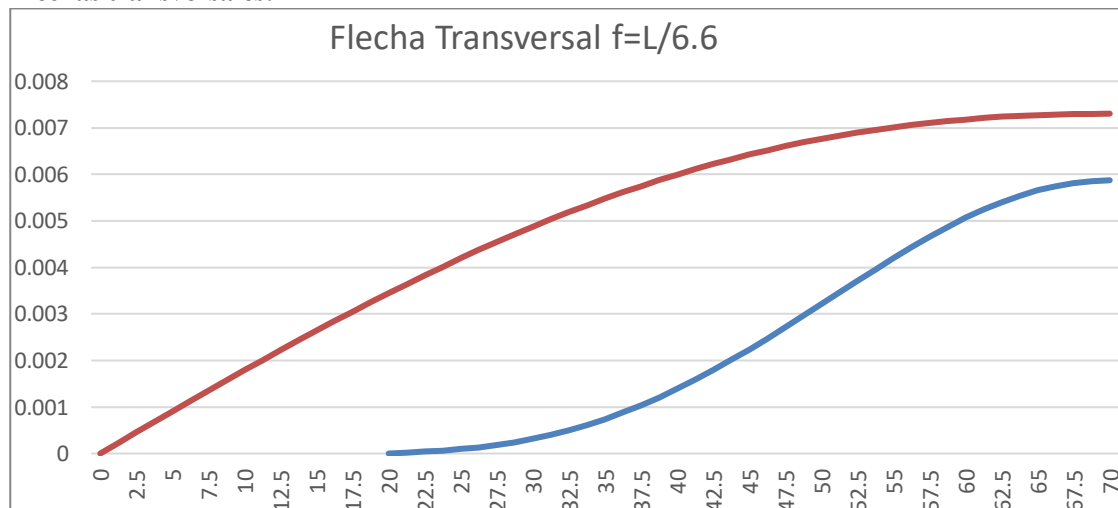


Imagen 95: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$

- **Momentos torsores:**

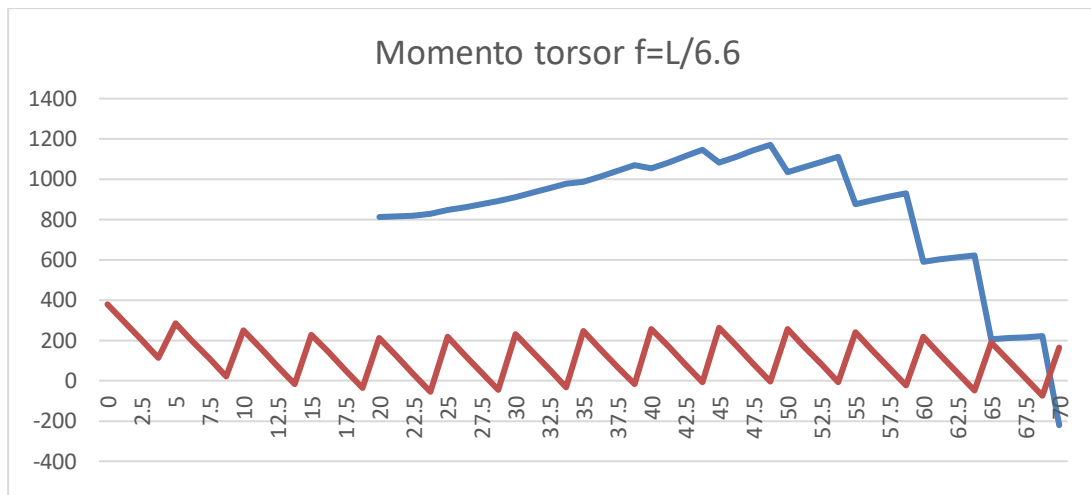


Imagen 96: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/6.6$

- **Cortantes transversales:**

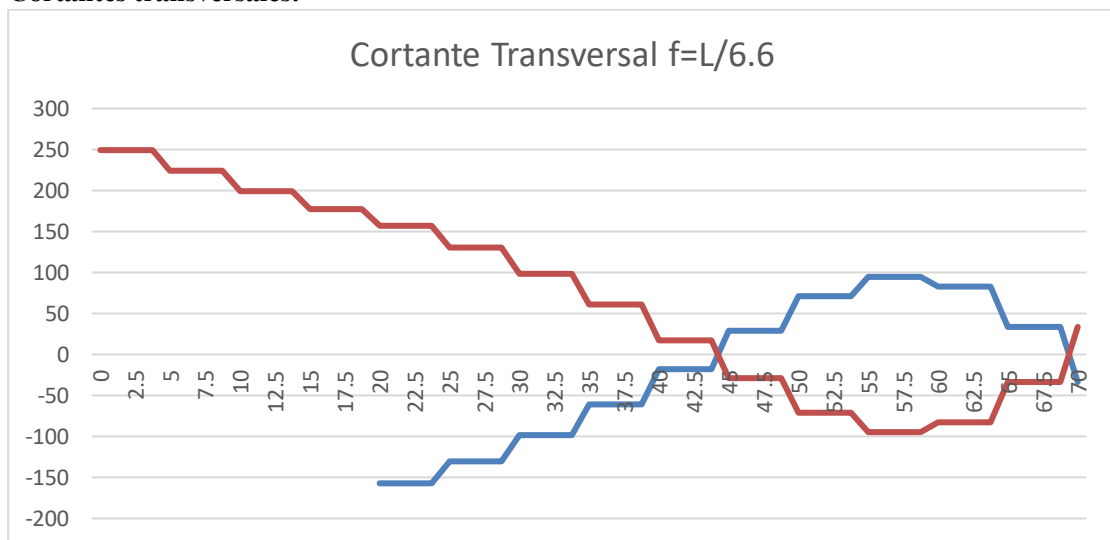


Imagen 97: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$

- **Flectores transversales:**

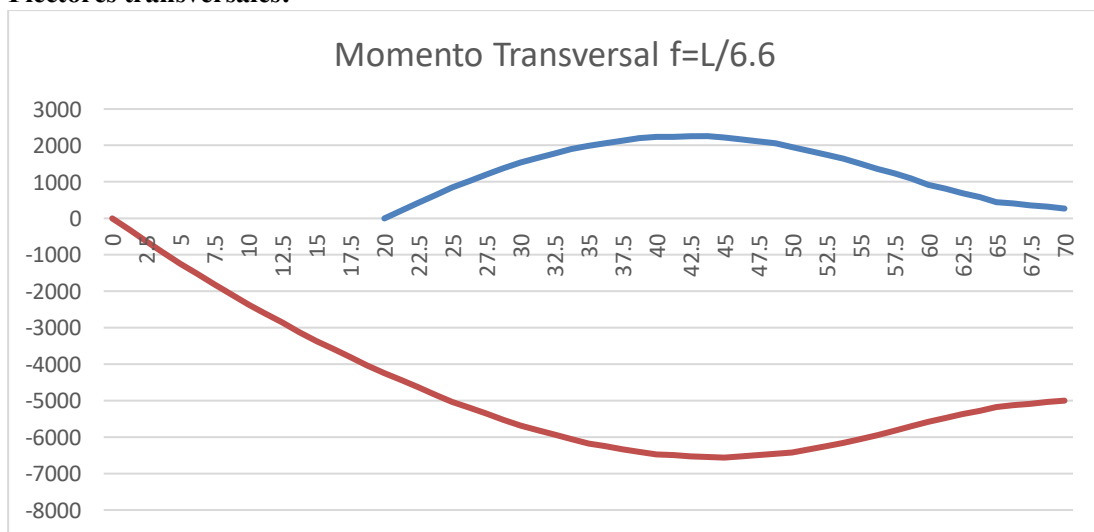


Imagen 98: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/6.6$

Carga transversal:

- **Flechas transversales:**

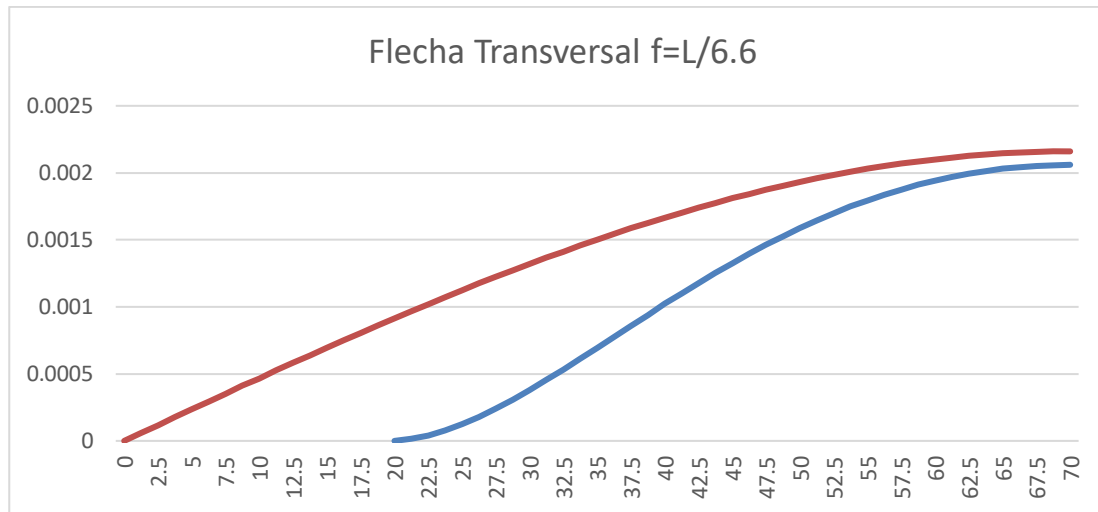


Imagen 99: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/6.6$

- **Momentos torsores:**

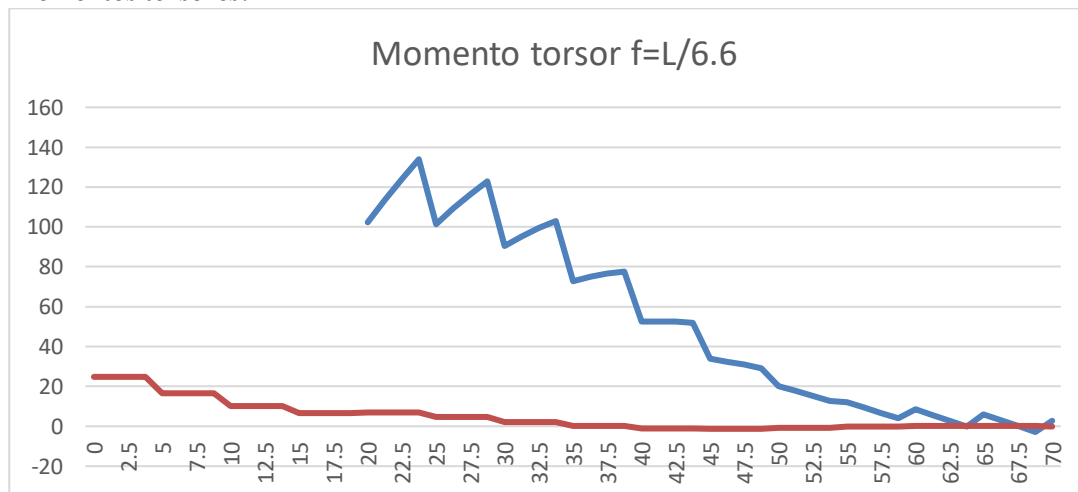


Imagen 100: Momento torsor ante carga transversal $f=L/6.6$

- **Cortantes transversales:**

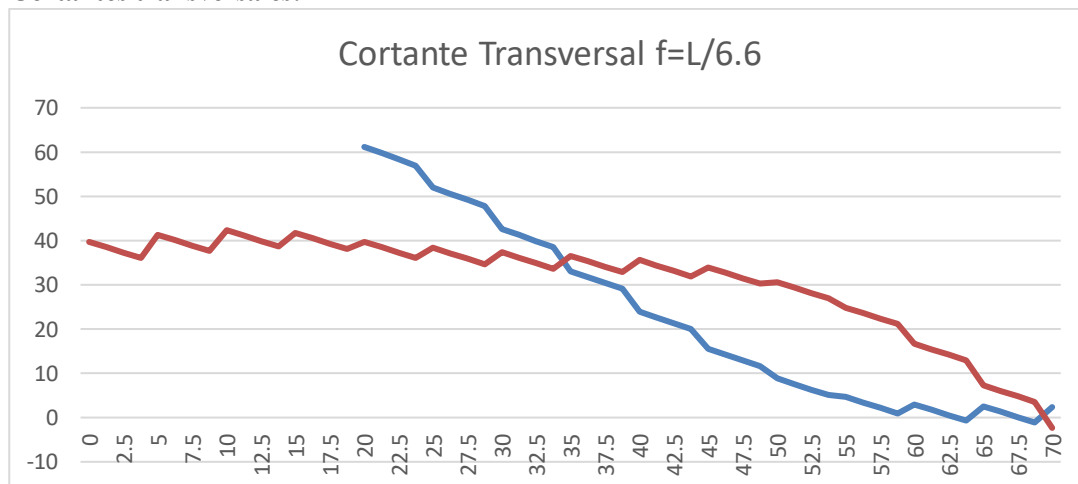


Imagen 101: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/6.6$

- **Flectores transversales:**

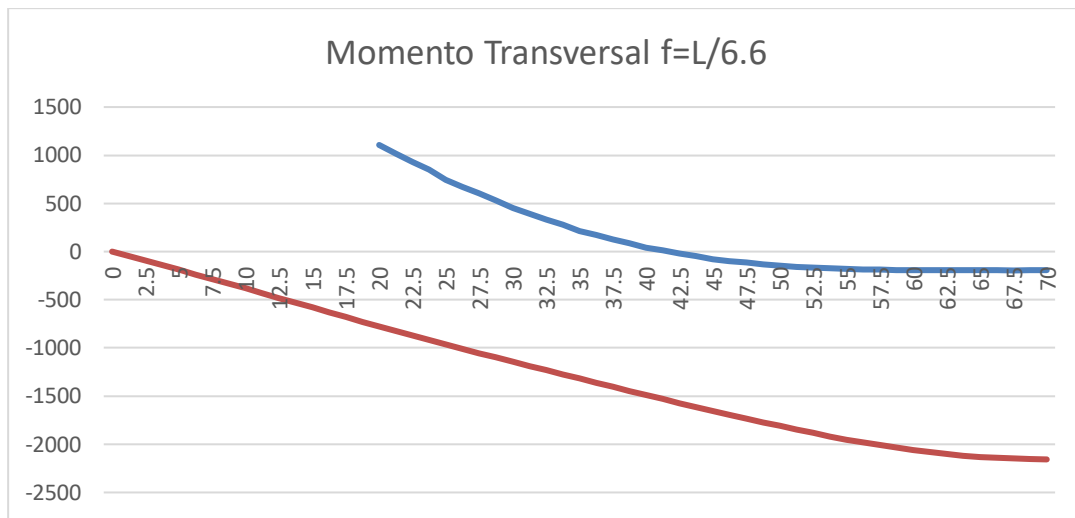


Imagen 102: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/6.6$

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

Carga excéntrica:

- **Flechas transversales:**

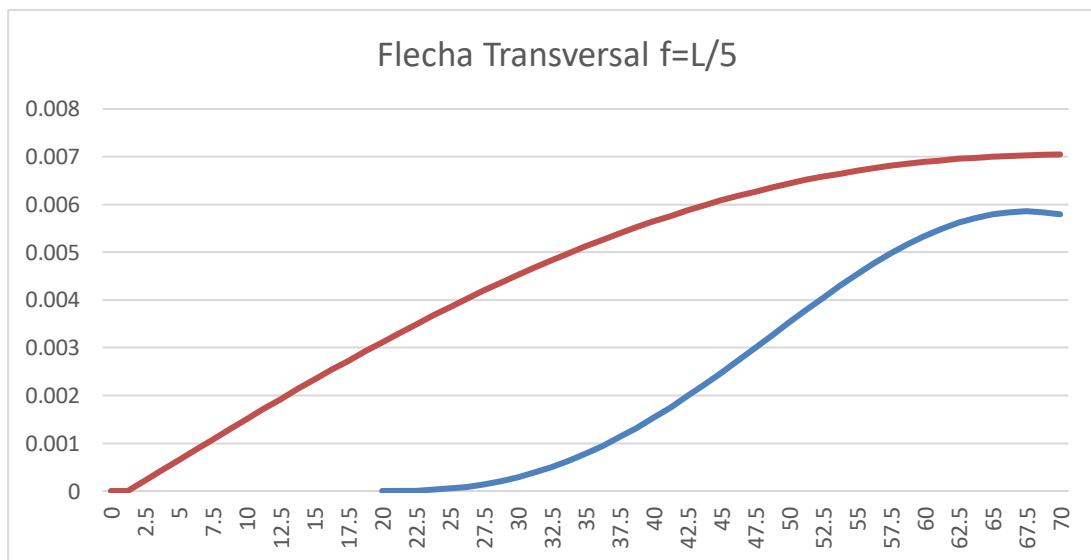


Imagen 103: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/5$

- **Momentos torsores:**

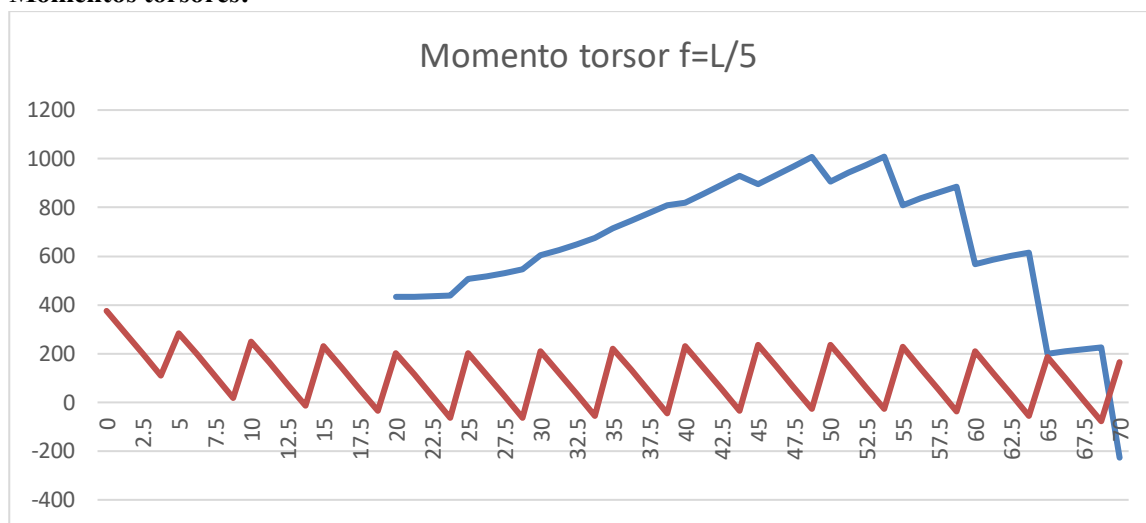


Imagen 104: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/5$

- **Cortantes transversales:**

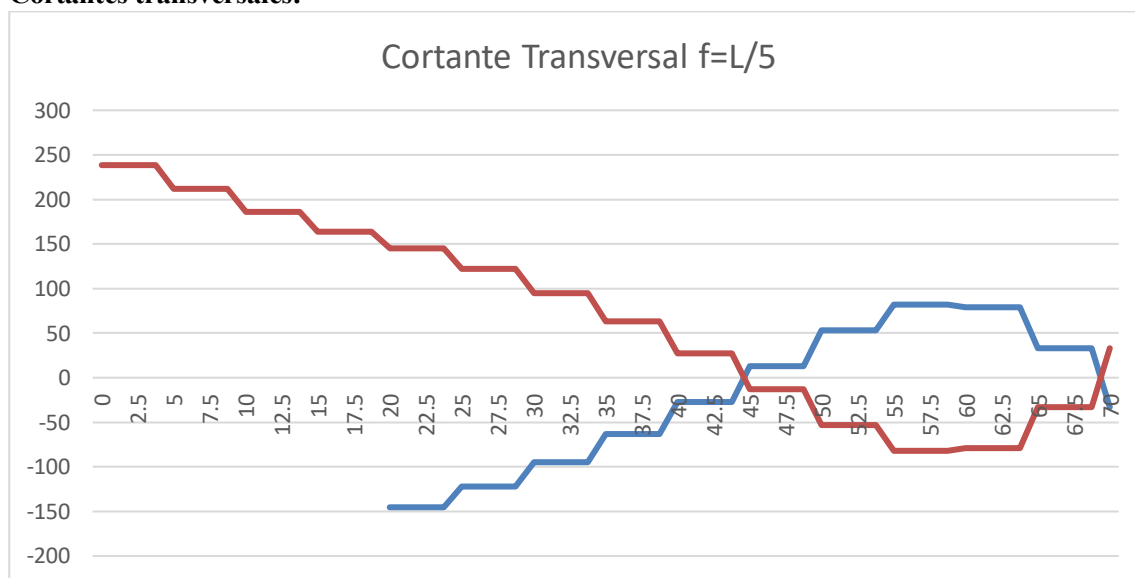


Imagen 105: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/5$

- **Flectores transversales:**

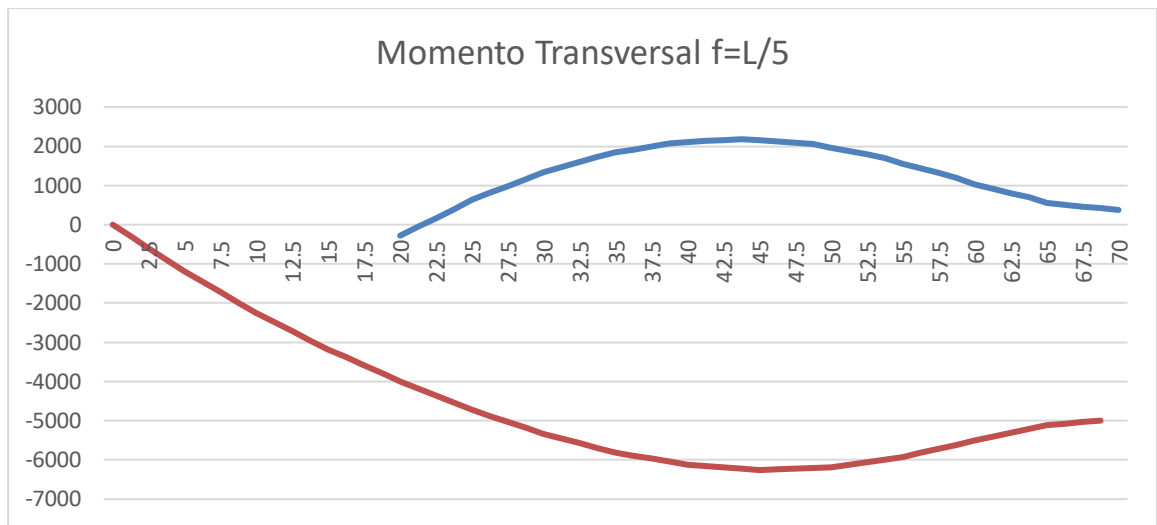


Imagen 106: Momentor flector transversal ante carga excéntrica $f=L/5$

Carga transversal:

- **Flechas transversales:**

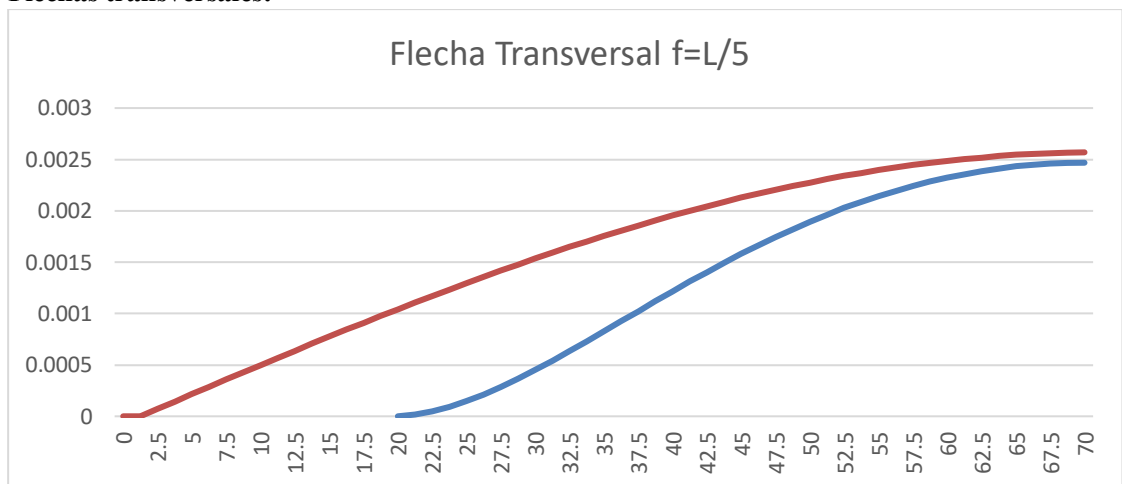


Imagen 107: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/5$

- **Momentos torsores:**

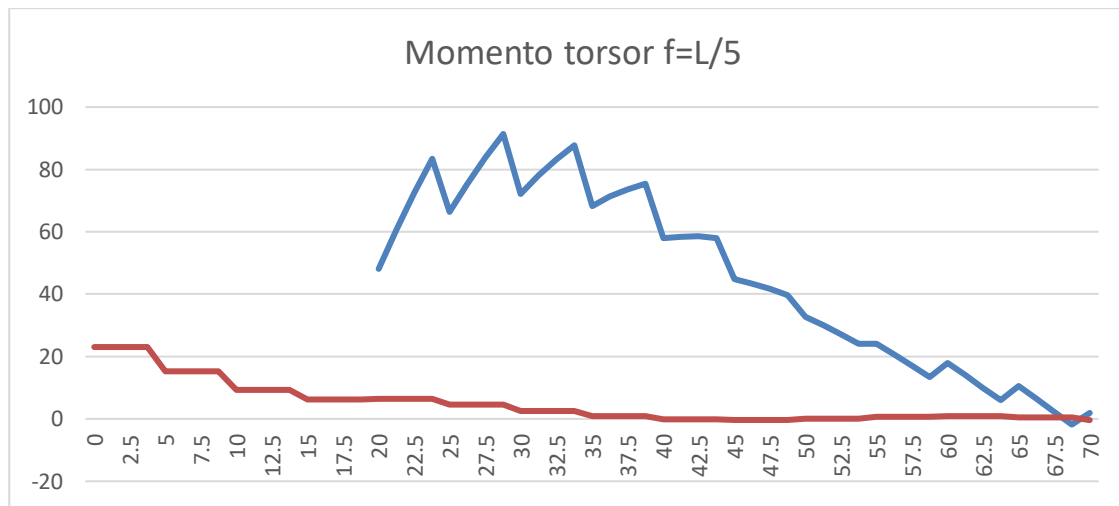


Imagen 108: Momento torsor ante carga transversal $f=L/5$

- **Cortantes transversales:**

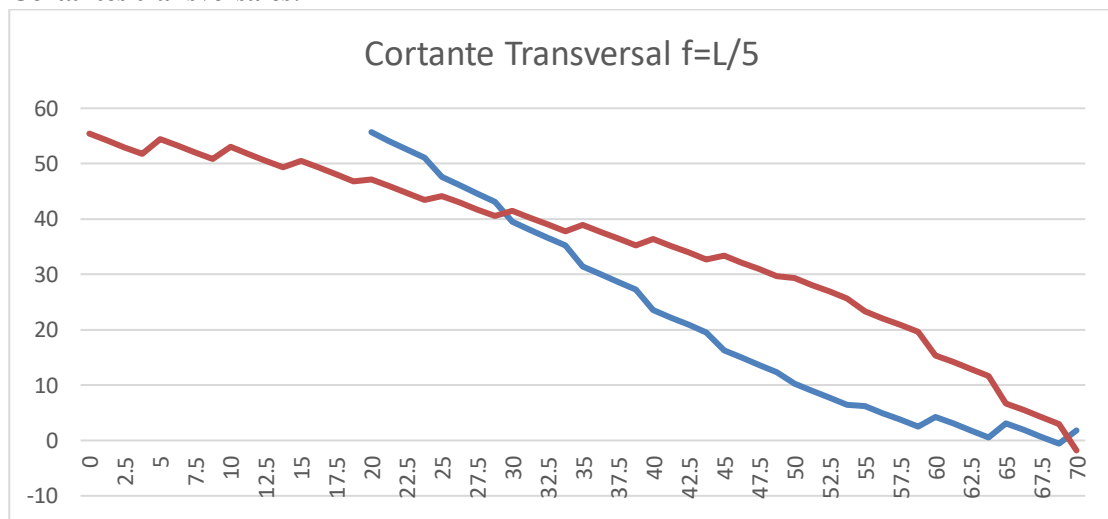


Imagen 109: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/5$

- **Flectores transversales:**

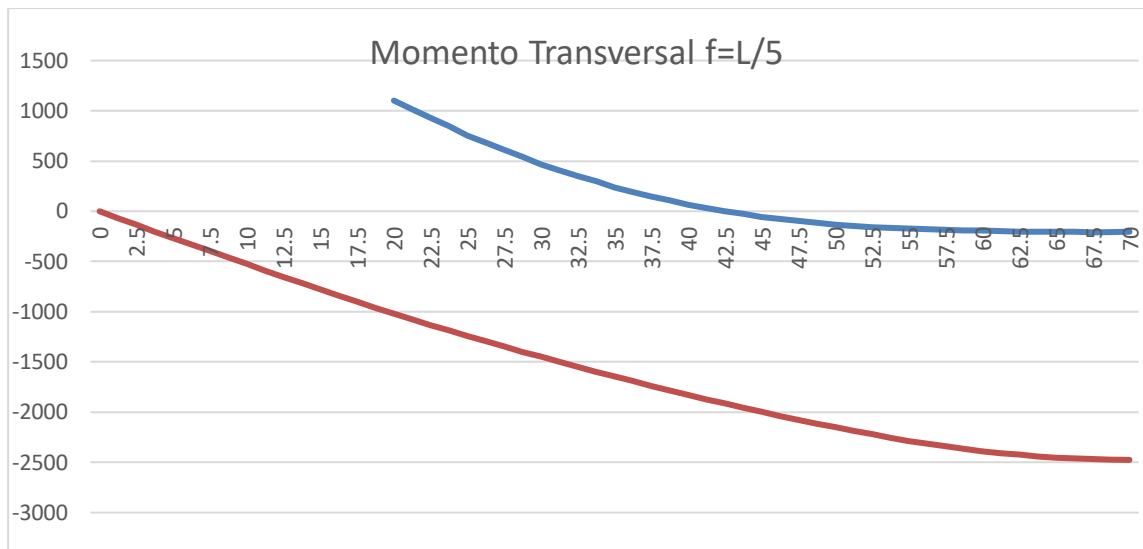


Imagen 110: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/5$

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

Carga excéntrica:

- **Flechas transversales:**

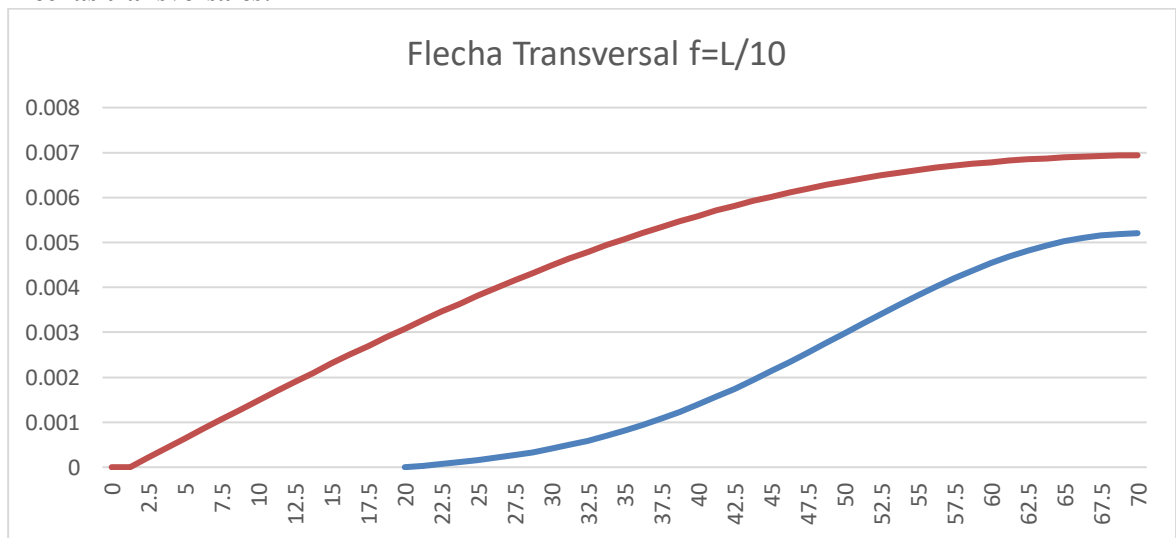


Imagen 111: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/10$

- Momentos torsores:**

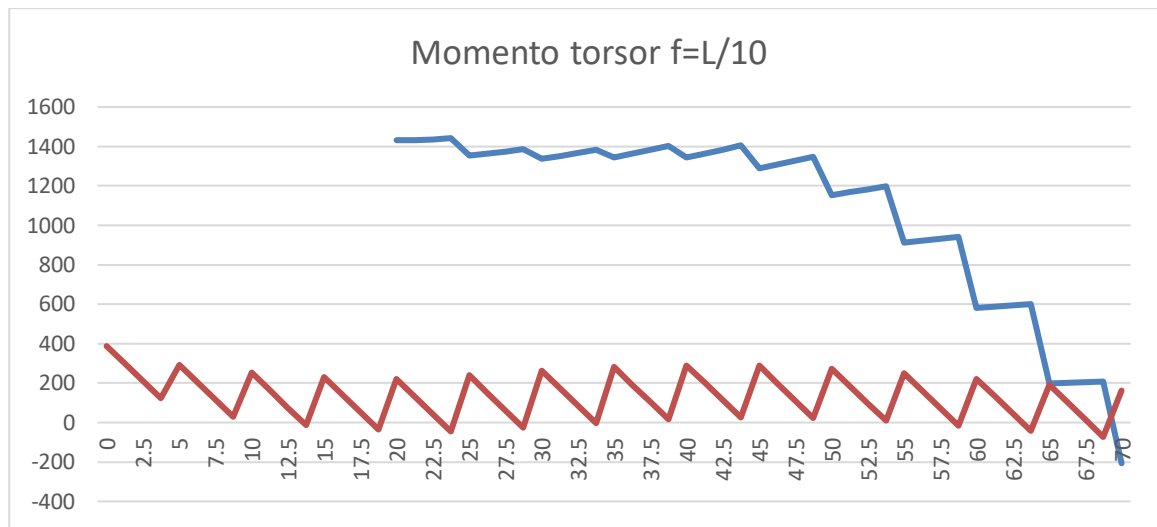


Imagen 112: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/10$

- Cortantes transversales:**

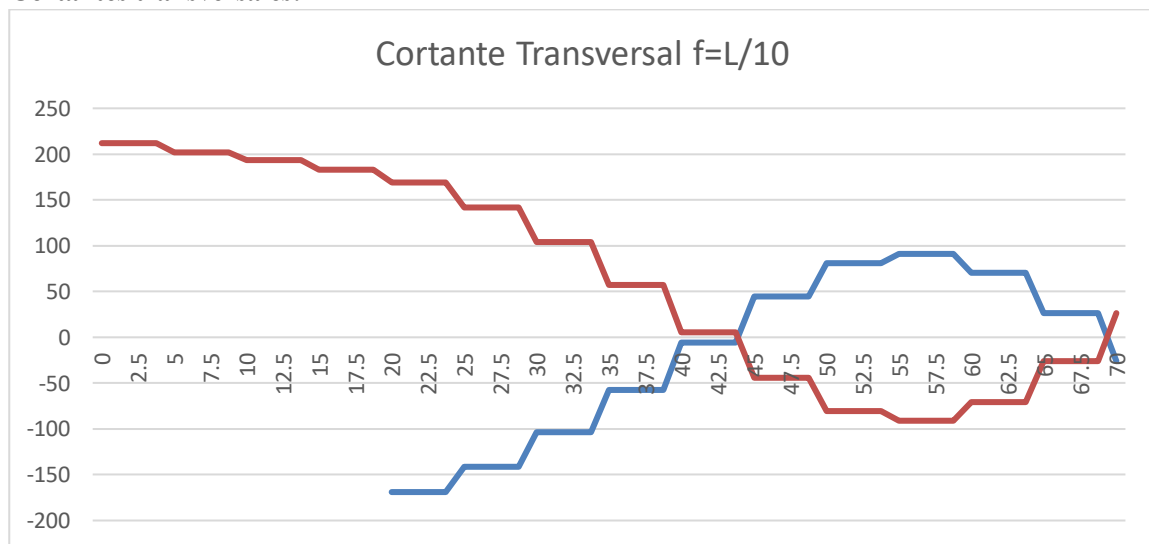


Imagen 113: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/10$

- **Flectores transversales:**

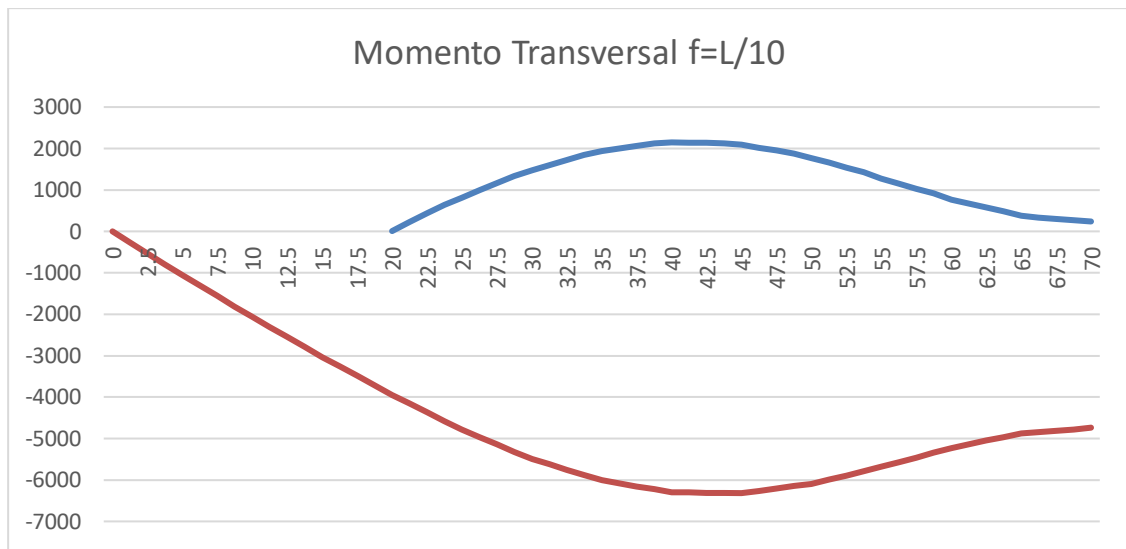


Imagen 114: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/10$

Carga transversal:

- **Flechas transversales:**

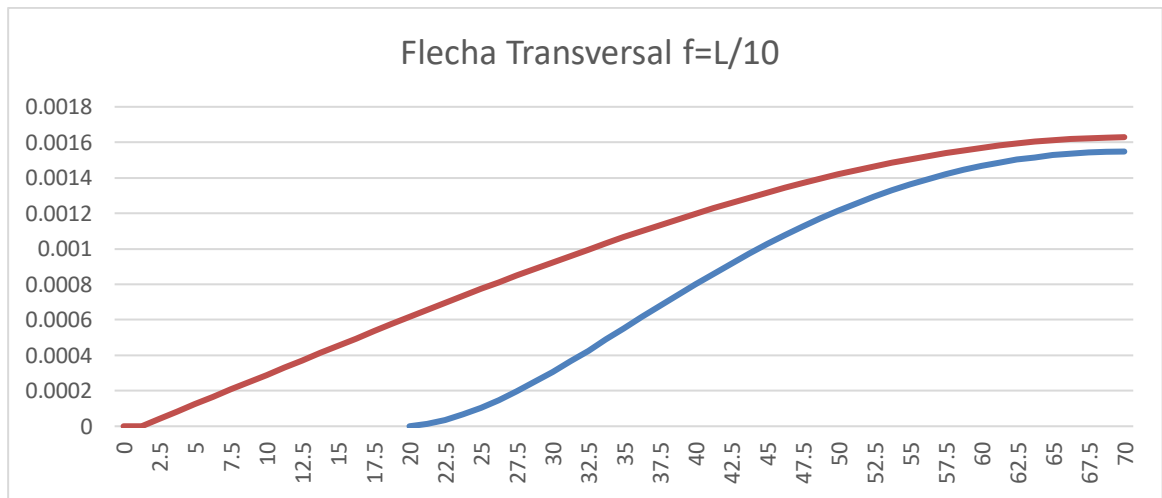


Imagen 115: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/10$

- Momentos torsores:**

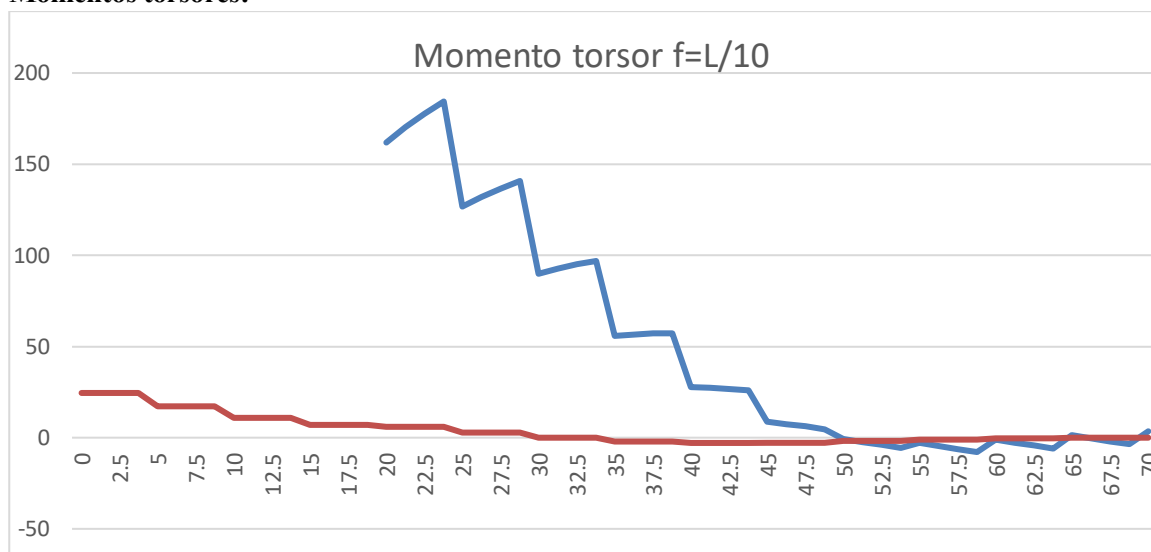


Imagen 116: Momento torsor ante carga transversal $f=L/10$

- Cortantes transversales:**

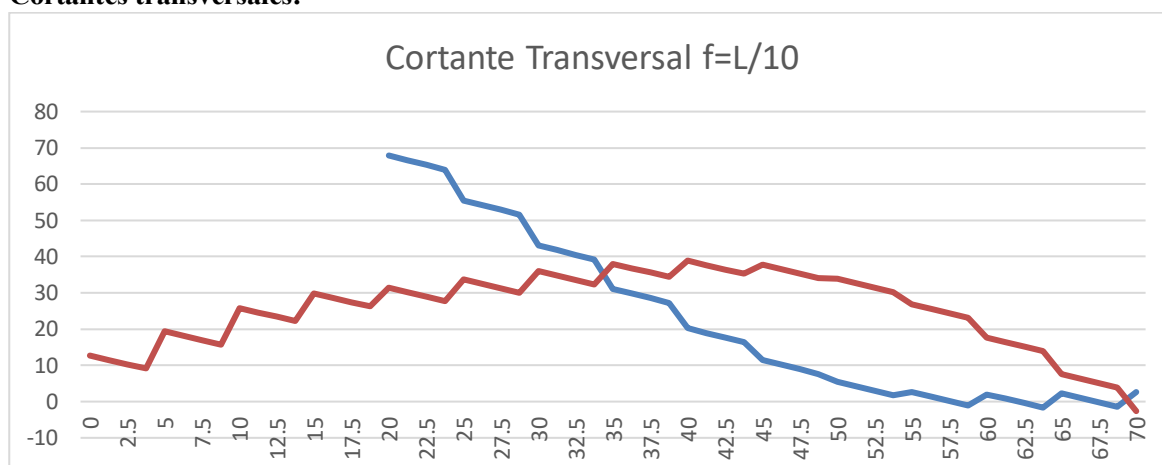


Imagen 117: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/10$

- Flectores transversales:**

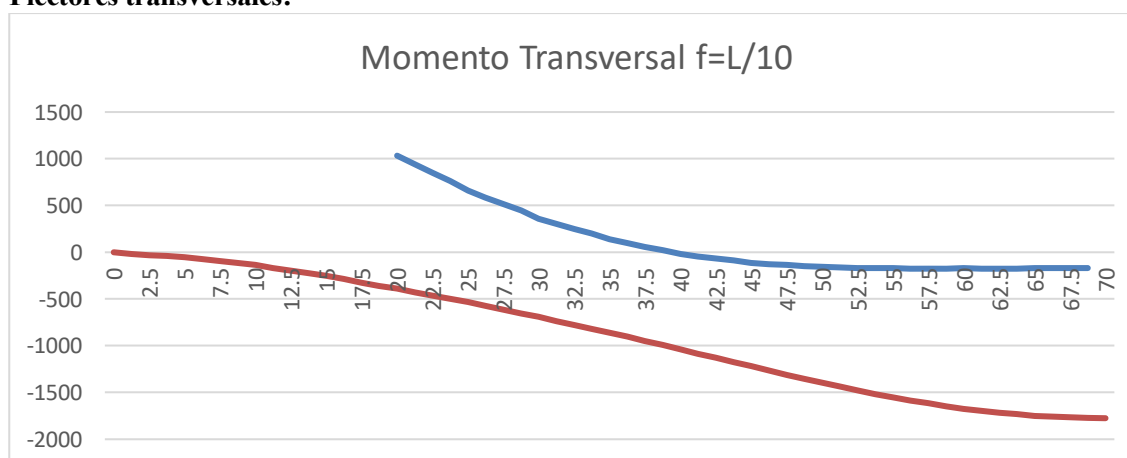


Imagen 118: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/10$

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

Carga excéntrica:

- **Flechas transversales:**

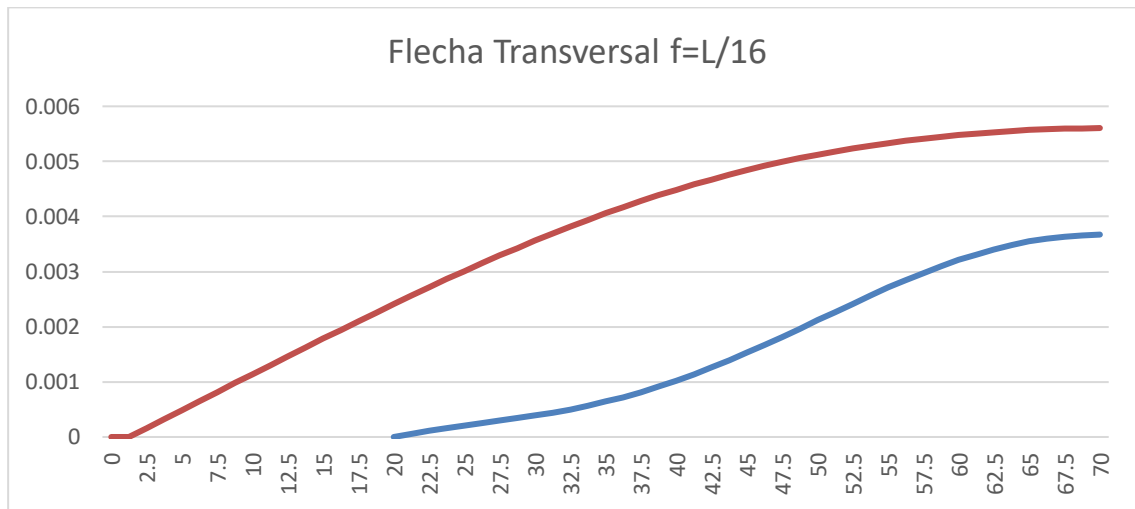


Imagen 119: Flecha transversal ante carga excéntrica $f=L/16$

- **Momentos torsores:**

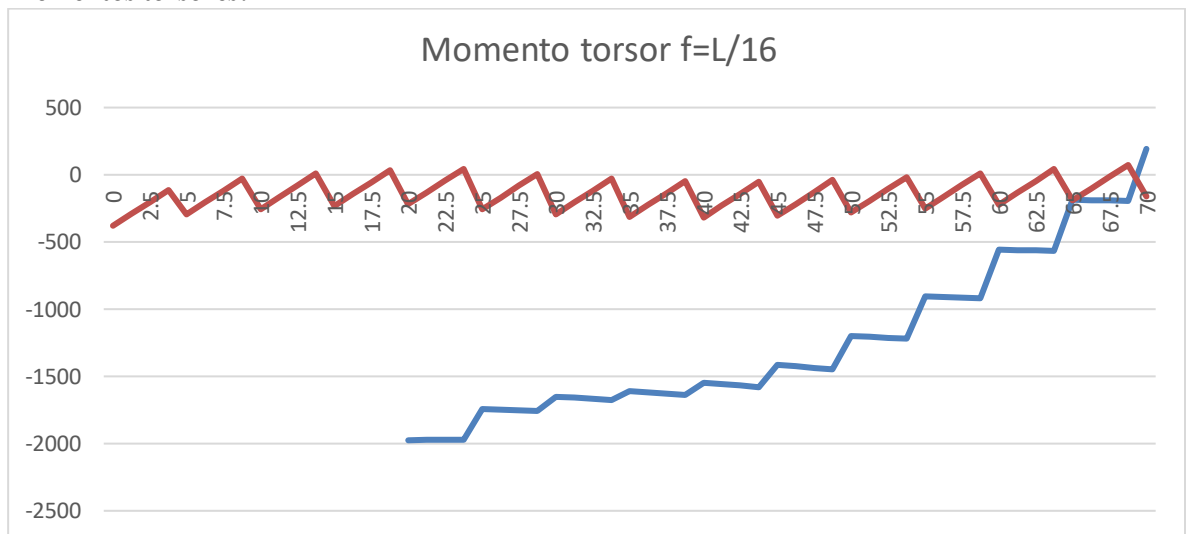


Imagen 120: Momento torsor ante carga excéntrica $f=L/16$

- Cortantes transversales:**

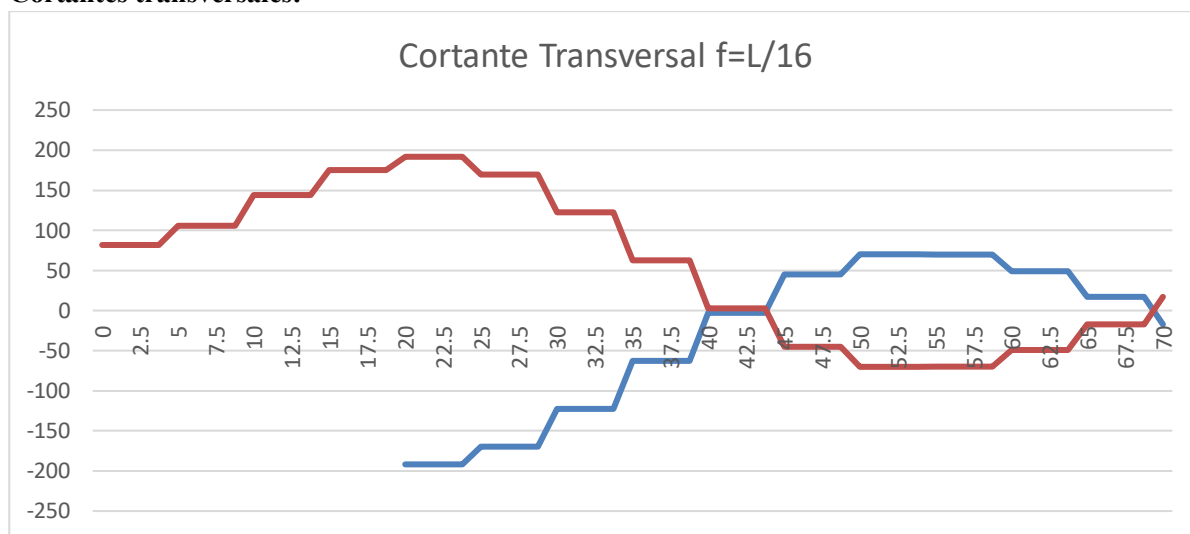


Imagen 121: Cortante transversal ante carga excéntrica $f=L/16$

- Flectores transversales:**

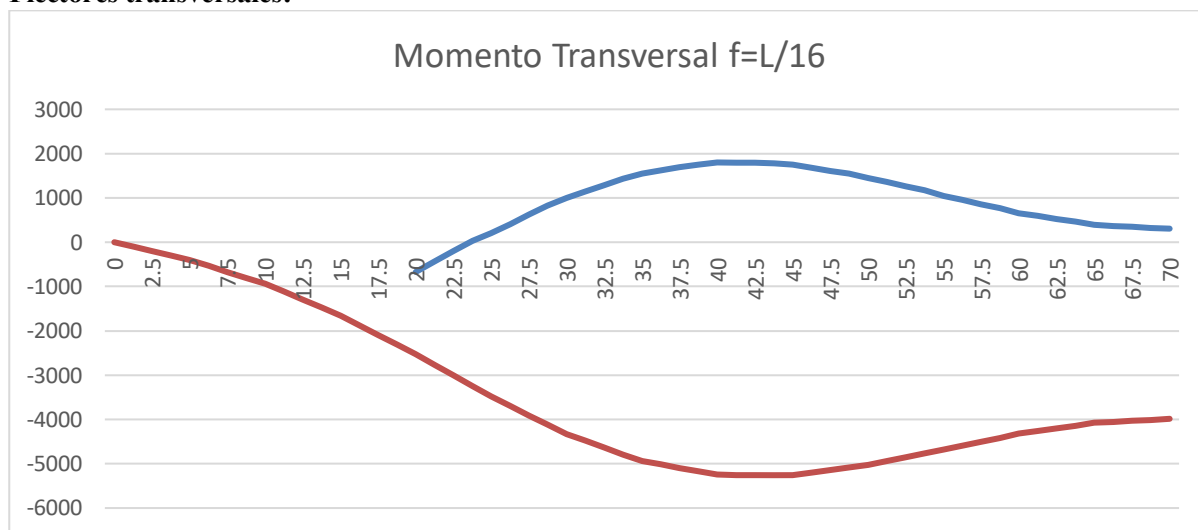


Imagen 122: Momento flector transversal ante carga excéntrica $f=L/16$

Carga transversal:

- **Desplazamientos transversales:**

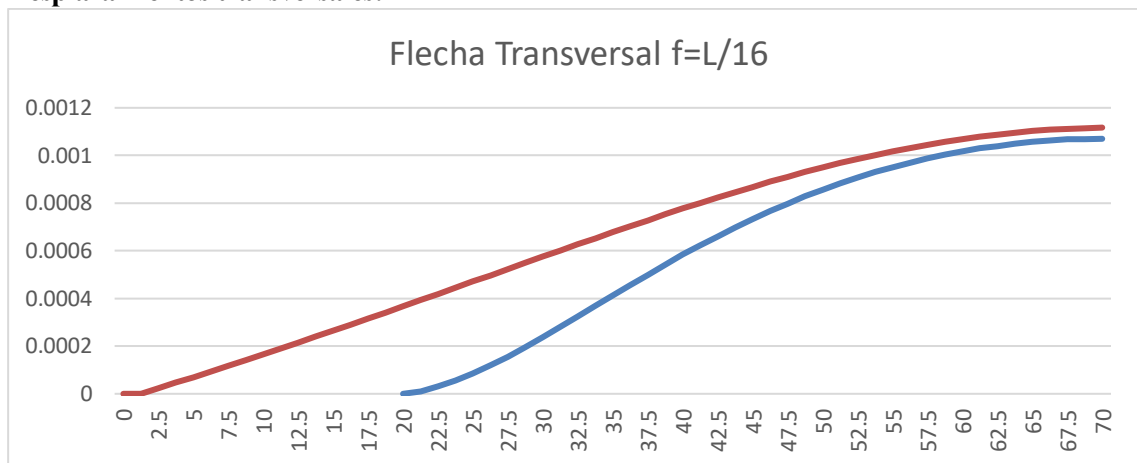


Imagen 123: Flecha transversal ante carga transversal $f=L/16$

- **Momentos torsores:**

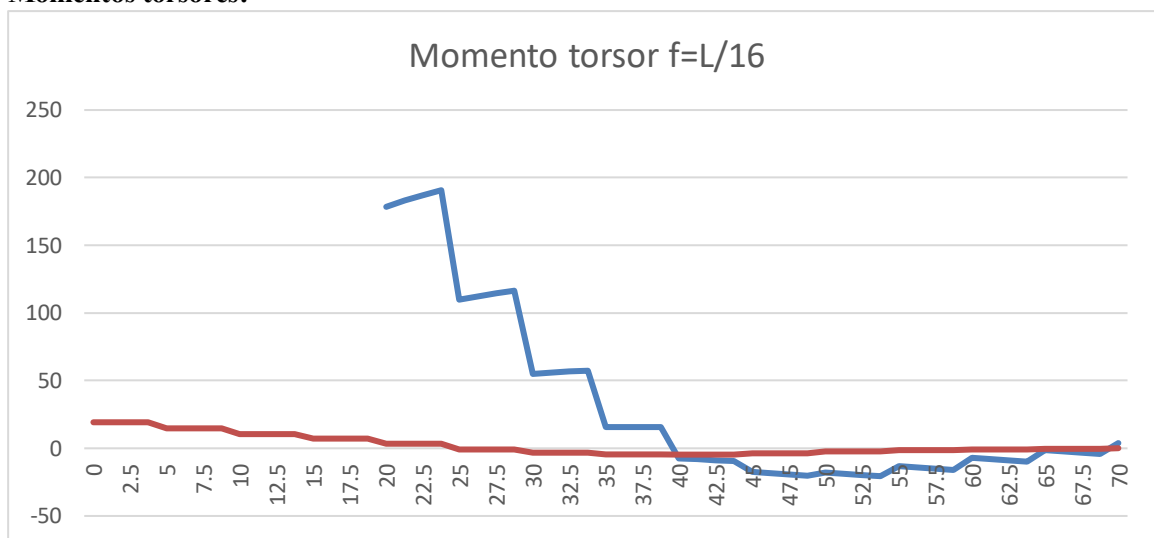


Imagen 124: Momento torsor ante carga transversal $f=L/16$

- Cortantes transversales:**

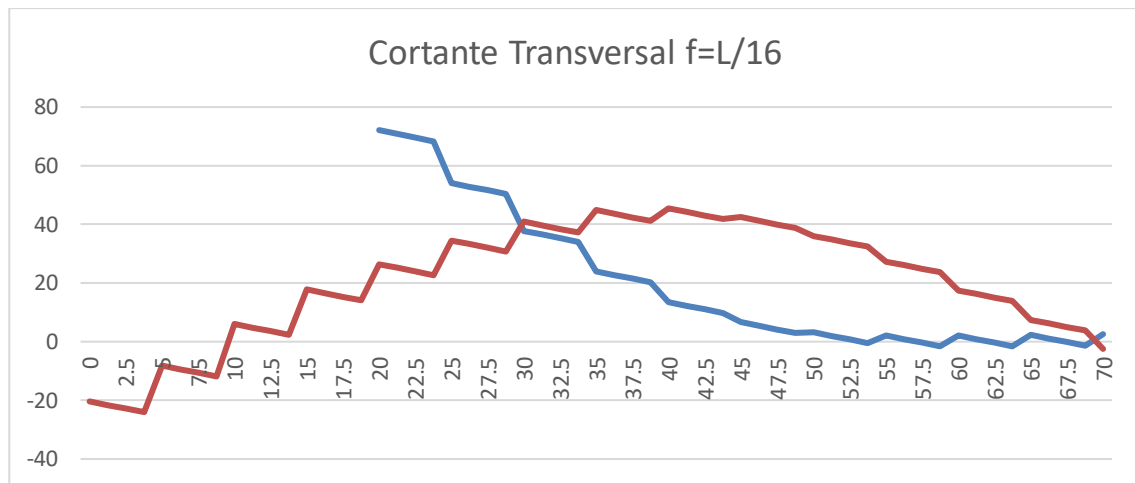


Imagen 125: Cortante transversal ante carga transversal $f=L/16$

- Flectores transversales:**

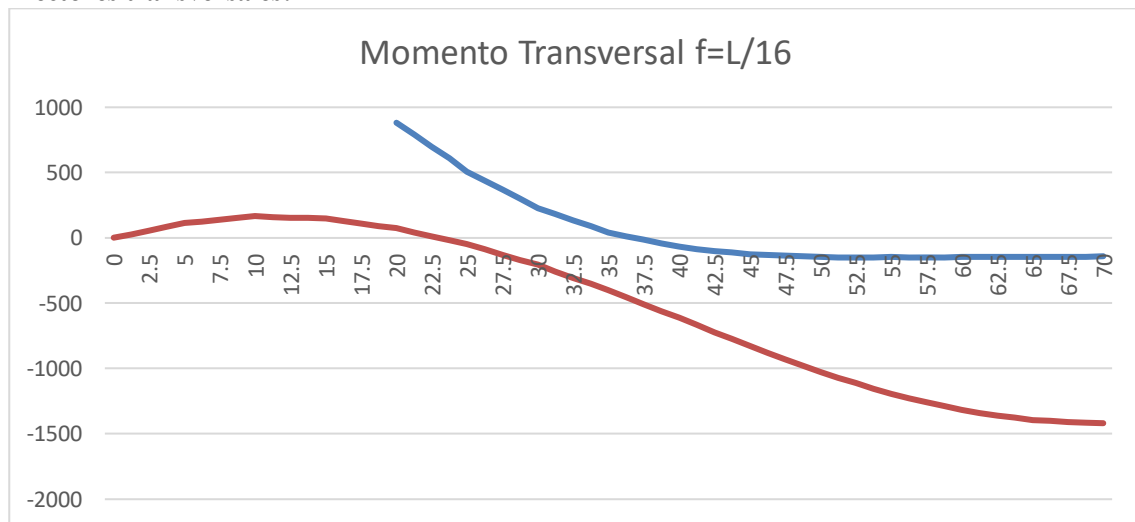


Imagen 126: Momento flector transversal ante carga transversal $f=L/16$

4.3. Análisis de resultados

4.3.1. Carga excéntrica:

- Desplazamientos transversales:**

El cambio de curvatura que se produce en los desplazamientos del arco tiene lugar más cerca de los arranques cuanto menor es la flecha, lo que se traduce en una disminución de la flecha en el centro del vano conforme disminuye la flecha. El resultado que nos sale en el arco es lógico, ya que a mayor flecha mayor desplazamiento tendremos por su mayor inestabilidad comparado con un arco de menor flecha.

Observando las curvas del tablero, se aprecia que no sucede como en el arco, que lo ideal fuese que el de mayor flecha tenga mayor desplazamiento. En nuestro caso, la relación $\frac{f}{L} = 6.6$ tiene mayor desplazamiento, consecutivo de $\frac{f}{L} = 10$, $\frac{f}{L} = 5$ y $\frac{f}{L} = 16$.

Las secciones elegidas, como bien describía en la introducción, explican que según el tipo de relación flecha/luz el tablero contribuye más o menos junto con el arco. En el caso de $\frac{f}{L} = 5$ el dintel contribuye cerca de un 60% y el arco un 40%; en $\frac{f}{L} = 6.6$ el dintel contribuye cerca de un 62% y el arco un 38%; en de $\frac{f}{L} = 10$ el dintel contribuye cerca de un 62% y el arco un 38% y en de $\frac{f}{L} = 16$ el dintel contribuye cerca de un 64% y el arco un 36%. En resumen, en el arco el de mayor relación flecha-luz contribuye más que el resto y así consecutivamente; en cambio, en el caso del tablero no sucede lo mismo, el de menor relación flecha-luz contribuye más y así hasta el de mayor relación flecha-luz.

CARGA EXCÉNTRICA					
f/L	5.00	6.60	10.00	16.00	m/m
flecha	20.00	15.15	10.00	6.25	m
Arco (X,0, Z)					
Dy	0.00273	0.002593	0.00239	0.00173	m
Dintel (X,0, Z)					
Dy	0.00394	0.00420	0.0040	0.00313	m
%Dy (arco)	40.87	38.19	37.61	35.54	%
%Dy (dintel)	59.13	61.81	62.39	64.46	%

Tabla 7: Comparación de los desplazamientos según la relación flecha-luz ante carga excéntrica

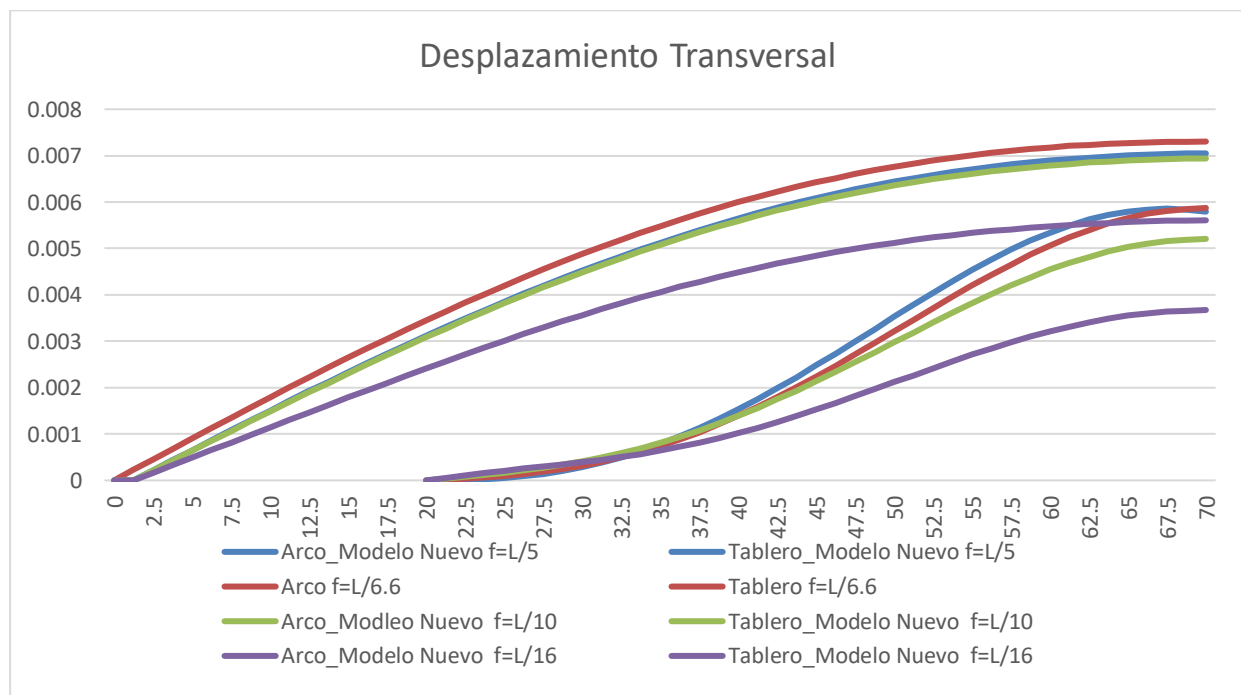


Imagen 127: Comparación de desplazamientos transversales según f/L ante carga excéntrica

- **Momentos torsores:**

En mi caso sucede lo mismo que a mi compañero Antonio, y como bien explicaba, es interesante destacar que los cuatro casos analizados, los momentos torsores en el arco tienden a mantenerse casi sin variación en la zona central del vano (entre $x=55$ y $x=70$, junto con su parte simétrica en la otra mitad del arco), esto ocurre porque, en la zona central del vano, las alturas de los pilares son bastante similares entre sí, a diferencia de lo que sucede cerca de los apoyos del arco. Debido a esta condición, los momentos torsores tienden a incrementarse cuando la flecha del arco es menor, ya que el efecto de las fuerzas cortantes se ve limitado al acortarse la distancia entre el tablero y el arco. En contraste, en el tablero los momentos torsores disminuyen, aunque de forma más leve, debido a su baja rigidez frente a torsión.

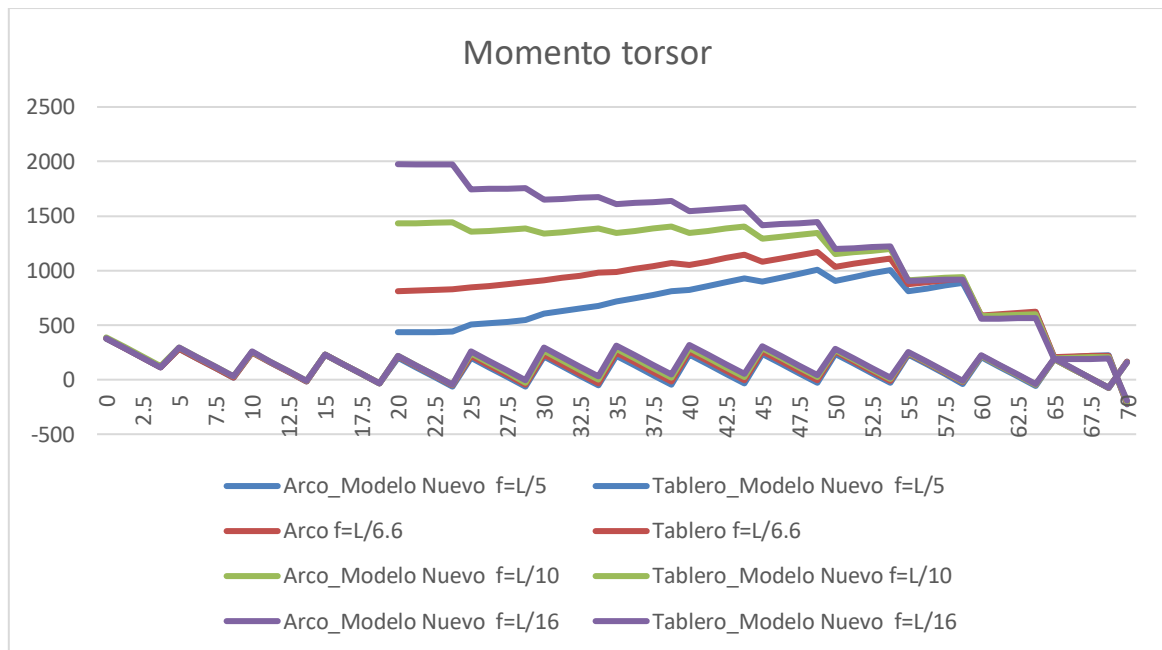


Imagen 128: Comparación de momento torsor según f/L ante carga excéntrica

- **Cortantes transversales:**

En los cuatro casos analizados, se observa que el cortante en el centro del vano, el arco permanece prácticamente constante, algo similar a lo que ocurre con los momentos torsores. Sin embargo, a medida que la flecha disminuye, se aprecia que el cortante cerca de los apoyos del arco también disminuye, lo cual tiene sentido: el arco pierde capacidad de canalizar esfuerzos verticales y gana en la generación de momentos torsores.

Este cambio se traduce en que el punto donde el cortante cambia de signo (es decir, donde se invierte el sentido de la fuerza cortante) se desplaza más cerca del arranque del arco cuanto menor es la flecha.

En cuanto al dintel, se observa un comportamiento similar: el cortante también disminuye ligeramente hacia los extremos al reducirse la flecha, lo que se explica por su baja rigidez a torsión, que hace que estos efectos sean menos notorios en comparación con el arco. No obstante, en el arranque de los estribos llama la atención de que la de mayor flecha $\frac{f}{L} = 5$ se encuentre entre $\frac{f}{L} = 6.6$ y $\frac{f}{L} = 10$ cuando lo lógico es que la de mayor flecha tenga mayor cortante transversal que el resto de los casos estudiados.

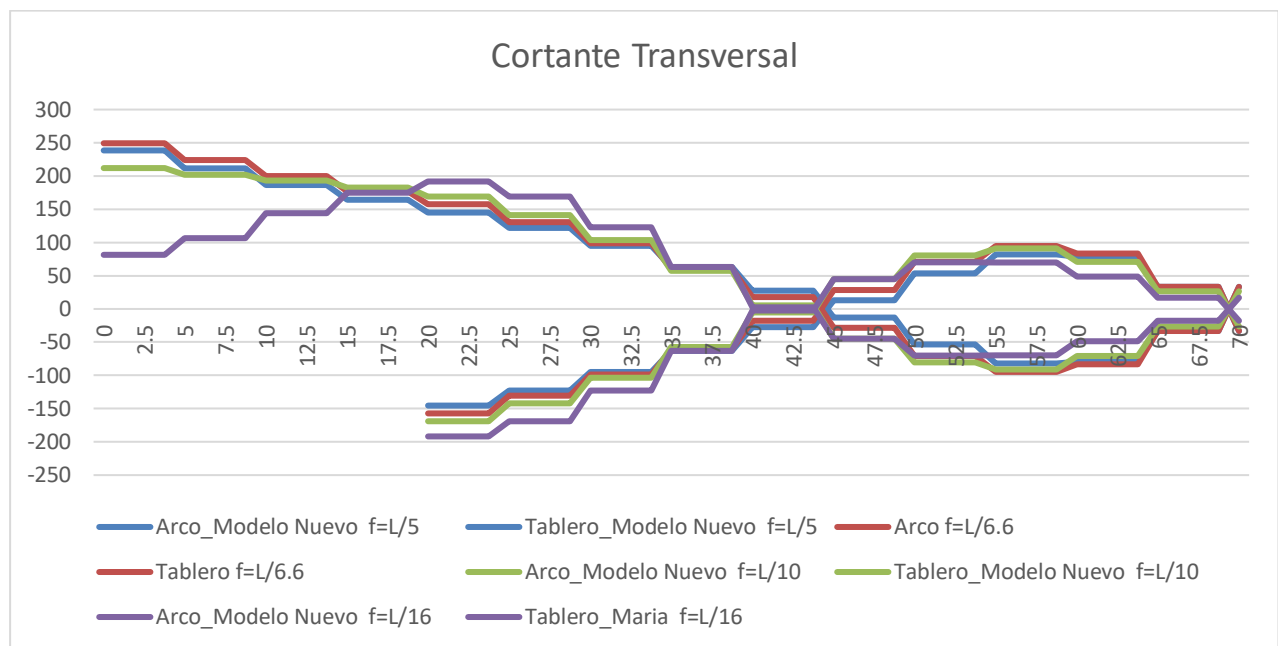


Imagen 129: Comparación de cortante transversal según f/L ante carga excéntrica

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.

Como podemos comprobar, la relación que se obtiene para el caso 0: $f = \frac{L}{6.6}$ corrobora los resultados obtenidos por J. Manterola. También podemos cerciorarnos de que el aumento de la flecha potencia aun más el efecto del esfuerzo de cortante, y como habíamos previsto la disminución de la flecha tiene el efecto contrario, llegando a invertirse la importancia de los esfuerzos en el caso III: $f = \frac{L}{16}$, donde la torsión resiste el 76% 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	122.35	130.70	141.62	169.34	kN
T	113.26	129.39	150.94	-169.62	kNm
Arco (26.25,0, Z)					
V	-122.35	-130.70	-141.62	-169.34	kN
T	517.03	860.18	1363.34	-1747.47	kNm
brazo	16.31	12.48	8.66	5.79	
Vtotal	244.70	261.40	283.24	338.68	kN
Tv	3991.55	3263.32	2451.73	1959.26	kNm
Tt	630.29	989.57	1514.28	1577.85	kNm
%T	14%	23%	38%	45%	%
%V	86%	77%	62%	55%	%

Tabla 8: Comprobación del efecto del esfuerzo cortante la relación flecha-luz ante carga excéntrica

- **Flectores transversales:**

En relación con los desplazamientos transversales que nos ha salido anteriormente, obtenemos unos momentos transversales no tan esperados. Se aprecia que el porcentaje del momento soportado por el tablero rondan el 70%, mostrando su desventaja frene al arco. A mayor flecha mejora el comportamiento estructural del arco, ya que transfiere mejor los momentos al arco y alivia al tablero, pero, aun así, en todos los casos de estudios rondan el 30%. Esto puede explicar que las curvas $\frac{f}{L} = 6.6$ y $\frac{f}{L} = 10$ no estén entre las curvas $\frac{f}{L} = 5$ y $\frac{f}{L} = 16$ y que los momentos transversales en $\frac{f}{L} = 16$ son significativamente más pequeños en el que en el tablero y un poquito más pequeño en el arco.

CARGA EXCÉNTRICA					
f/L	5.00	6.60	10.00	16.00	m/m
flecha	20.00	15.15	10.00	6.25	m
Arco (X,0,Z)					
Mz	1301.53049	1359.61	1258.83	947.07	m
Dintel (X,0,Z)					
Mz	3000.59	3129.77	2967.88	2301.22	m
%Mz (arco)	30.25	30.29	29.78	29.16	%
%Mz (dintel)	69.75	69.71	70.22	70.84	%

Tabla 9: Comprobación del momento transversal según la relación flecha-luz ante carga excéntrica

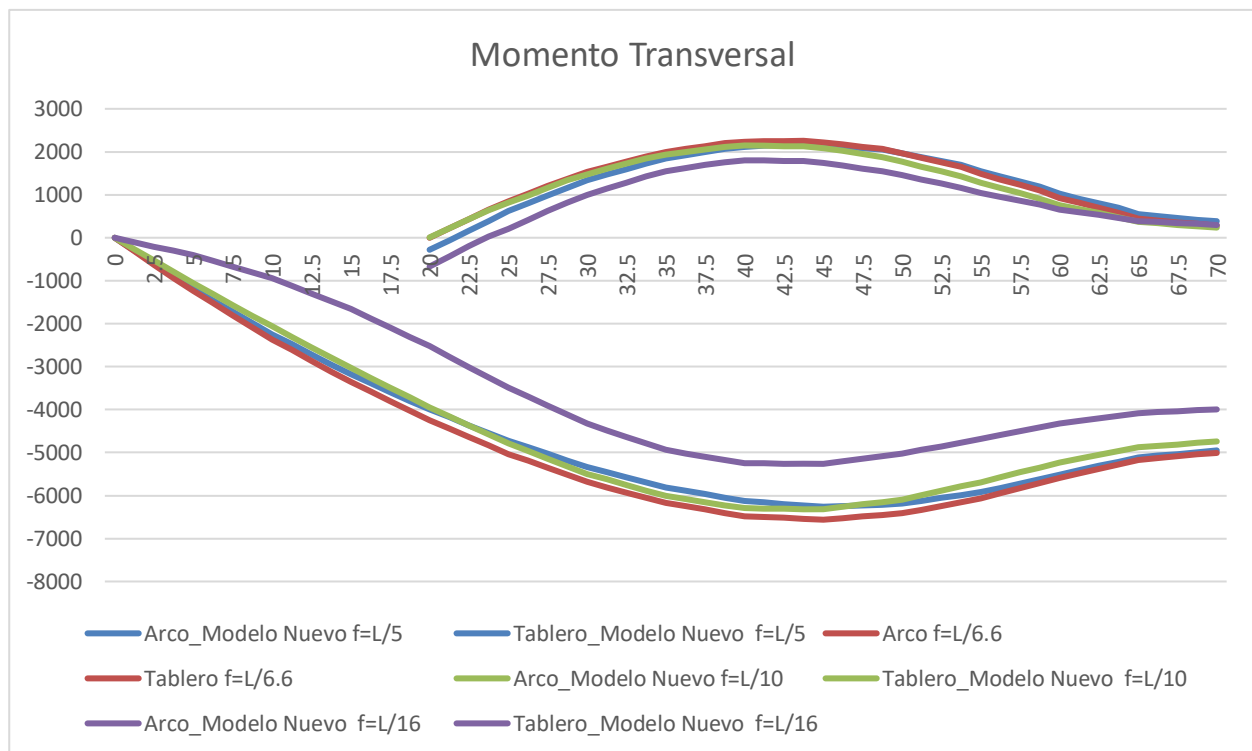


Imagen 130: Comparación de momento transversal según f/L ante carga excéntrica

4.3.2. Carga transversal:

A continuación, se va a estudiar cómo influye la carga de viento en la relación flecha/luz. Se sabe que la carga de viento influye directamente en el diseño de la relación flecha-luz ya que un arco más alto implica mayor exposición y momentos laterales por viento.

- **Desplazamientos transversales:**

Como se puede apreciar, ocurre en este caso lo que uno realmente espera y es que los desplazamientos transversales van disminuyendo considerablemente cuanto menor es la flecha respecto la luz. Las curvas de $L/5$, tanto el arco como el tablero alcanzan mayor desplazamiento transversal, esto indica que el arco con mayor flecha es más flexible transversalmente, lo que permite mayores deformaciones. La diferencia entre arco y tablero es pequeña, lo que sugiere buena conexión estructural entre ambos, como ocurre en el resto de los casos.

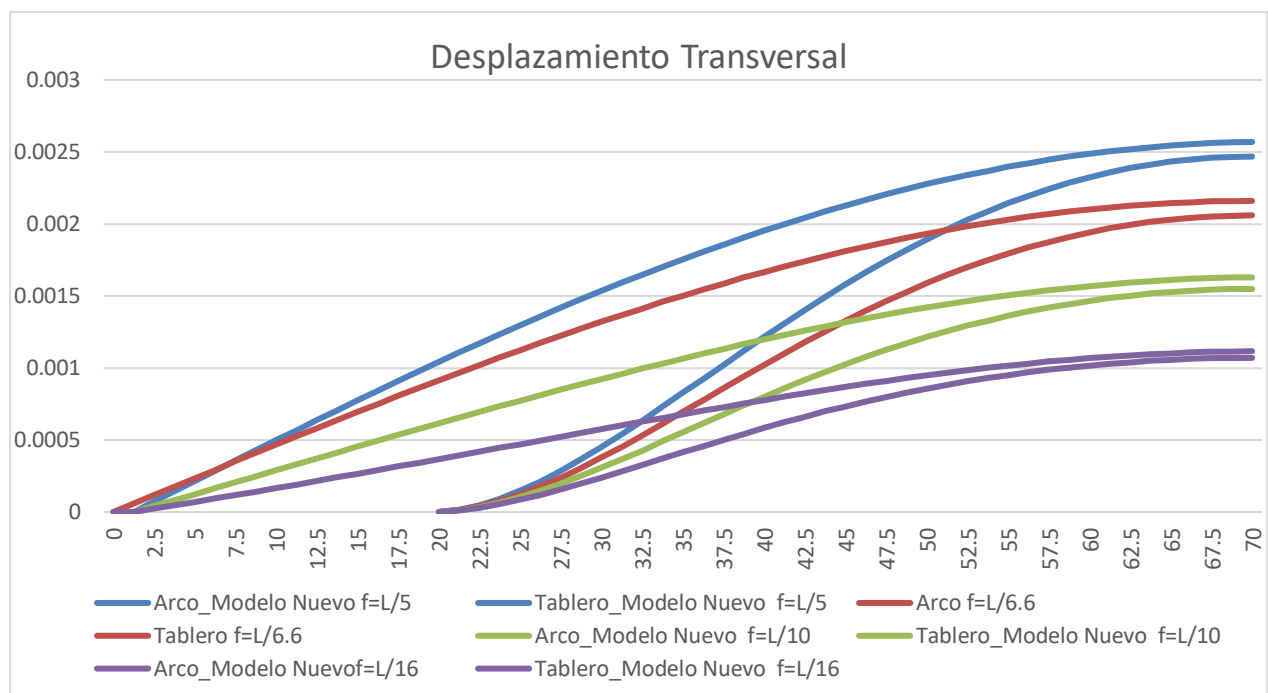


Imagen 131: Comparación de desplazamientos transversales según f/L ante carga transversal

- **Momentos torsores:**

Como bien explicaba mi compañero Antonio en la primera parte, me sucede lo mismo, es decir, la ley de momentos torsores establece que, mientras actúa el par de fuerzas, su efecto tiende a anularse en el tablero, siendo el esfuerzo cortante transversal el encargado de equilibrar las acciones de torsión. En el dintel se observa que los esfuerzos de torsión se intensifican cerca de los estribos, a medida que la flecha crece, y disminuyen cuando la flecha se reduce. Los diagramas de esfuerzos evidencian que el par de fuerzas va perdiendo influencia conforme la flecha disminuye, provocando que los esfuerzos de torsión en el arco se incrementen a medida que la flecha se hace menor.

Como bien decía antes, la torsión en el arco aumentaba cuando la flecha disminuía, pero se puede apreciar como en el caso de $f = \frac{L}{16}$ tiene una brusca caída en comparación con el resto de caso. El momento torsor $f = \frac{L}{16}$ incluso cambia de signo, es decir, es más bajo ahí, esto es porque si vemos la gráfica de los cortantes, apreciamos que los cortantes las dos líneas de cortante del tablero y el arco están más separadas. Como se puede ver, la línea (“Series”) que va desde el punto del centro de abajo

a la derecha hasta donde se interseccionan todas las curvas, esa línea es el cortante total y ahora, la diferencia entre la línea que pasa por encima y la línea que pasa por debajo es la diferencia de cortante del tablero y del arco que producen el torsor, entonces esa diferencia es más grande con

$f = \frac{L}{16}$ que en las demás porque el torsor está absorbiendo el cortante desequilibrado que es mucho más grande en $f = \frac{L}{16}$ que en los demás. Tanto es el torsor que está absorbiendo el cortante desequilibrado, que el torsor en el arco es cero (negativo), y esto es por la diferencia entre esas dos curvas.

Si bien la estructura responde como se ha descrito, debe tenerse en cuenta que la sollicitación torsora disminuye al reducirse la flecha. Esto genera una oposición entre el incremento de la torsión en el arco, como consecuencia de la absorción de la sollicitación, y la disminución del valor de dicha sollicitación debido a la geometría de la estructura.

Nuevamente, se realizará el mismo estudio que realizó Antonio, pero con los datos nuevos obtenidos. A continuación, se mostrará una tabla donde se reflejarán los valores del cortante y torsor tanto del tablero como del arco, en todos los casos estudiados de relación flecha-luz; también se indicará la sección que se ha estudiado (mismas que Antonio) de cada estructura; del brazo que posibilita el mecanismo que hace que el par de fuerzas colabore en la resistencia a torsión; valor del cortante total (suma del cortante en arco y dintel) y otros dos valores de cortante que explicaremos en adelante; 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 mostrados en la tabla permiten entender por qué, en el caso III ($f = L/16$), el valor del torsor en el arco disminuye respecto al caso II ($f = L/10$), a pesar de que la tendencia general parecía ser creciente. Esta aparente contradicción se debe a que, si bien al reducir la flecha aumenta la importancia relativa del esfuerzo torsor, la sollicitación total que debe resistirse disminuye de forma más significativa. De hecho, observamos una reducción del torsor desde 1120,74 kNm en el caso I ($f = L/5$) hasta 483,62 kNm en el caso III ($f = L/16$). Por tanto, la caída global de las sollicitaciones compensa el aumento relativo de la torsión, resultando en un valor menor del torsor en los casos de flecha más reducida.

CARGA TRANSVERSAL					
f/L	5	6.6	10	16	m/m
flecha	20.00	15.15	10.00	6.25	m
Dintel, nodo (32.5,0,16)					
V	40.5	34.91	29.99	30.80	kN
T	4.65	2.12	2.78	0.66	kNm
Arco, nodo (32.5,0, X)					
V	43.15	39.87	51.62	50.38	kN
T	91.38	99.3	140.63	116.35	kNm
d	12.25	9.4375	6.625	4.52	
Vtotal	83.65	74.78	81.61	81.18	kN
Vviento	40.1525	37.28125	37.28125	37.28	kN
Vtorsion	-2.65	-4.96	-21.63	-19.58	kN
Ttotal	96.03	101.42	143.41	117.01	kNm
Tarco	91.38	99.3	140.63	116.35	kNm
Solic Torsora	1120.74	807.16	684.08	483.62	kNm

Tabla 10: Comprobación del momento torsor según la relación flecha-luz ante carga transversal

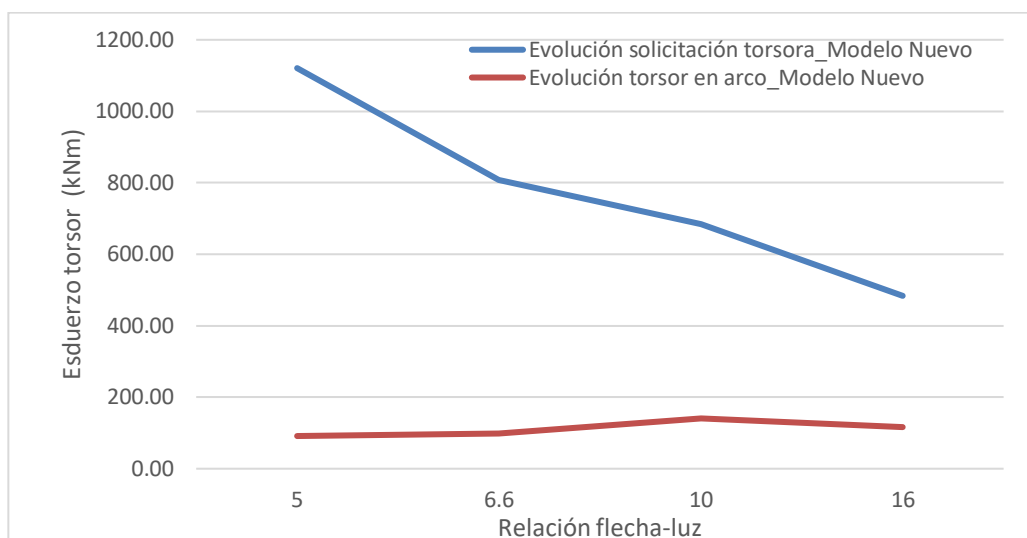


Imagen 132: Evolución de la solicitación torsora y del esfuerzo de torsión en el arco según la relación flecha-luz

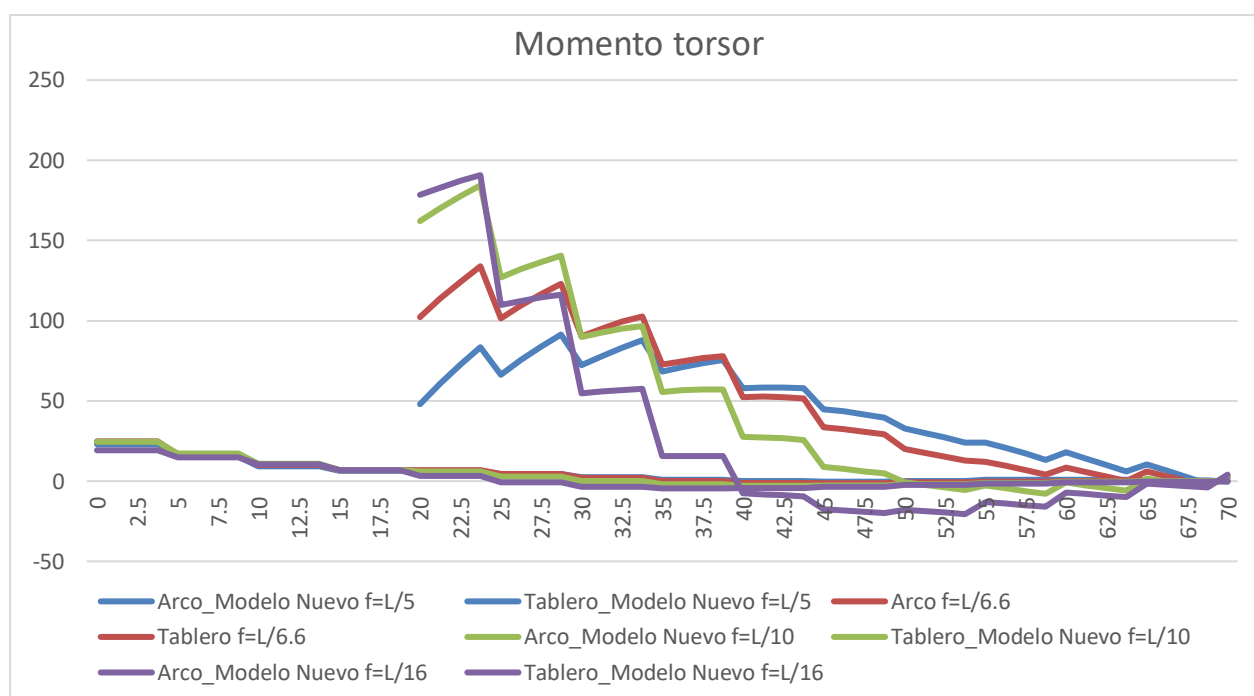


Imagen 133: Comparación de momento torsor según f/L ante carga transversal

- Cortantes transversales:**

Tal como se explicó en apartados anteriores, el cortante transversal en el conjunto arco-tablero es el resultado de la combinación de dos efectos distintos. El primero proviene de la acción del viento transversal, que genera un incremento constante del cortante desde el centro del vano hacia los extremos, con igual magnitud tanto en el arco como en el tablero. Este efecto permanece prácticamente invariable ante los cambios de geometría del puente.

El segundo efecto está asociado al par torsor, que actúa reduciendo el cortante en el arco y aumentándolo en el tablero. Este componente depende principalmente de la relación flecha-luz del arco. A medida que la flecha crece, este par torsor también se incrementa, intensificando el intercambio de esfuerzos entre el arco y el tablero. Por el contrario, cuando la flecha disminuye,

este efecto se atenúa. En la gráfica puede observarse cómo estas variaciones se reflejan en la distribución del cortante para las distintas configuraciones geométricas analizadas.

Interpretando la gráfica, se puede comprobar que el efecto constante del viento transversal hace que todas las curvas presenten una pendiente similar que va incrementando el cortante desde el centro del vano hacia los extremos. Esto corresponde al efecto del viento, el cual, como se ha mencionado, no se ve afectado por la geometría del arco. La variación debida al par torsor, para relaciones f/L más altas (como $f = L/5$), se observa una mayor diferencia entre las curvas del arco y del tablero. Esto indica un fuerte intercambio de esfuerzos, con mayor cortante transferido hacia el tablero debido al aumento del par torsor. En cambio, para relaciones f/L más bajas (como $f = L/16$), las curvas del arco y el tablero tienden a aproximarse. Esto refleja que el efecto torsor es mucho menor y, por tanto, el cortante está más equilibrado entre ambos elementos.

Este comportamiento visual respalda la idea de que a medida que la flecha disminuye, el esfuerzo torsor pierde relevancia, y con ello, el intercambio de cortante entre arco y tablero se reduce.

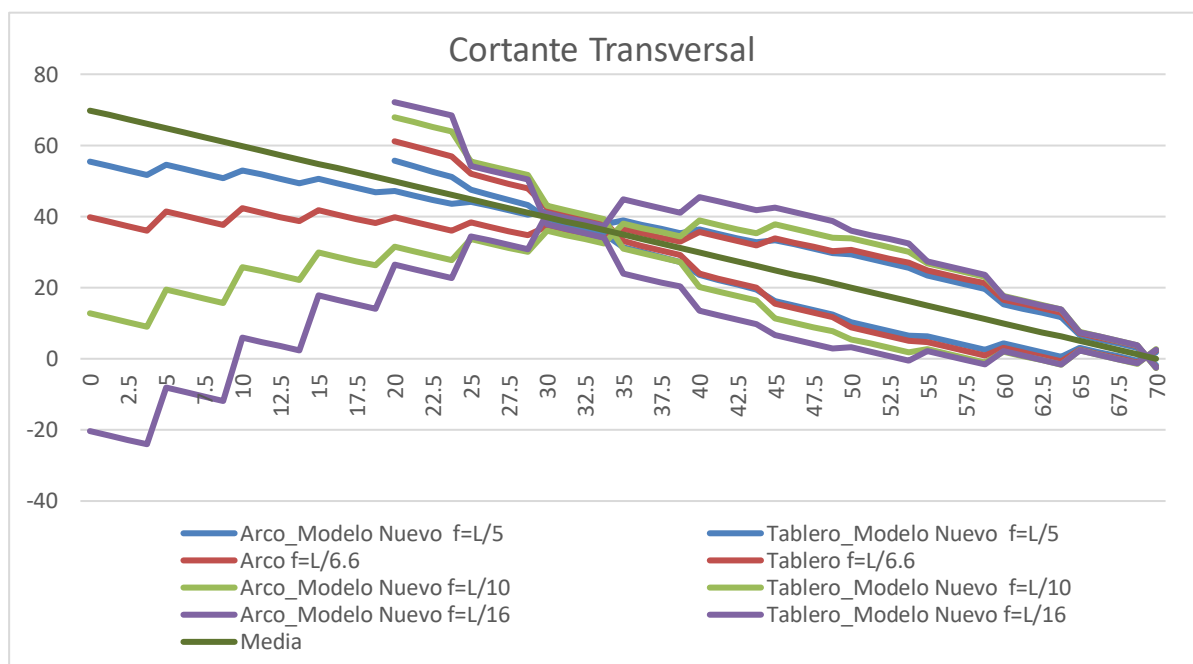


Imagen 134: Comparación de cortante transversal según f/L ante carga transversal

- Flectores transversales:**

Efectivamente, en el tablero, la curva $f=L/6.6$ (naranja) y curva $f=L/10$ (gris) se encuentran dentro de $f=L/5$ (azul) y $f=L/16$ (morada). Hay una transición gradual en función de la flecha como los momentos transversales van aumentando conforme el tablero es menos esbelto.

En el arco, la rigidez transversal se incrementa a medida que la flecha disminuye debido a los cambios en las secciones. Esto explica el incremento del momento transversal en el arco. Por otro lado, cuando la flecha aumenta, el tablero contribuye más en la resistencia a la flexión transversal.

Al observar los momentos flectores transversales en el tablero, se nota que su valor absoluto incrementa a medida que lo hace la flecha, lo cual concuerda con el comportamiento de los desplazamientos transversales. No obstante, al estudiar cómo evolucionan los momentos flectores en el arco, el patrón no resulta tan evidente. Cerca de la clave, estos momentos son muy reducidos independientemente del valor de la flecha, pero a partir de un cuarto del vano hacia el arranque, aumentan rápidamente, siguiendo una evolución que no se explica fácilmente. En este comportamiento influyen varios factores,

como mayores esfuerzos cortantes para flechas más pequeñas, menores ángulos verticales de la directriz en estos casos y recorridos también más cortos para flechas más reducidas.

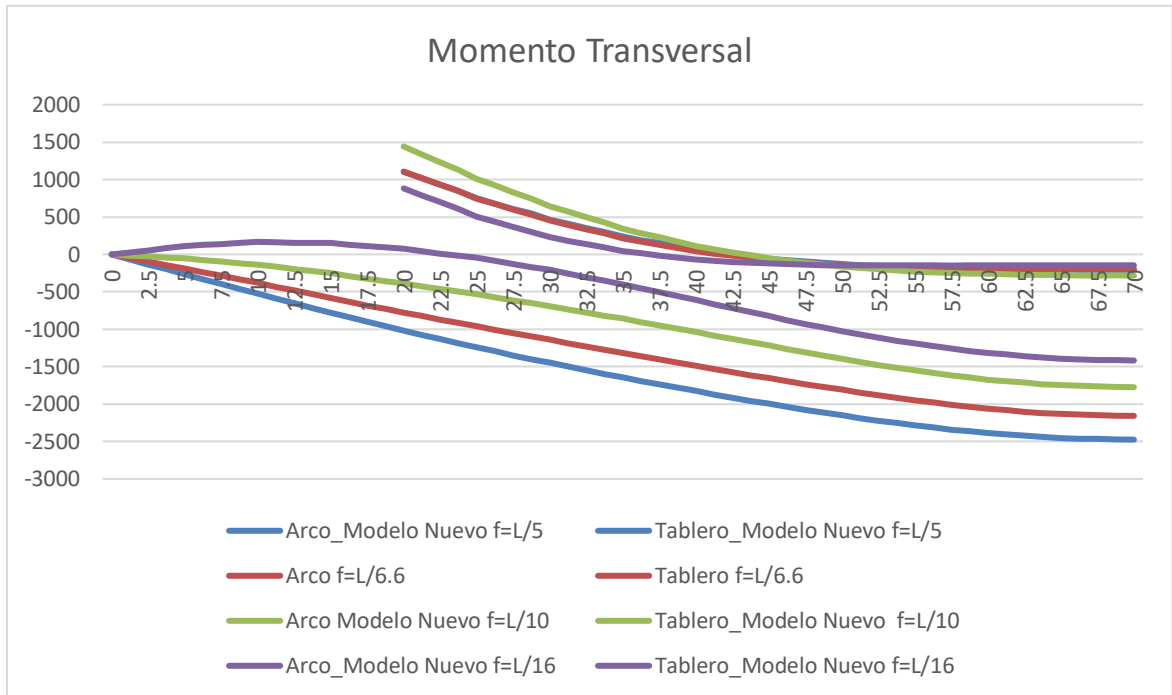


Imagen 135: Comparación de momento transversal según f/L ante carga transversal

4.4. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

- La disminución de la flecha del arco proporciona una mayor rigidez a torsión a la estructura, disminuyendo significativamente sus desplazamientos.
- En carga excéntrica, el momento torsor que genera a la estructura, hace que el momento torsor en el arco vaya creciendo (el giro del arco está relacionado con el momento torsor en el arco), éste va creciendo cuando la flecha va disminuyendo, pero a la vez la distancia entre el arco y el tablero va haciendo lo contrario, por lo tanto, son dos cosas que se oponen, por eso nos sale que la variación no es lineal. Estos dos casos opuestos están derivando esa situación “rara”. Los desplazamientos están relacionados con la torsión. A mayor flecha ($f = \frac{L}{5}$) tiene la menor torsión y el de menor flecha ($f = \frac{L}{16}$) tiene la mayor torsión y por lo contrario el de mayor flecha tiene mayor distancia tablero-arco y el de menor flecha la menor distancia entre tablero-arco, entonces estas dos cosas se están contraponiendo y de estas dos cosas depende la deformación transversal de la estructura. Dicha contraposición entre uno y otro va produciendo que las flechas $f = \frac{L}{5}$ y $f = \frac{L}{6.6}$ resulta que tienen más deformación transversal que los otros dos casos. Entonces, la diferencia entre distancia entre tablero y arco influye más o menos según las zonas.
- El torsor crece según la variación de rigideces que se le ha estado poniendo. Con las rigideces que le hemos estado poniendo, el torsor y el par de fuerzas asociado, hace que se produzca los efectos expuestos (gráficas). Se llega a la conclusión de que los puentes que más se deforman transversalmente no son los de la flecha más grande ni el de la flecha más chica, sino la de las flechas más comunes.
- Un incremento en la flecha del arco intensifica la participación de los esfuerzos cortantes como mecanismo resistente frente a la torsión generada por cargas excéntricas.
- En cambio, una reducción de la flecha conlleva una notable disminución de la sollicitación torsional cuando la estructura es sometida a acciones transversales, como puede ser la carga de viento.

5. CONCLUSIONES

Conclusiones

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

- El modelo de placas que hemos utilizado para reproducir el estudio de J. Manterola y de Antonio Domínguez sobre la relación arco-tablero bajo cargas transversales y excéntricas en puentes arco (Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II [1]) nos proporciona una estructura mucho más flexible por la cual se detallan mejor los resultados y potencia el efecto del cortante para enfrentar a la sollicitación torsora.
- El análisis del comportamiento según la variación flecha-luz calculado con las nuevas secciones nos proporciona 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.

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, 1998.
- [3] << MIDAS Civil, >> 2017.
- [4] Trabajo Fin de Grado, Ingeniería Civil, de Anotnio Domínguez López: *"Influencia de la relación entre rigideces de arco y tablero bajo cargas excéntricas y transversales en puentes arco"*, 2019.
- [5] Manuel Jesús Florencio, << SE-40: Fhecor ya diseñó otro puente de arco intermedio en Alzira >>
- [6] Mega construcciones << Puente de Šibenik >>
- [7] EL PAÍS << Pasarela 'Ronda de la Hispanidad' >>
- [8] Sevilla – guiajando << Puente Barqueta >>
- [9] Latinoamérica Midas Gen << Diferencias de análisis y diseño de elementos "Plate" y "Wall" en MIDAS Gen.
- [10] Universidad de Sevilla << Apuntes para análisis de Estructuras >>
- [11] «Microsoft Excel,» 2016.

GLOSARIO

ISO: International Organization for Standardization

UNE: Una Norma Española