

Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio dinámico de puentes de ferrocarril de tipo  
arco con tablero inferior

Autor: Alejandro Verde Cantero

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Estudio dinámico de puentes de ferrocarril de tipo arco con tablero inferior**

Autor:

Alejandro Verde Cantero

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor asociado

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

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster: Estudio dinámico de puentes de ferrocarril de tipo arco con tablero inferior

Autor: Alejandro Verde Cantero  
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, 2021

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*  
*A mis maestros*  
*A mis amigos*



# Agradecimientos

---

Otra etapa más que toca su fin, otro camino que llega a su final, donde hay que saber valorar donde se encuentra uno en cada instante, ya que, aunque la meta sea obtener el título académico de Ingeniero Superior en Caminos, Canales y Puertos, no hay que olvidar lo recorrido hasta llegar a él, cuyas vivencias son las que hacen crecer a la persona y distinguirla del resto.

Agradecer eternamente a mi familia tanto en los momentos buenos saber disfrutar y acrecentar mi felicidad como en los malos apoyar, mitigar las malas sensaciones y nunca mostrar un atisbo de falta de confianza ni desmérito a mi trabajo.

Por supuesto a mis amigos y diferentes personas especiales que me han acompañado todos estos años y me han enriquecido con distintos puntos de vista en este mundo tan apasionante como es la ingeniería estructural. Diferentes perspectivas tanto técnicas, como estéticas, filosóficas, abstractas o tan básicas que se alejan bastante de la complejidad de tantos temas académicos.

Por último, a mis profesores, y en especial a Don Antonio Martínez de la Concha por ayudarme y guiarme en este trabajo, aportando tanto ideas como soluciones, e incluso hacia mi persona, haciendo que sea más competente y siempre plena disposición de buena gana a trabajar y charlar con un estudiante como yo.

*Alejandro Verde Cantero  
Sevilla, 2021*



# Resumen

---

El objeto de este trabajo es estudiar el comportamiento de los puentes arco con tablero inferior, en función de distintas tipologías de arcos y diferentes disposiciones de los tirantes. Por ello vamos a estudiar el efecto que producen las cargas dinámicas, fruto del paso de un ferrocarril, como influye dicha sollicitación en los desplazamientos y aceleraciones verticales del tablero, el coeficiente de impacto, los modos de vibración y las diferentes frecuencias naturales de la estructura.

En primer lugar hemos procedido al diseño geométrico del puente a estudiar, realizando un modelo numérico a partir de uno base existente, el Puente Reina Sofía, situado en Palma del Río, Córdoba, Andalucía, España.

Una vez tenemos dicho modelo, al que hemos cambiado las dimensiones del tablero ya que tenemos que incluir una sección de tipo ferroviario, a diferencia del existente que es de tipo carretero. Procedemos a elaborar los diferentes modelos variando la disposición de los arcos y tirantes hasta obtener un total de 20 modelos distintos, y así obtener diferentes respuestas de la estructura de forma que podamos realizar una comparativa y observar diferentes resultados y formas de comportamiento en función de que variemos unos elementos y otros.

Cuando tengamos estos resultados, los estudiamos, analizamos y comparamos para establecer unas conclusiones de los aspectos más relevantes, como pueden ser desplazamientos y aceleraciones verticales del tablero, el coeficiente de impacto, los modos de vibración y las diferentes frecuencias naturales de la estructura.

La idea ha sido obtenida mediante una búsqueda de información sobre un campo tan interesante como es el estudio de puentes, en concreto en los libros de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción [1], por supuesto, consejo del tutor de este trabajo y profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, Antonio Martínez de la Concha, quien me ha guiado en este trabajo.





# Abstract

---

The aim of this work is to study tied-arch bridge performance, based on various arch typologies and various cable-stay types. Therefore we are going to study dynamic loads effects on the different bridges, due to train transit. How affects to vertical displacements and accelerations on the bridge deck, the impact coefficient and the different natural frequencies and its normal modes.

First of all, we proceed with geometry design, making a numeric model of an existing bridge call “Puente Reina Sofia”, located in Palma del Río, in Cordoba, Spain.

Important aspect to consider is that we need to change the deck section because it is a road bridge and we are going to analyse a railway bridge.

Once this has been done, we make the 20 different models, combining various arch typologies with cable-stays types. Thus we have different results to study and compare about how they change on account of various models of arch and cable-stays.

Lastly, we will present conclusions and results of this analysis, related to the main parameters we determined in the first paragraph, as they are: vertical displacements and accelerations on the bridge deck, the impact coefficient and the different natural frequencies and its normal modes.

The idea of this work came out of a information research about such an interesting field as it is the study of bridges, specifically from books of the great engineer Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción’ [1], as a result of an important advice of the mentor of this work and professor of the engineering university school of Seville, Antonio Martínez de la Concha, who has guide me in this work.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. ANTECEDENTES	11
1.1.1 ESTRUCTURA DE ESTUDIO	11
1.1.2 FERROCARRIL Y TRENES DE ALTA VELOCIDAD	12
1.2. LA RESONANCIA Y LA ALTA VELOCIDAD	13
1.3. COEFICIENTE DE IMPACTO	15
<b>2 Objeto del Trabajo</b>	<b>17</b>
<b>3 Elaboración del modelo</b>	<b>19</b>
3.1. MODELO BÁSICO	19
3.1.1 Puente arco con tablero inferior	19
3.1.2 ¿Cómo hemos obtenido los diferentes modelos?	20
3.2. MODELOS PARA ESTUDIAR	22
3.2.1 En función del arco	22
3.2.2 En función de los tirantes	23
3.3. Modelización en Midas Civil	25
3.3.1 Materiales	25
3.3.2 Secciones	28
3.3.3 Modelo numérico tablero	30
3.3.4 Modelo numérico arcos y tirantes	35
3.3.5 Condiciones de contorno	41
3.3.6 Cargas	41
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>45</b>
4.1. RESULTADOS: MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES	46
4.1.1 Modelo 1a: Dos arcos paralelos y tirantes verticales	46
4.1.2 Modelo 1b: Dos arcos paralelos y tirantes en abanico	47
4.1.3 Modelo 1c: Dos arcos paralelos y tirantes en celosía	48
4.1.4 Modelo 1d: Dos arcos paralelos y tirantes cruzados	49
4.1.5 Modelos 2a: Dos arcos cerrados y tirantes verticales	50
4.1.6 Modelo 2b: Dos arcos cerrados y tirantes en abanico	51
4.1.7 Modelo 2c: Dos arcos cerrados y tirantes en celosía	52
4.1.8 Modelo 2d: Dos arcos cerrados y tirantes cruzados	53
4.1.9 Modelo 3a: Dos arcos abiertos y tirantes verticales	54

4.1.10	Modelo 3b: Dos arcos abiertos y tirantes en abanico	55
4.1.11	Modelo 3c: Dos arcos abiertos y tirantes en celosía	56
4.1.12	Modelo 3d: Dos arcos abiertos y tirantes cruzados	57
4.1.13	Modelo 4a: Un solo arco centrado y tirantes verticales	58
4.1.14	Modelo 4b: Un solo arco centrado y tirantes en abanico	59
4.1.15	Modelo 4c: Un solo arco centrado y tirantes en celosía	60
4.1.16	Modelo 4d: Un solo arco centrado y tirantes cruzados	61
4.1.17	Modelo 5a: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales	62
4.1.18	Modelo 5b: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico	63
4.1.19	Modelo 5c: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía	64
4.1.20	Modelo 5d: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados	65
4.2.	<i>RESULTADOS: DESPLAZAMIENTOS</i>	67
4.2.1	MODELO 1a: Dos arcos paralelos y tirantes verticales	67
4.2.2	MODELO 1b: Dos arcos paralelos y tirantes en abanico	67
4.2.3	MODELO 1c: Dos arcos paralelos y tirantes en celosía	68
4.2.4	MODELO 1d: Dos arcos paralelos y tirantes cruzados	69
4.2.5	MODELO 2a: Dos arcos cerrados y tirantes verticales	69
4.2.6	MODELO 2b: Dos arcos cerrados y tirantes en abanico	70
4.2.7	MODELO 2c: Dos arcos cerrados y tirantes en celosía	71
4.2.8	MODELO 2d: Dos arcos cerrados y tirantes cruzados	71
4.2.9	MODELO 3a: Dos arcos abiertos y tirantes verticales	72
4.2.10	MODELO 3b: Dos arcos abiertos y tirantes en abanico	73
4.2.11	MODELO 3c: Dos arcos abiertos y tirantes en celosía	73
4.2.12	MODELO 3d: Dos arcos abiertos y tirantes cruzados	74
4.2.13	MODELO 4a: Un arco centrado y tirantes verticales	75
4.2.14	MODELO 4b: Un arco centrado y tirantes en abanico	75
4.2.15	MODELO 4c: Un arco centrado y tirantes en celosía	76
4.2.16	MODELO 4d: Un arco centrado y tirantes cruzados	77
4.2.17	MODELO 5a: Un solo arco centrado, tirantes verticales y tablero con sección en cajón	77
4.2.18	MODELO 5b: Un solo arco centrado, tirantes en abanico y tablero con sección en cajón	78
4.2.19	MODELO 5c: Un solo arco centrado, tirantes en celosía y tablero con sección en cajón	79
4.2.20	MODELO 5d: Un solo arco centrado, tirantes cruzados y tablero con sección en cajón	79
4.3.	<i>RESULTADOS: ACELERACIONES</i>	80
4.3.1	MODELO 1a: Dos arcos paralelos y tirantes verticales	80
4.3.2	MODELO 1b: Dos arcos paralelos y tirantes en abanico	81
4.3.3	MODELO 1c: Dos arcos paralelos y tirantes en celosía	81
4.3.4	MODELO 1d: Dos arcos paralelos y tirantes cruzados	82
4.3.5	MODELO 2a: Dos arcos cerrados y tirantes verticales	83
4.3.6	MODELO 2b: Dos arcos cerrados y tirantes en abanico	83
4.3.7	MODELO 2c: Dos arcos cerrados y tirantes en celosía	84
4.3.8	MODELO 2d: Dos arcos cerrados y tirantes cruzados	85
4.3.9	MODELO 3a: Dos arcos abiertos y tirantes verticales	85
4.3.10	MODELO 3b: Dos arcos abiertos y tirantes en abanico	86
4.3.11	MODELO 3c: Dos arcos abiertos y tirantes en celosía	87
4.3.12	MODELO 3d: Dos arcos abiertos y tirantes cruzados	87
4.3.13	MODELO 4a: Un arco centrado y tirantes verticales	88
4.3.14	MODELO 4b: Un arco centrado y tirantes en abanico	89
4.3.15	MODELO 4c: Un arco centrado y tirantes en celosía	89

4.3.16	MODELO 4d: Un arco centrado y tirantes cruzados	90
4.3.17	MODELO 5a: Un solo arco centrado, tirantes verticales y tablero con sección en cajón	91
4.3.18	MODELO 5b: Un solo arco centrado, tirantes en abanico y tablero con sección en cajón	91
4.3.19	MODELO 5c: Un solo arco centrado, tirantes en celosía y tablero con sección en cajón	92
4.3.20	MODELO 5d: Un solo arco centrado, tirantes cruzados y tablero con sección en cajón	93
4.4.	<i>RESULTADOS: COEFICIENTE DE IMPACTO</i>	93
4.4.1	Modelos 1: Dos arcos paralelos	93
4.4.2	Modelos 2: Dos arcos cerrados	94
4.4.3	Modelos 3: Dos arcos abiertos	94
4.4.4	Modelos 4: Un arco centrado	94
4.4.5	Modelos 5: Un arco centrado con tablero sección cajón	94
<b>5</b>	<b>ESTUDIO DE LOS RESULTADOS</b>	<b>97</b>
5.1.	<i>MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES</i>	97
5.1.1	En función de la tipología de los arcos	97
5.1.2	En función de la disposición de los tirantes	99
5.2.	<i>DESPLAZAMIENTOS</i>	101
5.2.1	En función de la tipología de arcos	101
5.2.2	En función de la disposición de los tirantes	103
5.3.	<i>ACELERACIONES</i>	105
5.3.1	En función de la tipología de los arcos	105
5.3.2	En función de la disposición de los tirantes	107
5.4.	<i>COEFICIENTE DE IMPACTO</i>	110
5.4.1	En función de la tipología de los arcos	110
5.4.2	En función de la disposición de los tirantes	111
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y ASPECTOS FUTUROS A DESARROLLAR</b>	<b>113</b>
6.1.	<i>CONCLUSIONES</i>	113
6.2.	<i>ASPECTOS FUTUROS A DESARROLLAR</i>	115
	<b>Referencias</b>	<b>117</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Parámetros básicos	22
Tabla 2. Detalles elementos principales	35
Tabla 3. Cargas para introducir en el modelo	42
Tabla 4. Frecuencias naturales modelos de dos arcos paralelos	49
Tabla 5. Frecuencias naturales modelos de arcos cerrados	53
Tabla 6. Frecuencias naturales modelos de arcos abiertos	57
Tabla 7. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado	61
Tabla 8. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado y sección del tablero en cajón	65
Tabla 9. Resultados Coeficiente de impacto Modelo dos arcos paralelos	93
Tabla 10. Resultados Coeficiente de impacto Modelo dos arcos cerrados	94
Tabla 11. Resultados Coeficiente de impacto Modelo dos arcos abiertos	94
Tabla 12. Resultados Coeficiente de impacto Modelo un arco centrado	94
Tabla 13. Resultados Coeficiente de impacto Modelo un arco centrado tablero con sección cajón	94
Tabla 14. Frecuencias naturales modelos de dos arcos paralelos	97
Tabla 15. Frecuencias naturales modelos de dos arcos cerrados	97
Tabla 16. Frecuencias naturales modelos de dos arcos abiertos	98
Tabla 17. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado	98
Tabla 18. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado con tablero sección en cajón	99
Tabla 19. Frecuencias naturales modelos tirantes verticales	99
Tabla 20. Frecuencias naturales modelos tirantes en abanico	99
Tabla 21. Frecuencias naturales modelos tirantes en celosía	100
Tabla 22. Frecuencias naturales modelos de tirantes cruzados	100
Tabla 23. Resultados Desplazamientos verticales Modelo dos arcos paralelos	101
Tabla 24. Resultados Desplazamientos verticales Modelo dos arcos cerrados	101
Tabla 25. Resultados Desplazamientos verticales Modelo dos arcos abiertos	102
Tabla 26. Resultados Desplazamientos verticales Modelo un arco centrado	102
Tabla 27. Resultados Desplazamientos verticales Modelo un arco centrado tablero con sección cajón	102
Tabla 28. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes verticales	103
Tabla 29. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes en abanico	104
Tabla 30. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes en celosía	104
Tabla 31. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes cruzados	104
Tabla 32. Resultados Aceleraciones verticales Modelo dos arcos paralelos	105
Tabla 33. Resultados Aceleraciones verticales Modelo dos arcos cerrados	106
Tabla 34. Resultados Aceleraciones verticales Modelo dos arcos abiertos	106
Tabla 35. Resultados Aceleraciones verticales Modelo un arco centrado	106
Tabla 36. Resultados Aceleraciones verticales Modelo un arco centrado tablero sección cajón	107
Tabla 37. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes verticales	108
Tabla 38. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes en abanico	108
Tabla 39. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes en celosía	108
Tabla 40. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes cruzados	109
Tabla 41. Coeficientes de impacto en modelos de dos arcos paralelos	110
Tabla 42. Coeficientes de impacto en modelos de dos arcos cerrados	110

Tabla 43. Coeficientes de impacto en modelos de dos arcos abiertos	110
Tabla 44. Coeficientes de impacto en modelos de un arco centrado	110
Tabla 45. Coeficientes de impacto en modelos de un arco centrado con tablero sección en cajón	111
Tabla 46. Coeficientes de impacto en modelos tirantes verticales	111
Tabla 47. Coeficientes de impacto en modelos de tirantes en abanico	111
Tabla 48. Coeficientes de impacto en modelos de tirantes en celosía	111
Tabla 49. Coeficientes de impacto en modelos de tirantes cruzados	112



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Puente Reina Sofia	20
Figura 2. Referencia Viga longitudinal	21
Figura 3. Referencia Viga longitudinal II	21
Figura 4. Referencia viga transversal	21
Figura 5. Puentes arco de tablero inferior con dos arcos paralelos	22
Figura 6. Puente arco tablero inferiores con dos arcos cerrados	23
Figura 7. Puentes arco de tablero inferior con dos arcos abiertos	23
Figura 8. Puentes arco de tablero inferior con un arco centrado	23
Figura 9. Tirantes tipo verticales	24
Figura 10. Tirantes tipo abanico	24
Figura 11. Tirantes tipo celosía	25
Figura 12. Tirantes tipo cruzados	25
Figura 13. Propiedades Acero	26
Figura 14. Propiedades Hormigón	26
Figura 15. Propiedades hormigón II	27
Figura 16. Propiedades Hormigón Ligero	27
Figura 17. Propiedades Material Mixto	28
Figura 18. Sección Viga longitudinal	28
Figura 19. Sección Viga transversal	29
Figura 20. Sección tablero transversal	29
Figura 21. Sección Tablero longitudinal	29
Figura 22. Sección Arco	30
Figura 23. Sección tirantes	30
Figura 24. Sección rigidizadores	30
Figura 25. Vista completa tablero	31
Figura 26. Vigas longitudinales Midas	31
Figura 27. Vigas transversales Midas	32
Figura 28. Tablero transversal Midas	32
Figura 29. Tablero longitudinal Midas	33
Figura 30. Vista tablero completo 3D	33
Figura 31. Vista tablero completo 3D II	34
Figura 32. Vista tablero completo 3D III	34
Figura 33. Modelo 1: Dos arcos paralelos	35
Figura 34. Modelo 2: Dos arcos cerrados	36
Figura 35. Modelo 3: Dos arcos abiertos	36
Figura 36. Modelo 4: Un arco centrado	37
Figura 37. Modelo 5: Un arco centrado con tablero sección en cajón	37
Figura 38. Tipo a: Tirantes verticales	39
Figura 39. Tipo b: Tirantes en abanico	39
Figura 40. Tipo c: Tirantes en celosía	40

Figura 41. Tipo d: Tirantes cruzados	40
Figura 42. Condiciones de contorno	41
Figura 43. “Time history function” para el modelo de tren A4 a 420 km/h	44
Figura 44. Dos arcos paralelos y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY	46
Figura 45. Dos arcos paralelos y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX	46
Figura 46. Dos arcos paralelos y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ	46
Figura 47. Dos arcos paralelos y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY	47
Figura 48. Dos arcos paralelos y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en RX	47
Figura 49. Dos arcos paralelos y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en DZ	47
Figura 50. Dos arcos paralelos y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX	48
Figura 51. Dos arcos paralelos y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ	48
Figura 52. Dos arcos paralelos y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY	48
Figura 53. Dos arcos paralelos y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX	49
Figura 54. Dos arcos paralelos y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en RZ	49
Figura 55. Dos arcos paralelos y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en DZ	49
Figura 56. Dos arcos cerrados y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY	50
Figura 57. Dos arcos cerrados y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX	50
Figura 58. Dos arcos cerrados y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ	50
Figura 59. Dos arcos cerrados y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY	51
Figura 60. Dos arcos cerrados y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en DZ	51
Figura 61. Dos arcos cerrados y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en RX	51
Figura 62. Dos arcos cerrados y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX	52
Figura 63. Dos arcos cerrados y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ	52
Figura 64. Dos arcos cerrados y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY	52
Figura 65. Dos arcos cerrados y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX	53
Figura 66. Dos arcos cerrados y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ	53
Figura 67. Dos arcos cerrados y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RZ	53
Figura 68. Dos arcos abiertos y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY	54
Figura 69. Dos arcos abiertos y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX	54
Figura 70. Dos arcos abiertos y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ	54
Figura 71. Dos arcos abiertos y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY	55
Figura 72. Dos arcos abiertos y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en RX	55
Figura 73. Dos arcos abiertos y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en DZ	55
Figura 74. Dos arcos abiertos y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX	56
Figura 75. Dos arcos abiertos y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ	56
Figura 76. Dos arcos abiertos y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY	56
Figura 77. Dos arcos abiertos y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX	57
Figura 78. Dos arcos abiertos y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ	57
Figura 79. Dos arcos abiertos y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RZ	57
Figura 80. Un solo arco centrado y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY	58
Figura 81. Un solo arco centrado y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX	58
Figura 82. Un solo arco centrado y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ	58
Figura 83. Un solo arco centrado y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY	59
Figura 84. Un solo arco centrado y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en DZ	59
Figura 85. Un solo arco centrado y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en RX	59
Figura 86. Un solo arco centrado y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX	60
Figura 87. Un solo arco centrado y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ	60
Figura 88. Un solo arco centrado y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY	60
Figura 89. Un solo arco centrado y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX	61
Figura 90. Un solo arco centrado y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ	61

Figura 91. Un solo arco centrado y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RY	61
Figura 92. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RX	62
Figura 93. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RY	62
Figura 94. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ	62
Figura 95. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RX	63
Figura 96. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en DZ	63
Figura 97. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en RY	63
Figura 98. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX	64
Figura 99. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ	64
Figura 100. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY	64
Figura 101. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX	65
Figura 102. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ	65
Figura 103. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RZ	65
Figura 104. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes verticales	67
Figura 105. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes en abanico	67
Figura 106. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes en celosía	68
Figura 107. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes cruzados	69
Figura 108. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes verticales	69
Figura 109. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes en abanico	70
Figura 110. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes en celosía	71
Figura 111. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes cruzados	71
Figura 112. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes verticales	72
Figura 113. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes en abanico	73
Figura 114. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes en celosía	73
Figura 115. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes cruzados	74
Figura 116. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes verticales	75
Figura 117. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes en abanico	75
Figura 118. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes en celosía	76
Figura 119. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes cruzados	77
Figura 120. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes verticales	77
Figura 121. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes en abanico	78
Figura 122. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes en celosía	79
Figura 123. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes cruzados	79
Figura 124. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes verticales	80
Figura 125. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes en abanico	81
Figura 126. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes en celosía	81
Figura 127. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes cruzados	82
Figura 128. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes verticales	83
Figura 129. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes en abanico	83
Figura 130. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes en celosía	84
Figura 131. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes cruzados	85
Figura 132. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes verticales	85
Figura 133. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes en abanico	86
Figura 134. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes en celosía	87
Figura 135. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes cruzados	87
Figura 136. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes verticales	88
Figura 137. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes en abanico	89
Figura 138. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes en celosía	89
Figura 139. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes cruzados	90
Figura 140. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes verticales	91

Figura 141. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes en abanico	91
Figura 142. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes en celosía	92
Figura 143. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes cruzados	93

# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Lo que he hecho es poner al límite la técnica de mi momento, y ese es el motor fundamental del ingeniero.*

*- Javier Manterola -*

**E**n este primer capítulo vamos a proceder a una descripción de los diferentes campos de estudio, con el objetivo de tener una visión del contexto en el que nos vamos a situar. Empezaremos hablando acerca de los puentes de tipo arco, así como posteriormente el ferrocarril y los trenes de alta velocidad. Por último, trataremos la resonancia y la alta velocidad al paso por un puente, que es el centro sobre el que se basa este trabajo.

## 1.1. ANTECEDENTES

### 1.1.1 ESTRUCTURA DE ESTUDIO

Actualmente, teniendo en cuenta la tecnología que tenemos a nuestra disposición, se puede ordenar los puentes en función de “dos” variables fundamentales. Existe una tercera que también es muy importante y se debe tener en cuenta.

- Material utilizado  
Principalmente destacan dos, hormigón y acero.
- Tipología estructural empleada
  - Puentes recto o viga
  - Puentes arco
  - Puentes atirantados o colgados
- Proceso constructivo

Atendiendo a su tipología, nos centraremos en la de tipo arco para este trabajo, se divide en tres grandes familias según sea la situación relativa entre arco y tablero.

- Arco tablero superior, transmisión arco-tablero mediante los pilares.
- Arco tablero intermedio, una parte la transfieren los pilares y la otra parte los tirantes.
- Arco tablero inferior, transmisión arco-tablero mediante los tirantes.

Nuestro modelo es un arco con tablero inferior. Tiene una característica especial, no introduce acciones horizontales en el terreno, lo que permite instalarse en cualquier situación resistente del suelo. Aunque, como inconveniente tiene un proceso constructivo más complicado.

Se diferencian dos partes principales, el arco, principal elemento resistente, cuya forma viene determinada como el antifunicular de la carga permanente del puente. En segundo lugar, el tablero cuya geometría viene determinada por las exigencias de la rasante. Ambos elementos trabajan conjuntamente mediante los pilares, que son los que se encargan de transferir la carga del tablero al arco y este a la cimentación.

Esta tipología experimenta un parón en su desarrollo debido a los puentes rectos de hormigón pretensado, construidos en avance en voladizo y del puente atirantado que con gran facilidad cubre luces de 200-500 metros. Aquí se puede observar perfectamente las tres variables fundamentales comentadas anteriormente:

- Material: Hormigón pretensado
- Tipología: Puente recto
- Proceso constructivo: Avance en voladizo

El puente arco en general, y el de hormigón en particular ha experimentado un parón prolongado. La utilización de grandes cimbras constituía la dificultad más importante que presentaba la ejecución de estos puentes, ubicados generalmente en zonas de difícil acceso, grandes valles o cursos de agua importantes.

- ¿Cómo se relanza esta tipología?

Debido a la construcción de arcos de hormigón en avance en voladizo y la recuperación de la celosía como estructura del arco.

- ¿Por qué surge el puente arco y qué ventajas tiene?

Luces cortas: A diferencia del puente recto necesita dos estructuras, arco y tablero, por lo que es menos económico que una sola. En segundo lugar, es más vulnerable que el puente recto a los movimientos horizontales del suelo.

Luces grandes: Debido a lo anterior, el puente arco es útil para grandes luces. Como ya hemos comentado anteriormente, la geometría del arco determina que los esfuerzos que lo solicitan, bajo la acción de la carga permanente (antifunicular), sean casi exclusivamente de compresión. Bajo la sobrecarga de utilización, que no tiene por qué tener una distribución antifunicular, se producen tanto compresiones como flexiones. En la suma de ambos efectos predominan las compresiones para las luces grandes, lo que es más fácil de resistir y eso abarata el coste.

### 1.1.2 FERROCARRIL Y TRENES DE ALTA VELOCIDAD

Dado que el objeto que vamos a tratar en el presente trabajo tiene relación con los trenes de alta velocidad, vamos a situarnos en ese contexto y no en el general correspondiente a la vasta historia del ferrocarril a lo largo de los últimos siglos desde su aparición como medio de transporte funcional en 1811, cuyo diseño pertenece a John Blenkinsop, presentando una línea entre Middleton y Leeds, en Reino Unido. [2]

Desde ese modelo, correspondiente a una locomotora de vapor capaz de arrastrar un tren por vías de hierro sin romper los raíles, es decir, de forma exitosa y funcional, hasta el día de hoy se ha producido un cambio sólo imaginable para aquellos visionarios de la época que fueron capaces de empezar a desarrollar esta tecnología.

Centrándonos en lo que nos concierne respecto a este trabajo, no es hasta el siglo XX cuando se inaugura en 1939 el primer tren comercial de alta velocidad en Italia, conocido como el ElettroTreno ETR 200, alcanzando para entonces el récord mundial de 204 km/h.

Teniendo en cuenta que actualmente se considera alta velocidad a aquellos ferrocarriles capaces de superar los 250 km/h, no es hasta 1964, en Japón, cuando aparece el popular ‘tren bala’, llamado originariamente Shinkansen, conectando las ciudades de Tokio y Osaka. [3]

En las últimas décadas se ha producido una mejora cada vez óptima de este sistema, con una automatización mayor, que reduce los costes de operación, siendo una opción bastante factible para el transporte

de pasajeros frente al avión o el coche. Aunque hubo un receso en el avance de esta tecnología durante unos años, luego se relanzó debido a las numerosas ventajas que presenta frente a otros medios de transporte, ya que, aunque no es tan rápido como el avión para distancias largas, el tren de alta velocidad resulta muy útil para recorridos de 300 a 1000 km, sumado a su indudable seguridad y comodidad, lo hacen muy competente. Al igual que frente a la comodidad del coche debido al gran trabajo en renovar y ampliar la infraestructura de carreteras, no cabe duda de que, debido a la mayor velocidad del ferrocarril y su consecuente reducción de tiempo, lo convierte en un medio bastante fuerte para transporte a media distancia.

Por ello se entiende la actual diferencia entre la infraestructura ferroviaria europea respecto de la existente en Estados Unidos. En la sociedad europea, donde existe una mayor densidad poblacional, debido a una menor distancia entre los diferentes núcleos urbanos, resulta muy eficiente el uso de los trenes de alta velocidad para medias distancias por su rapidez y comodidad frente a otro tipo de transporte. En cambio, en la sociedad norteamericana, donde la densidad poblacional es menor, la distancia a recorrer entre los diferentes núcleos urbanos del país es bastante mayor, por lo que el medio de transporte más eficiente para realizar estas rutas es el avión.

## 1.2. LA RESONANCIA Y LA ALTA VELOCIDAD

Dado que el objeto de este trabajo es realizar un estudio dinámico de los puentes de tipo arco superior y compararlo posteriormente en función de la disposición de sus arcos, así como de sus tirantes, es de gran importancia conocer la influencia que tiene las cargas móviles frente a las estáticas.

El carácter de las cargas móviles del tipo de ferrocarriles a analizar posee una mayor velocidad de explotación que las cargas de carretera convencionales, lo que lleva aparejado la necesidad de dotar a estas infraestructuras de la capacidad suficiente para soportar las acciones que este nuevo tipo de tráfico produce. Si bien el peso de los trenes de pasajeros que circulan a altas velocidades es muy inferior al del tren UIC71 [4] que se usa para tipificar la sobrecarga ferroviaria, los efectos de su paso por encima de la estructura pueden resultar más desfavorables [5].

Sabemos que las tensiones y deformaciones estáticas, así como la aceleración del tablero asociada, inducidos en un puente, se ven aumentadas y disminuidas bajo los efectos del tráfico móvil, por diferentes razones:

- En primer lugar, la rápida puesta en carga debida a la velocidad del tráfico que circula por la estructura y la respuesta inercial de la misma puede aumentar considerablemente las tensiones y deformaciones respecto de la misma acción de forma estática. Una masa colocada súbitamente sobre un muelle sin amortiguamiento experimenta una oscilación cuya amplitud es el doble de la deformación estática, lo que supone que las tensiones y las deformaciones en el muelle llegan a duplicar las correspondientes estáticas [6]
- El paso de sucesivas cargas con una cadencia similar que puede excitar la estructura y, en ciertas circunstancias, crear resonancia. Esto ocurre cuando la frecuencia de excitación, o un múltiplo de ella, coincide con la frecuencia natural de la estructura, o un múltiplo de esta, ocasionando un acoplamiento entre excitación y respuesta [7]. Existe la posibilidad de que las vibraciones causadas por sucesivos ejes pasando por la estructura resulten excesivas. Esta condición no suele verificarse a velocidades inferiores a 200 km/h para los espaciamientos característicos de los trenes y las frecuencias de vibración de los puentes. [8]

Considerando la distribución espacial de los ejes de un tren, se pueden obtener uno o más espaciamientos característicos de las cargas,  $\lambda k$ . Ello puede producir resonancia cuando el tren circule a velocidades próximas a las críticas  $v$ , para las que alguna frecuencia significativa de

la estructura o de alguno de sus elementos  $f_0$ , sea múltiplo de la frecuencia de aplicación de cargas:

$$f_0 = n \frac{v}{\lambda k} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Existe otra velocidad de paso que produce grandes deformaciones y que no está asociada a la distancia entre ejes sino a la velocidad [9]

$$v = \frac{2 f_i L}{i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

Donde en dicha expresión  $L$  es la longitud del vano y  $f_i$  es la  $i$ -ésima frecuencia natural. Sin embargo, esta velocidad carece de interés práctico ya que adopta valores muy altos respecto de las velocidades habituales de operación.

- Las variaciones en las cargas por rueda originadas por las imperfecciones de la vía o del vehículo, incluyendo las irregularidades de las ruedas.

A la hora de determinar los efectos de las acciones del tráfico ferroviario, debemos tener en cuenta los efectos enumerados anteriormente.

A continuación, vamos a definir de forma más concisa los principales factores que influyen en el comportamiento dinámico [4]. Son los siguientes:

- La velocidad del tráfico que circula por el puente
- La luz del elemento y la longitud de la línea de influencia para las deformaciones del elemento que se considere
- La masa de la estructura
- Las frecuencias naturales de la estructura completa y de los elementos importantes de la misma, y los modos de vibración asociados a lo largo del eje de la vía
- El número de ejes, cargas por eje y separación de estos
- El amortiguamiento de la estructura
- Las irregularidades verticales de la vía
- La relación masa no suspendida/masa suspendida y las características de la suspensión del vehículo
- La presencia de apoyos regularmente espaciados en la losa del tablero y/o en la vía (vigas transversales, traviesas, etc.)
- Las características dinámicas de la vía (Balasto, traviesas, componentes de la vía, etc.)



### 1.3. COEFICIENTE DE IMPACTO

Uno de los parámetros que vamos a analizar corresponde al coeficiente de impacto para cada modelo. Este coeficiente lo obtenemos a partir de los desplazamientos del modelo numérico y resulta del cociente entre el modelo de tren de todos los posibles del HSLM que provoca el desplazamiento máximo sea cual sea su velocidad entre el desplazamiento que produciría la misma carga de forma estática, o lo que resulta equivalente para nuestro modelo, de dicho tren de cargas a una velocidad muy baja, en este caso la mínima que tenemos de 20 km/h.

$$\phi = \frac{\max S_{din,real}}{S_{est,20km/h}}$$

Donde:

- Max  $S_{din,real}$ : se corresponde a la sollicitación dinámica máxima debida a todos los posible trenes reales y velocidades de circulación
- $S_{est,20km/h}$ : Sollicitación estática debida al tren que produce el máximo desplazamiento a su paso a 20 km/h

Este coeficiente surge en 1955 fruto de un comite de expertos designado por la UIC (Unión Internacionale des Chemains de Fer), cuyo fin era establecer las bases para el cálculo dinámico de puentes de ferrocarril. El método de cálculo definido para tener en cuenta los efectos dinámicos estaba basado en la utilización de un tren de cargas, denominado UIC-71, y un coeficiente de impacto [10].

De este modo el desplazamiento que aparece en el denominador, y que habitualmente prescribe la normativa, no es el correspondiente a la sollicitación del tren que produce el máximo desplazamiento dinámico, sino el correspondiente al tren de cargas que luego se usa para evaluar la capacidad resistente, es decir, el tren UIC-71. Sin embargo, tiene más sentido desde el punto de vista de valorar la componente dinámica de la excitación, usar como referencia el mismo tren que produce los máximos desplazamientos dinámicos, que es lo que se emplea en este estudio.

Podemos entender el coeficiente de impacto como el factor por el que tenemos que multiplicar la sollicitación que produce una carga de forma estática, para obtener la sollicitación que produciría dicha carga aplicada de forma dinámica.

Entendemos que cuanto más cercano a 1 sea este coeficiente, menos influencia tendrá la carga aplicada de forma dinámica respecto de la sollicitación que produciría de forma estática. Dicho esto, en el otro lado tendríamos que si el coeficiente de impacto es alto, eso quiere decir que existe una gran diferencia entre la sollicitación que produce una carga de forma dinámica a la sollicitación que produciría la carga de forma estática y por tanto la necesidad de realizar un análisis dinámico para tener en cuenta este efecto y poder realizar un buen estudio del problema.



## 2 OBJETO DEL TRABAJO

---

El presente trabajo, se centra en el estudio de la influencia que tienen los trenes de alta velocidad a su paso por puentes de tipo arco inferior en función de la disposición tanto de sus arcos como de sus tirantes.

Para realizar este estudio, vamos a realizar un análisis dinámico del efecto que produce el tráfico ferroviario de alta velocidad en las diferentes estructuras que hemos definido. Este efecto dinámico se produce debido al carácter móvil de las cargas verticales que producen los trenes, en concreto, a la variación del punto de aplicación de estas cargas a lo largo del tiempo, a diferentes velocidades y teniendo en cuenta la equidistancia entre ellas, cuyo conjunto genera una excitación dinámica en la estructura.

El método a seguir para desarrollar este trabajo consiste en una primera definición de modelo numérico a analizar, a partir de uno real ya existente. Los modelos de puente que vamos a analizar se diferencian tanto en la disposición de los arcos como de los tirantes, pero la tipología de base en la misma para todos, puentes arco de tablero inferior. En lo relativo a las cargas incluimos las diferentes cargas estáticas presentes como son el peso propio de la estructura y la carga muerta relativa a una sección tipo de ferrocarril UIC de 2 carriles. Referido a la carga dinámica que vamos a incluir, consiste en 10 diferentes trenes de cargas HSLM-A (Tren dinámico Universal-A) propuestos por la IAPF-07 (Instrucción de Acciones a considerar en Puentes de Ferrocarril) y el Eurocódigo 1 (EN 1991-2:2003). El porqué del uso de este tipo de trenes, se debe a que conseguimos la envolvente de todos los trenes posibles para sus velocidades de circulación.

Los resultados a analizar más característicos que utilizaremos posteriormente para su análisis y comparación corresponden a [11]:

- Frecuencias naturales de la estructura y que modos de vibración excitan
- Desplazamiento vertical máximo del tablero, producido por el paso del tren en el eje de la vía
- Aceleración vertical máxima, producido por el paso del tren en el eje de la vía
- Coeficiente de impacto

Este proceso lo vamos a realizar mediante el método de los elementos finitos, utilizando el software Midas Civil 3D, el cual hemos usado en diferentes asignaturas del entorno de las estructuras en esta escuela.

Junto con el potente uso de las hojas de cálculo para poder procesar los diferentes resultados que obtendremos para cada modelo, con el objetivo de representarlos mediante gráficas para una comprensión más concisa y clara de los mismos.



# 3 ELABORACIÓN DEL MODELO

---

*No me preocupa que me robaran mi idea, sino que ellos  
no tengan ninguna propia.*

*- Nikola Tesla -*

**A** lo largo de este capítulo vamos describir el camino seguido para la realización del modelo. Está dividido en diferentes apartados o diferentes bloques que señalan cada paso o cada etapa de importancia.

A modo de resumen, la estructura que sigue este capítulo es la siguiente:

Primero vamos a introducir someramente los tipos de puentes que vamos a analizar, ya que profundizaremos más sobre ellos posteriormente.

A continuación, indicaremos cómo los hemos elegido, incluyendo la visita a Palma del Río, la cual fue aconsejada por el tutor, para tener una idea sobre un modelo real del tipo de puente que vamos a analizar y a partir de ello, desarrollar los diferentes modelos de estudio en una herramienta informática como es Midas Civil [12]. Por último, las diferentes disposiciones de atirantamientos que afectaran de una forma u otra al comportamiento estructural.

Posteriormente se esquematizan y representan los diferentes modelos que se van a estudiar en este proyecto. Están referenciados según el tipo de arco y disposición de los tirantes para una mejor comprensión a la hora de presentar y comparar los resultados. También reflejaremos cómo hemos realizado esa modelización mediante el programa de elementos finitos, Midas Civil [12], que ha sido la herramienta informática elegida para este estudio.

Por último y no menos importante, indicaremos los diferentes parámetros que vamos a comparar: Desplazamientos verticales máximos del tablero, aceleraciones máximas del tablero, coeficiente de impacto y los modos de vibración y frecuencias naturales de la estructura.

## 3.1. MODELO BÁSICO

### 3.1.1 Puente arco con tablero inferior

El tipo de estructura sobre el que se realiza este trabajo es el puente arco con tablero inferior. Lo que vamos a realizar y describir en este capítulo son las diferentes tipologías de arcos y disposiciones de los tirantes para elaborar diferentes modelos que analizaremos y compararemos posteriormente.

Básicamente el puente arco de tablero inferior tiene los siguientes elementos principales:

- Tablero: Para este trabajo es similar al del modelo real, el cual nos ha servido de base, el Puente Reina Sofía. Se mantiene intacto para los diferentes modelos.
- Arcos y tirantes: Son variables para la elaboración de los diferentes modelos y hemos obtenido esas diferentes tipologías y secciones del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

### 3.1.2 ¿Cómo hemos obtenido los diferentes modelos?

Como hemos comentado anteriormente, los diferentes modelos numéricos que hemos realizado están basado en un modelo real de un puente de la misma tipología, el puente Reina Sofía situado en Palma del Río.

Palma del Río, es una ciudad y municipio situada en la provincia de Córdoba, Andalucía, España. Está situada a unos 80 kilómetros de la capital autonómica, Sevilla.



Figura 1. Puente Reina Sofía

Dado que el objeto de este trabajo no es la elaboración del puente, sino un estudio y comparación de cómo es su respuesta ante diferentes disposiciones tanto de los tirantes, como de los arcos, el profesor nos aconsejó visitar un puente situado en este municipio, con el fin de tomarlo como base ya que es muy similar a lo que necesitamos para realizar el presente trabajo.

Debido a ello, se ha tomado como referencia dicho puente. A continuación, vamos a estudiar la estructura y definir que partes se han tomado iguales y cuales se han variado.

Para empezar el modelo, y como es lógico, realice un breve trabajo de campo, el cual consistió principalmente en visitar en persona el puente Reina Sofía.

La idea fue mediante fotos y medidas de elementos que pudiese tomar porque estuviesen a mi disposición, obtener unas medidas o unos parámetros aproximados de los elementos para posteriormente modelarlo en Midas Civil [12].

Así fue, tuve acceso a la pila donde se apoya el puente, teniendo esa medida y con ayuda de diferentes fotos tomadas estratégicamente obtuve los siguientes parámetros.

- Vigas longitudinales tubulares:

Uno de los principales elementos del puente son dos vigas longitudinales tubulares. Mediante la siguiente imagen podemos tener una idea aproximada del diámetro de dicha viga.

En base a ello decido tomar 60 cm de diámetro para la viga longitudinal.



Figura 2. Referencia Viga longitudinal



Figura 3. Referencia Viga longitudinal II

- Vigas transversales doble T:

Estas dos vigas longitudinales principales, tienen como elemento de unión entre ellas unas vigas transversales en forma de doble T y canto variable. En el modelo yo las he incluido con canto constante por sencillez.

De forma análoga hacemos el mismo proceso y obtenemos vigas en doble T con 0,79 metros de canto.

El puente Reina Sofía tiene una luz de unos 130 metros, y cuenta con 24 vigas transversales. Para nuestro modelo que tiene una luz de 100 metros, vamos a disponer 20 vigas transversales, es decir, una viga transversal cada 5 metros.



Figura 4. Referencia viga transversal

- Tablero:

Sobre estas vigas longitudinales se apoya un tablero de hormigón. El modelo de Palma del Río presenta una anchura de unos 13 metros y se encuentra dividido en 5 partes longitudinalmente. Nosotros hemos dispuesto un tablero de hormigón de 14 metros de ancho, también dividido en 7 partes longitudinalmente.

- Arco:

La disposición y morfología de esta estructura respecto al arco, es algo distinta, ya que en nuestro trabajo el arco es una variable.

Como parámetro básico partimos de una flecha de 15 metros con respecto a los 100 metros de luz. Esta relación flecha/luz igual a  $1/6.6$ . La hemos tomado basándonos en los estudios y datos que proporciona el libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

Más adelante se estudiará detalladamente este aspecto.

- Tirantes:

Al igual que ocurre con el arco, los tirantes también son una variable de estudio, por lo que van a variar para los

diferentes modelos. Básicamente conectan las vigas longitudinales y el arco para hacer que trabajen conjuntamente, con el fin de resistir de forma óptima los esfuerzos que se generan.

A continuación, mediante una tabla vamos a mostrar los parámetros básicos a modo de comparación o referencia sobre el puente Reina Sofía y el modelo que hemos adaptado para este trabajo.

	<b>Reina Sofía</b>	<b>Modelo trabajo</b>
<b>Luz</b>	130 metros	100 metros
<b>Ancho del puente</b>	20 metros	16 metros
<b>Ancho del tablero</b>	15 metros	14 metros

Tabla 1. Parámetros básicos

En este apartado básicamente hemos hablado del modelo real que hemos tomado como referencia, es decir, que elementos básicos necesitamos para elaborar el modelo de barras. En los siguientes apartados y capítulos entraremos más en detalle sobre los diferentes modelos numéricos, esto es para tener una idea sobre la geometría y esqueleto de la estructura.

## 3.2. MODELOS PARA ESTUDIAR

En este apartado previo a la modelización de la estructura y sus diferentes variantes a estudiar en función de la tipología de arcos y disposición de los tirantes, vamos a mostrar diferentes ejemplos de las diferentes tipologías de arco y disposiciones de tirantes.

### 3.2.1 En función del arco

En este primer apartado vamos a mostrar diferentes tipologías en relación a los arcos.

Estos diferentes modelos los hemos obtenido del ‘Capítulo 17.3.2.1.- Arcos especiales’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

#### 3.2.1.1 Dos arcos paralelos

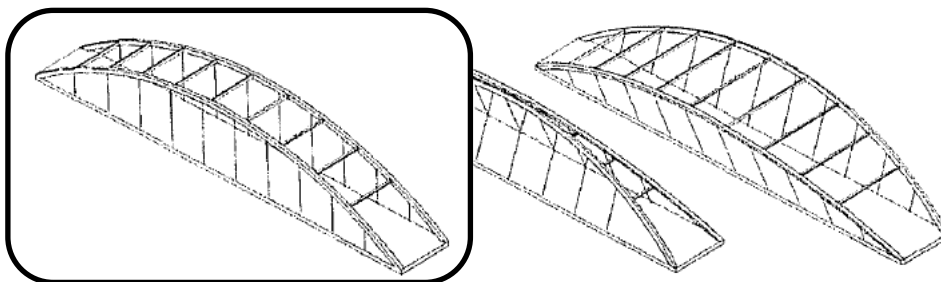


Figura 5. Puentes arco de tablero inferior con dos arcos paralelos



### 3.2.1.2 Dos arcos paralelos cerrados

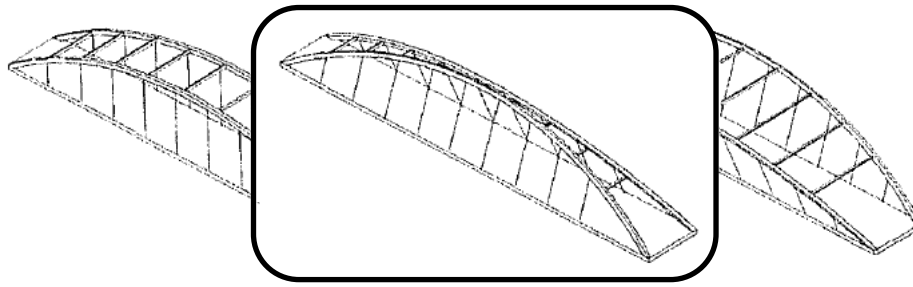


Figura 6. Puente arco tablero inferior con dos arcos cerrados

### 3.2.1.3 2 arcos paralelos abiertos

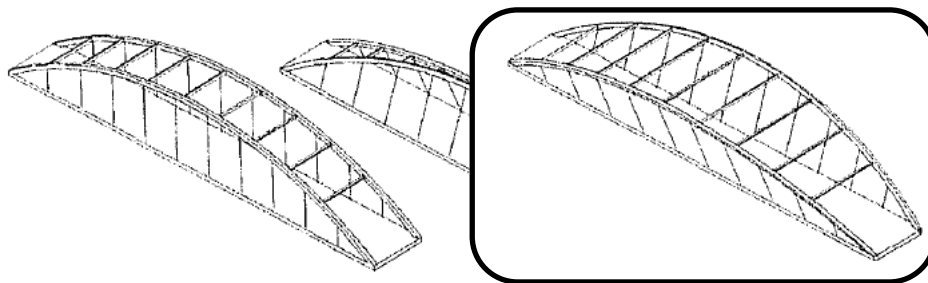


Figura 7. Puentes arco de tablero inferior con dos arcos abiertos

### 3.2.1.4 Un solo arco

La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.10’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

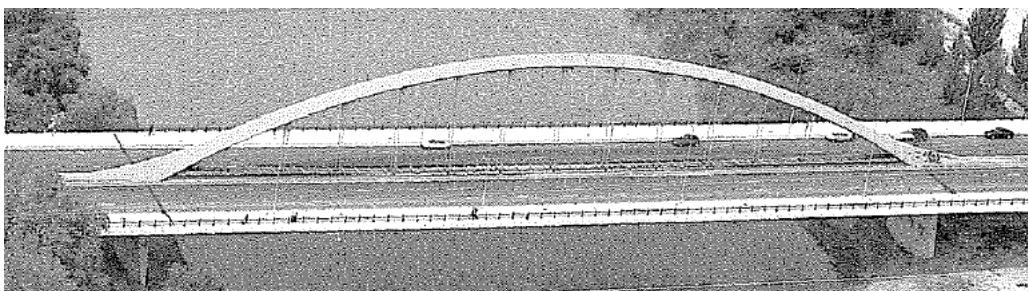


Figura 8. Puentes arco de tablero inferior con un arco centrado

## 3.2.2 En función de los tirantes

En este subapartado muy relacionado con el anterior, vamos a exponer las diferentes disposiciones de tirantes que vamos a utilizar.

Las diferentes disposiciones han sido obtenidas del ‘Capítulo 17.3.1.- Arcos de hormigón con tablero intermedio e inferior’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

### 3.2.2.1 Verticales

Esta primera disposición puede ser la mas sencilla o sugerente, consiste en una colocación vertical de los tirantes entre arco y viga longitudinal. La hemos obtenido de la 'Figura 17.3.01 (1)' del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

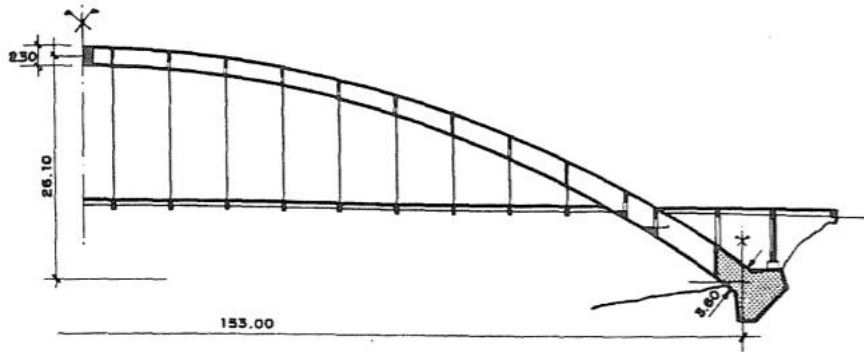


Figura 9. Tirantes tipo verticales

### 3.2.2.2 Abanico

Esta segunda tipología la he denominado abanico, ya que la figura que se observa de perfil es muy similar. La hemos obtenido de la 'Figura 17.3.13 (2)' del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]



Figura 10. Tirantes tipo abanico

### 3.2.2.3 Celosía

Esta tipología corresponde a una especie de triangulización entre el arco y las vigas longitudinales, podría considerarse como una especie de celosía la que acaban formando conjuntamente estos elementos junto con los tirantes. La hemos obtenido de la 'Figura 17.3.01 (3)' del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

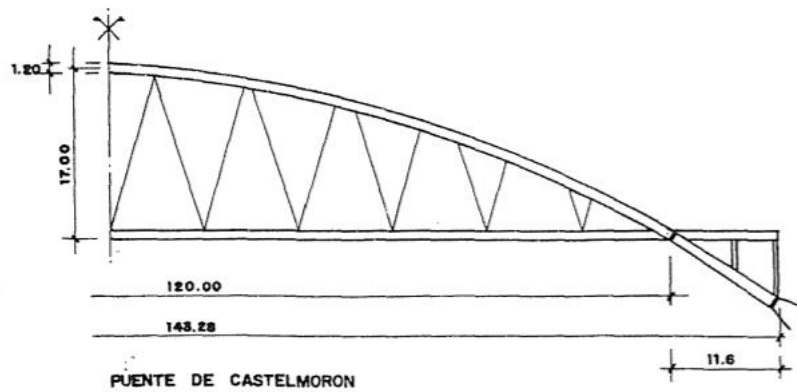


Figura 11. Tirantes tipo celosía

### 3.2.2.4 Cruzados

Por último, tenemos una tipología muy parecida a la que se observa en el Puente Reina Sofia, en la que se forma una especie de red entre los tirantes. La hemos obtenido de la 'Figura 17.3.08 (3)' del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

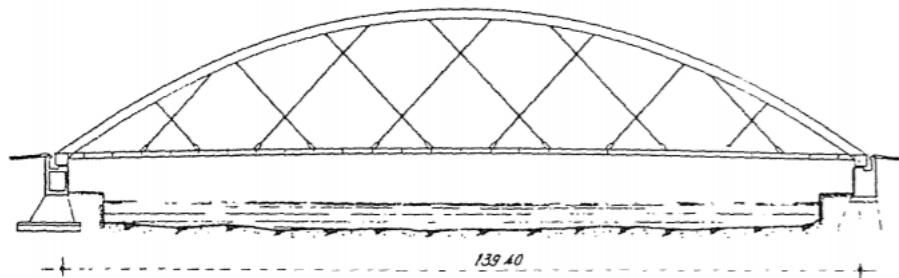


Figura 12. Tirantes tipo cruzados

## 3.3. Modelización en Midas Civil

En el siguiente apartado vamos a exponer como hemos modelizado dicha estructura mediante la herramienta informática Midas Civil [12]. En este apartado si vamos a profundizar, detallar y reflejar con más precisión todo lo relativo a la estructura.

### 3.3.1 Materiales

Este primer apartado refleja que materiales hemos introducido en el programa para modelizer la estructura.

Basicamente son dos: acero y hormigón.

#### - Acero S275:

Como acero, hemos definido un S275, el cual usaremos para las vigas longitudinales, las vigas transversales, el arco y los tirantes.

Las propiedades son las siguientes:


General															
Material ID	1														
Name	S275														
Elasticity Data															
Type of Design	Steel														
															
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Steel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Standard</td> <td>EN05(S)</td> </tr> <tr> <td>DB</td> <td>S275</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Concrete</th> </tr> <tr> <td>Standard</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Code</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DB</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Steel		Standard	EN05(S)	DB	S275	Concrete		Standard		Code		DB	
Steel															
Standard	EN05(S)														
DB	S275														
Concrete															
Standard															
Code															
DB															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Steel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Modulus of Elasticity :</td> <td>2.1000e+008 kN/m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Poisson's Ratio :</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>Thermal Coefficient :</td> <td>6.6667e-006 1/[F]</td> </tr> <tr> <td>Weight Density :</td> <td>76.98 kN/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Use Mass Density:</td> <td>7.85 kN/m<sup>3</sup>/g</td> </tr> </tbody> </table>		Steel		Modulus of Elasticity :	2.1000e+008 kN/m <sup>2</sup>	Poisson's Ratio :	0.3	Thermal Coefficient :	6.6667e-006 1/[F]	Weight Density :	76.98 kN/m <sup>3</sup>	<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85 kN/m <sup>3</sup> /g		
Steel															
Modulus of Elasticity :	2.1000e+008 kN/m <sup>2</sup>														
Poisson's Ratio :	0.3														
Thermal Coefficient :	6.6667e-006 1/[F]														
Weight Density :	76.98 kN/m <sup>3</sup>														
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85 kN/m <sup>3</sup> /g														

Figura 13. Propiedades Acero

- **Hormigón HA-30:**

El hormigón usado para el tablero corresponde a un HA-30, el cual tiene las siguientes propiedades:

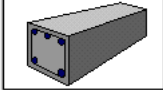
General															
Material ID	2														
Name	C30/37														
Elasticity Data															
Type of Design	Concrete														
															
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Steel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Standard</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DB</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="2">Concrete</th> </tr> <tr> <td>Standard</td> <td>EN04(RC)</td> </tr> <tr> <td>Code</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DB</td> <td>C30/37</td> </tr> </tbody> </table>		Steel		Standard		DB		Concrete		Standard	EN04(RC)	Code		DB	C30/37
Steel															
Standard															
DB															
Concrete															
Standard	EN04(RC)														
Code															
DB	C30/37														

Figura 14. Propiedades Hormigón

<input type="checkbox"/> Concrete		
Modulus of Elasticity :	<input type="text" value="3.2836e+007"/>	kN/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio :	<input type="text" value="0.2"/>	
Thermal Coefficient :	<input type="text" value="5.5556e-006"/>	1/[F]
Weight Density :	<input type="text" value="25"/>	kN/m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	<input type="text" value="2.549"/>	kN/m <sup>3</sup> /g

Figura 15. Propiedades hormigón II

- Casos especiales:

Para la elaboración del modelo hemos tenido que definir un hormigón ligero, que corresponde al mismo que acabamos de definir, HA-30, pero con una densidad nula, por lo que, a efectos de cálculo, no aporta peso a la estructura.

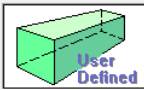
General	
Material ID	<input type="text" value="3"/> Name <input type="text" value="HA-30 Ligero"/>
Elasticity Data	
Type of Design	<input type="text" value="User Defined"/> 
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic
User Defined	
Modulus of Elasticity :	<input type="text" value="3.2836e+007"/> kN/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio :	<input type="text" value="0.2"/>
Thermal Coefficient :	<input type="text" value="5.5556e-006"/> 1/[F]
Weight Density :	<input type="text" value="0"/> kN/m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	<input type="text" value="2.549"/> kN/m <sup>3</sup> /g

Figura 16. Propiedades Hormigón Ligero

También hemos tenido que definir un material compuesto para el tablero, el cual incluye ambos materiales definidos anteriormente el acero S275 y el hormigón HA-30 ligero.

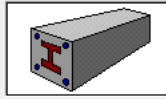
General	
Material ID	4
Name	C30/37
Elasticity Data	
Type of Design	SRC
	
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic
Steel	
Standard	EN05(S)
DB	S275
Concrete	
Standard	None
Code	
DB	
Steel	
Modulus of Elasticity :	2.1000e+008 kN/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio :	0.3
Thermal Coefficient :	6.6667e-006 1/[F]
Weight Density :	76.98 kN/m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85 kN/m <sup>3</sup> /g
<input type="checkbox"/> Concrete	
Modulus of Elasticity :	3.2836e+007 kN/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio :	0.2
Thermal Coefficient :	5.5556e-006 1/[F]
Weight Density :	0 kN/m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	2.549 kN/m <sup>3</sup> /g

Figura 17. Propiedades Material Mixto

### 3.3.2 Secciones

A continuación, vamos a reflejar las distintas secciones que se pueden encontrar a lo largo de la estructura.

- Viga longitudinal tubular:

Estas vigas son unas de las partes principales de la estructura. Sobre ellas se apoyan las vigas transversales, que son las que soportan el tablero.

Tienen un diametro de 60 centímetros y un espesor de 10 centímetros.

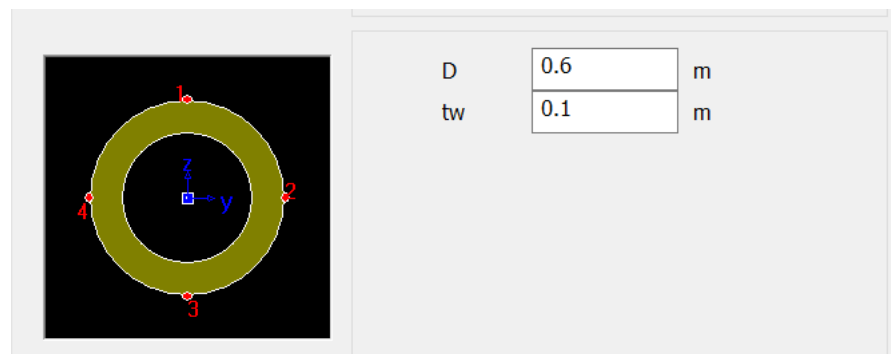


Figura 18. Sección Viga longitudinal

- Viga transversal:

Estas vigas, sobre las que se apoya el tablero, las hemos modelado como un elemento mixto. La losa de hormigón las hemos introducido con el material comentado anteriormente como HA-30 ligero, el cual no tiene peso propio. La razón de esto es porque el tablero de hormigón lo introducimos posteriormente mediante elementos longitudinales.

La viga en doble T metálica es un acero S275.

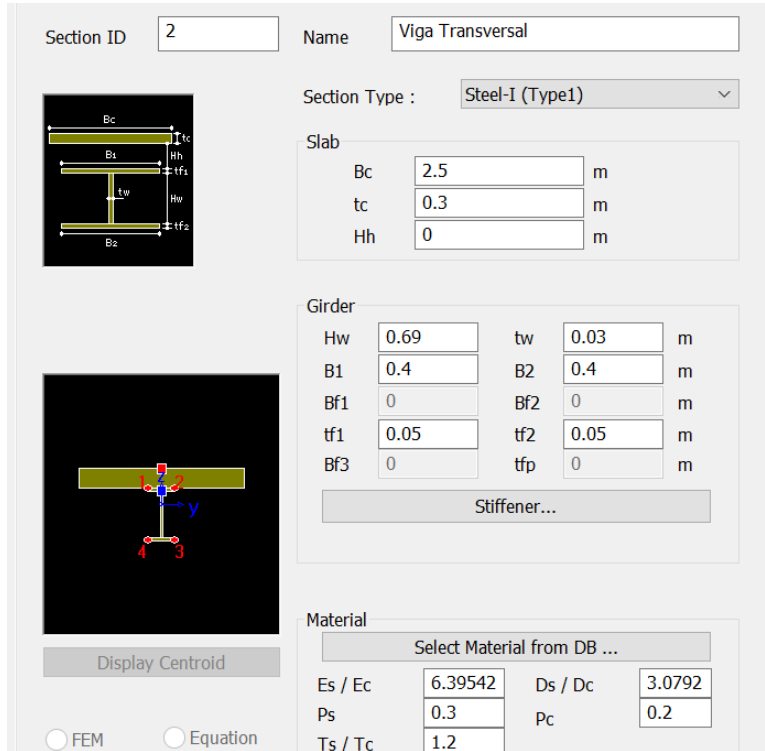


Figura 19. Sección Viga transversal

- Tablero transversal:

Estos elementos son básicamente de unión, con el fin de discretizar la estructura en un mayor número de elementos y obtener así un análisis más preciso. También se utiliza el hormigón ligero (HA-30) para este elemento.

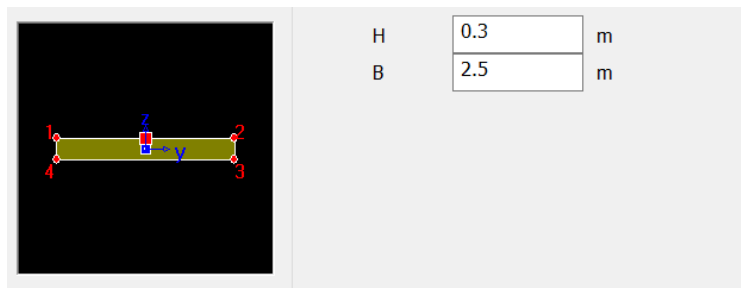


Figura 20. Sección tablero transversal

- Tablero longitudinal:

Esta sección es bastante importante ya que se utiliza para los elementos que conforman el tablero de la estructura. En este caso si que utilizamos el material HA-30 con todas sus características para estos elementos.

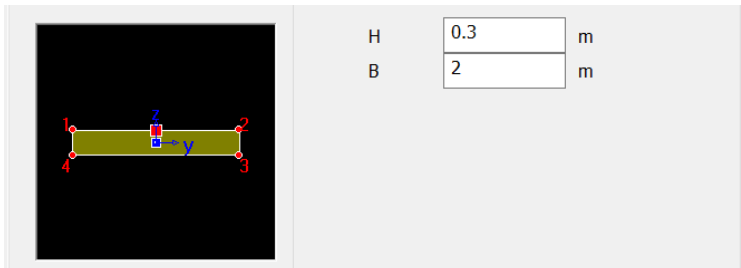


Figura 21. Sección Tablero longitudinal

- Arco:

El arco, que tiene forma tubular, y cuyo material es acero S275, tiene las siguientes dimensiones.

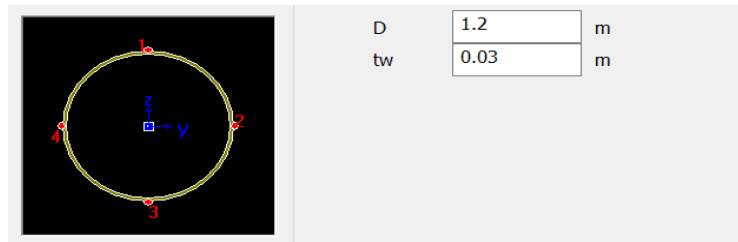


Figura 22. Sección Arco

- Tirantes:

Los tirantes, son de sección circular maciza, logicamente, ya que son cables de acero, que solo trabajan a esfuerzos axiales de tracción.

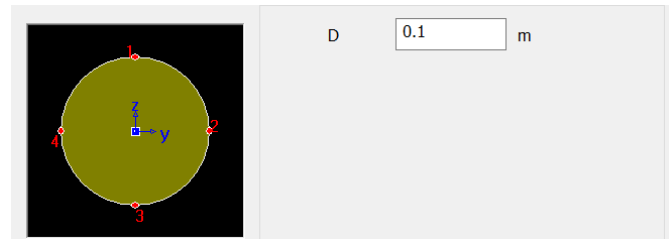


Figura 23. Sección tirantes

- Rigidizadores:

He denominado rigidizadores a los elementos que unen los arcos entre sí. Son de sección y material similar a los tirantes, con la diferencia de que no trabajan solo a esfuerzos axiales de tracción.

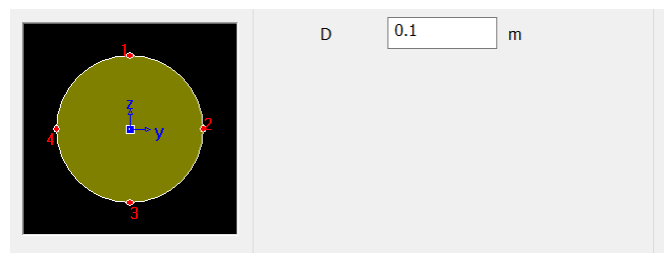


Figura 24. Sección rigidizadores

### 3.3.3 Modelo numérico tablero

A modo de resumen, mediante un dibujo básico donde viene reflejado que elemento real hemos usado para cada elemento del modelo de barras, así como la geometría o modelo básico del tablero. En apartados posteriores reflejaremos lo relativo a los arcos y tirantes. Las figuras representan el modelo de barras tal y como lo generamos en Midas Civil [12].



- Vista completa del tablero

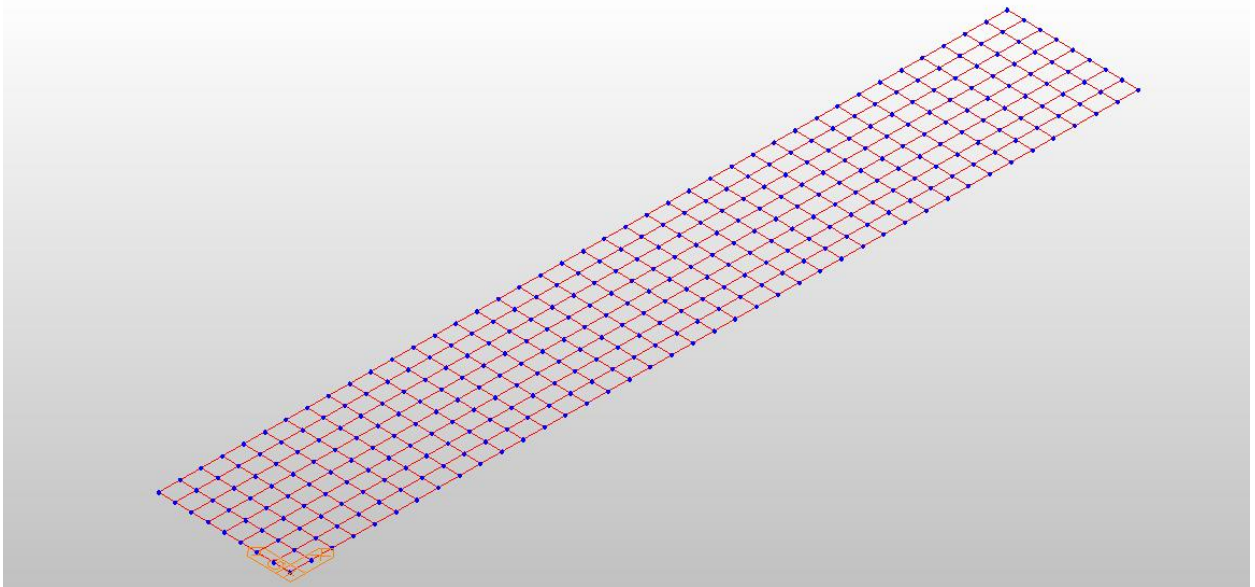


Figura 25. Vista completa tablero

- Vigas longitudinales:

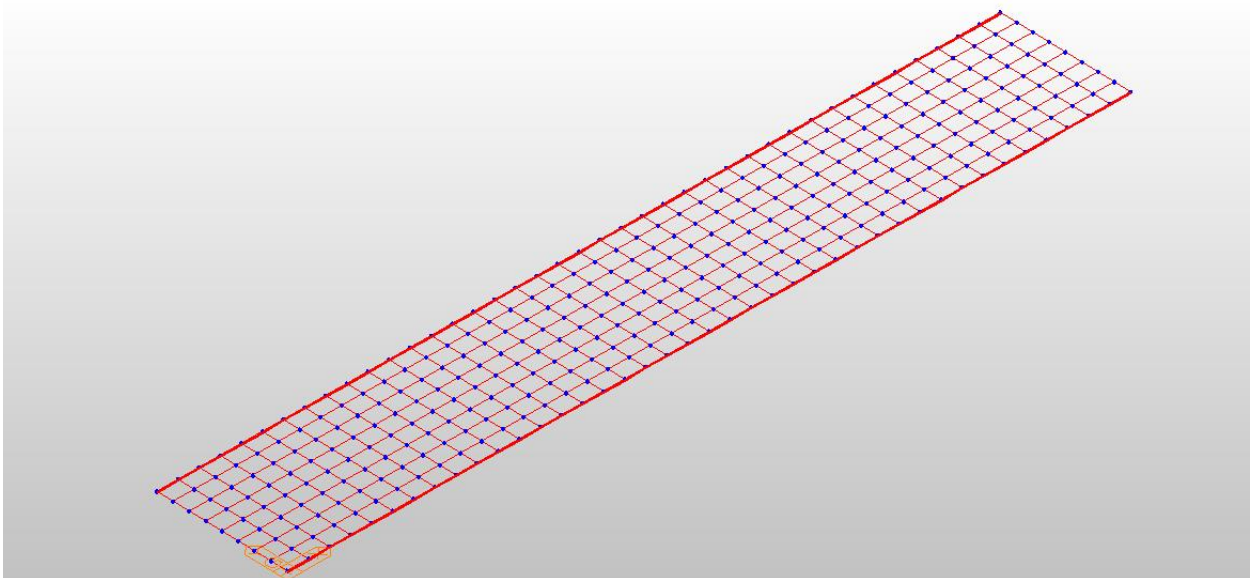


Figura 26. Vigas longitudinales Midas

- Vigas transversales:

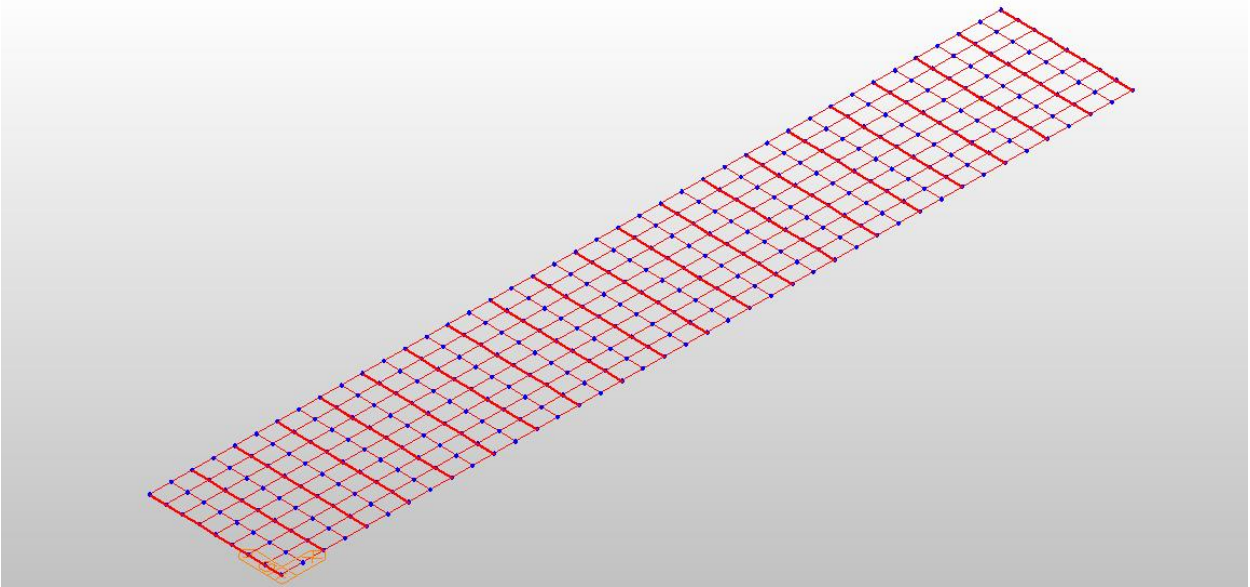


Figura 27. Vigas transversales Midas

- Tablero transversal:

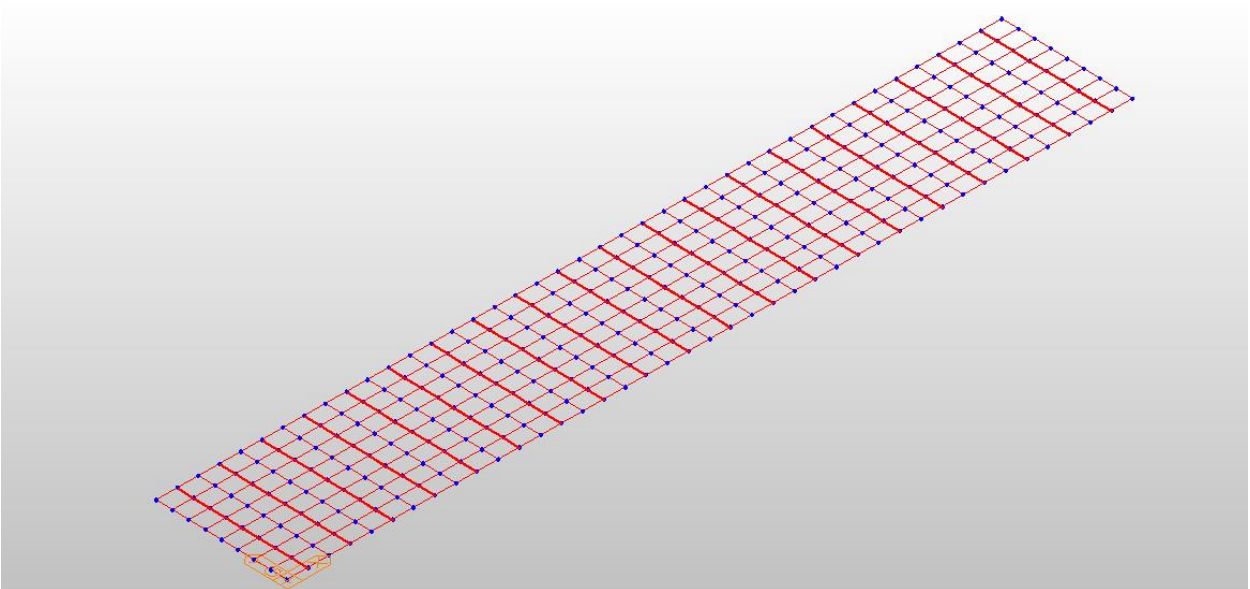


Figura 28. Tablero transversal Midas

- Tablero longitudinal:

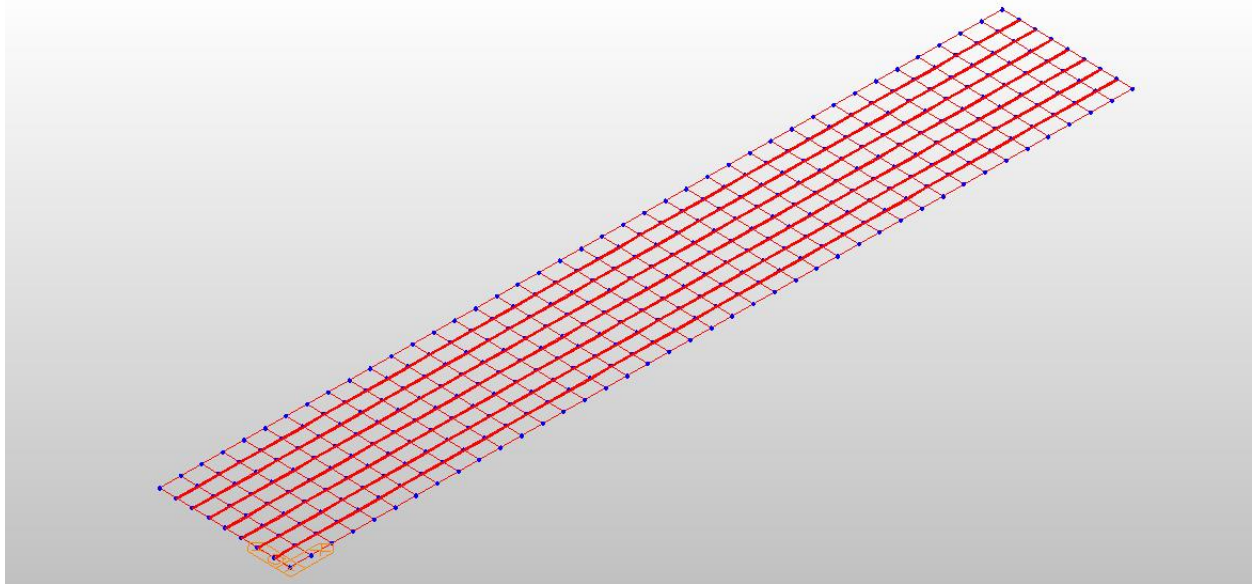


Figura 29. Tablero longitudinal Midas

A continuación, vamos a mostrar el modelo 3D, tal y como se vería en la herramienta informática, Midas Civil, elegida para este Proyecto.

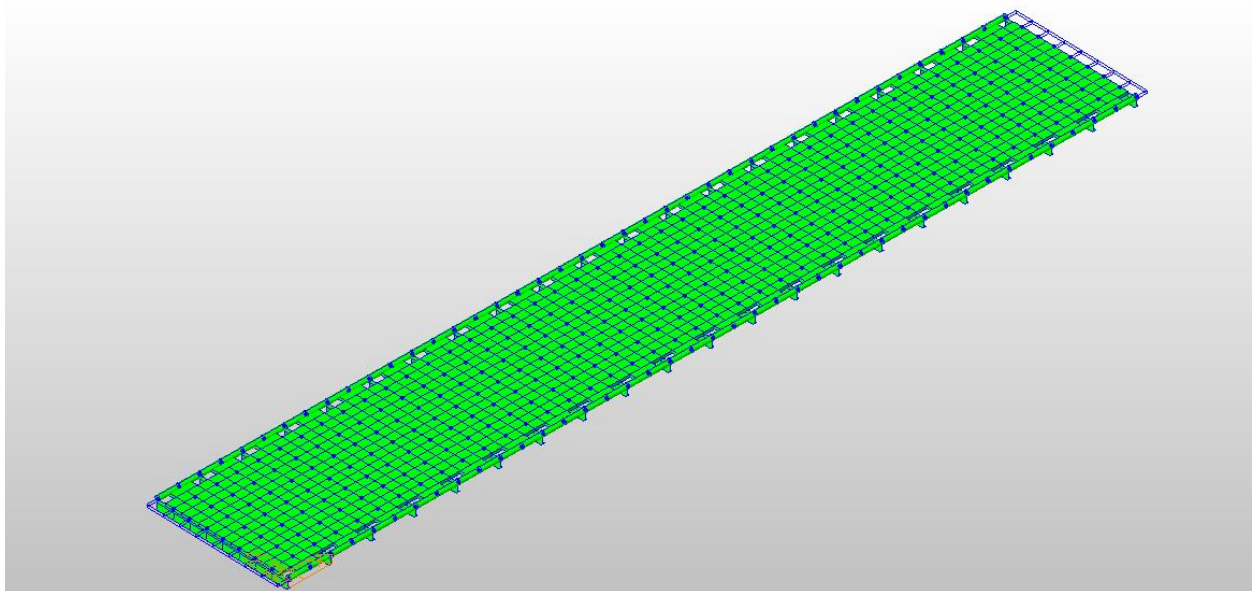


Figura 30. Vista tablero completo 3D

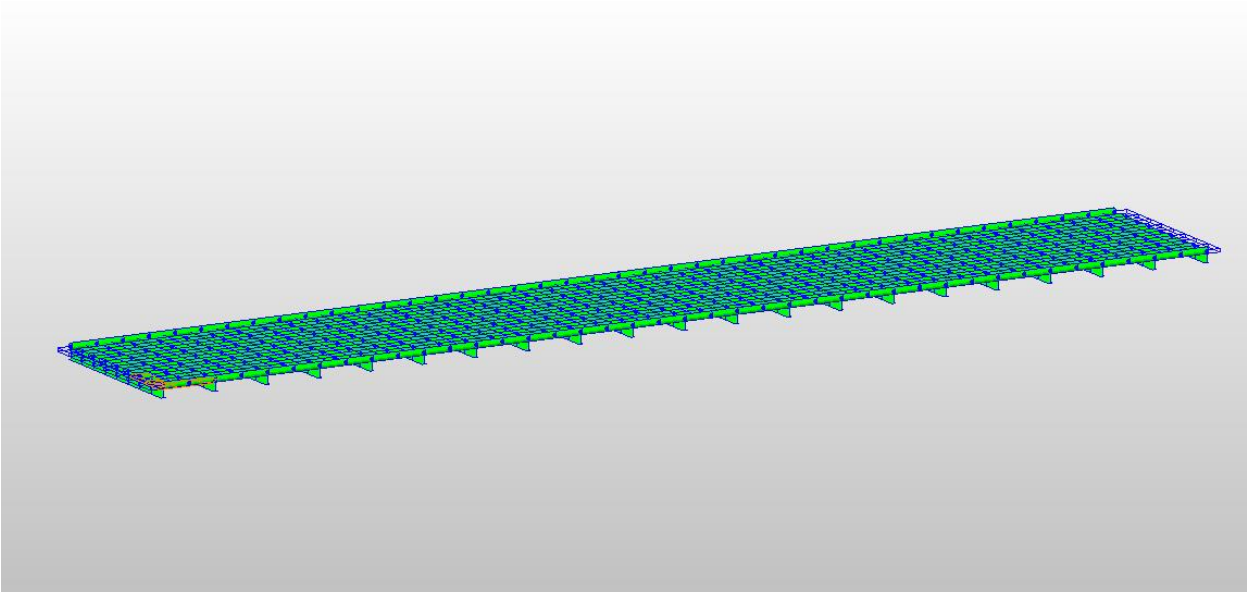


Figura 31. Vista tablero completo 3D II

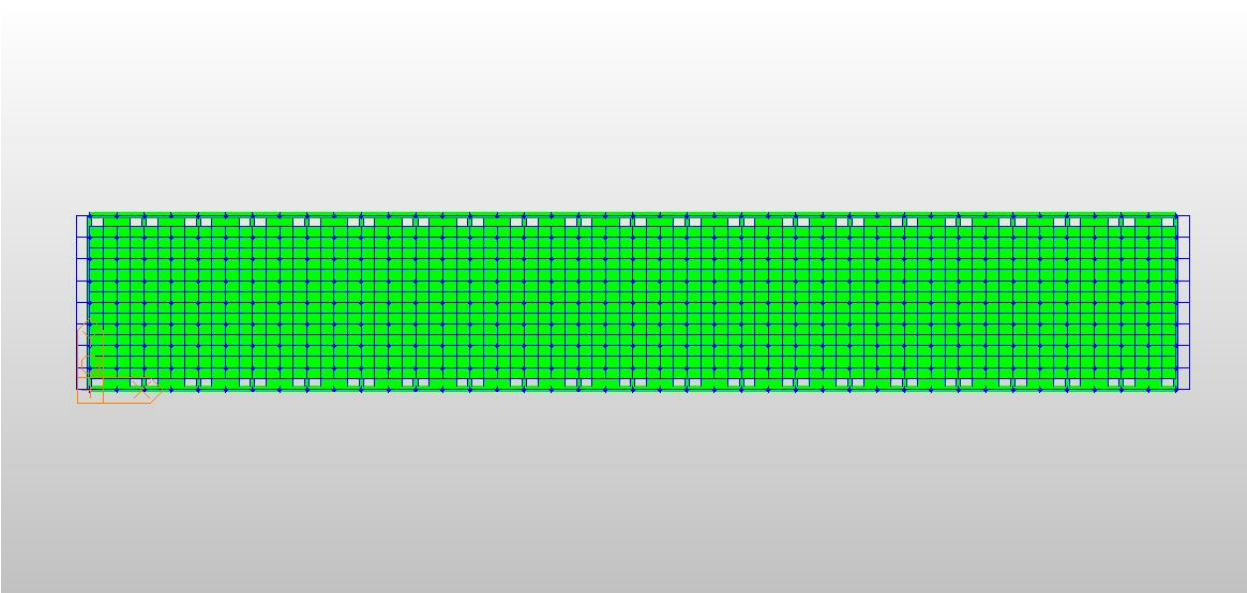


Figura 32. Vista tablero completo 3D III

Por último y a modo de resumen vamos a detallar algunos parámetros básicos de la estructura que se pueden apreciar en las imágenes mostradas.

- Vigas longitudinales:

El ancho de la estructura es de 16 metros. Las vigas longitudinales se encuentran situadas en sus extremos, es decir, con una separación de 16 metros entre ellas.

- Vigas transversales:

La longitud total de la estructura es de 100 metros, y se han colocado 21 vigas transversales (teniendo en cuenta la del origen) a lo largo de la misma, esto da lugar a una viga transversal cada 5 metros.

- Tablero transversal:

Debido a que tenemos una viga transversal cada 5 metros, hemos incluido un elemento situado a 2,5

metros de cada viga transversal para obtener resultados más precisos o completos, es decir, para tener una mayor discretización de la estructura. Colocando un total de 20 elementos con esta sección, recordamos que estos elementos no tienen peso propio.

- Tablero longitudinal:

Estos elementos tienen una anchura de 2 metros y van a lo largo de toda la estructura. Estos elementos son los que conforman el tablero, están situados 1 metro hacia el interior de las vigas longitudinales, con lo que el conjunto de los 5 conforma el tablero de hormigón cuya anchura es de 10 metros.

	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Espesor</b>
<b>Vigas longitudinales (metros)</b>	100	0,6 (diámetro)	0,1
<b>Vigas transversales (metros)</b>	16	0,79	Variable
<b>Tablero</b>	100	14	0,3
<b>Arco</b>	100 (planta)	1,2 (diámetro)	0,03
<b>Tirantes</b>	Variable	0,1	0,1 (macizo)
<b>Rigidizadores</b>	Variable	0,1	0,1 (macizo)

Tabla 2. Detalles elementos principales

### 3.3.4 Modelo numérico arcos y tirantes

En este apartado vamos a definir y referenciar en función de unas etiquetas sencillas, cada modelo que vamos a estudiar, analizar y comparar, en base a su tipología de arco y la disposición de sus tirantes.

La idea es la siguiente, tenemos 4 modelos distintos en función de la tipología de los arcos y otros 4 modelos diferentes en función de la disposición de los tirantes, como resultado final, obtenemos 16 modelos con los que trabajar.

#### 3.3.4.1 En función del arco

En función de la tipología de su arco vamos a tener cuatro modelos diferentes.

Estos diferentes modelos los hemos obtenido del ‘Capítulo 17.3.2.1.- Arcos especiales’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

##### 3.3.4.1.1 Dos arcos paralelos

Este primer modelo, al que de aquí en adelante vamos a llamar “Modelo 1”, está formado por 2 arcos paralelos, con una distancia de 16 metros entre ellos.

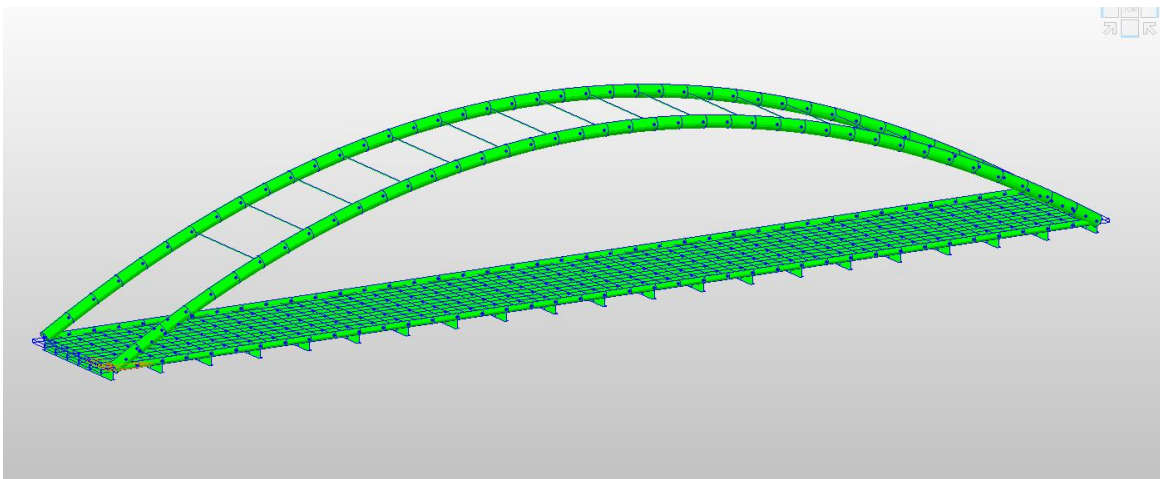


Figura 33. Modelo 1: Dos arcos paralelos



Tal y como se puede apreciar, esta imagen refleja el tablero, el cual ya ha sido estudiado anteriormente, junto con ambos arcos paralelos y los rigidizadores que unen los arcos.

#### 3.3.4.1.2 Dos arcos paralelos cerrados

A diferencia del modelo anterior, en este caso tenemos los arcos con una inclinación de  $28^\circ$  respecto a la vertical, hacia en interior de la estructura. En la base los arcos siguen distandose 16 metros.

Esta tipología la vamos a denominar “Modelo 2”.

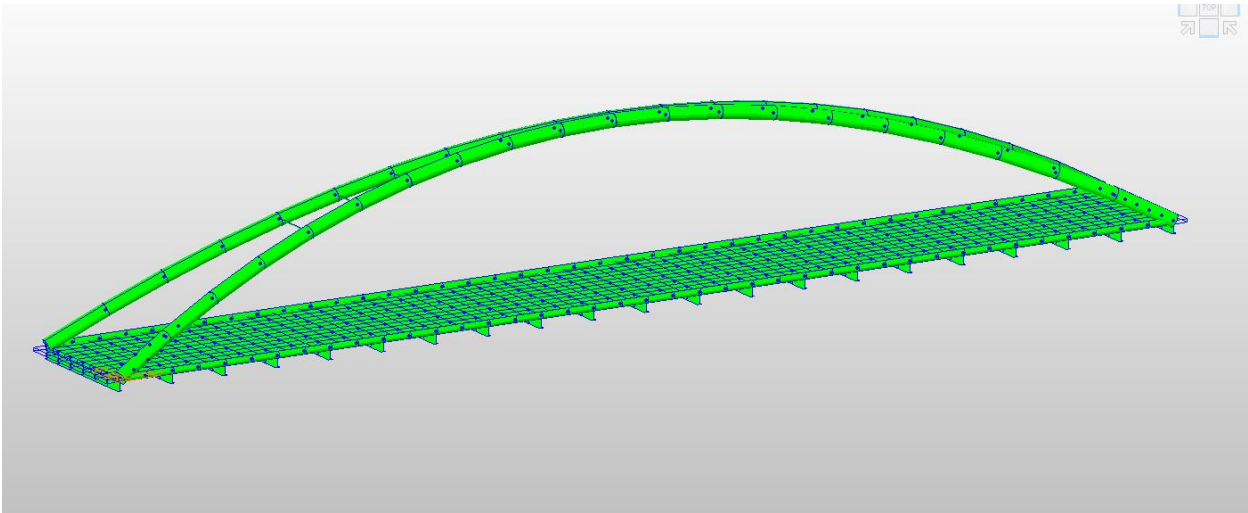


Figura 34. Modelo 2: Dos arcos cerrados

#### 3.3.4.1.3 Dos arcos paralelos abiertos

El modelo que vamos a describir a continuación es muy similar a los dos mostrados anteriormente, 2 arcos paralelos en su base e inclinados, con la diferencia de que esta vez se tumban hacia el exterior de la estructura, con la misma inclinación que el Modelo “2”.

Esta tipología la vamos a denominar “Modelo 3”.

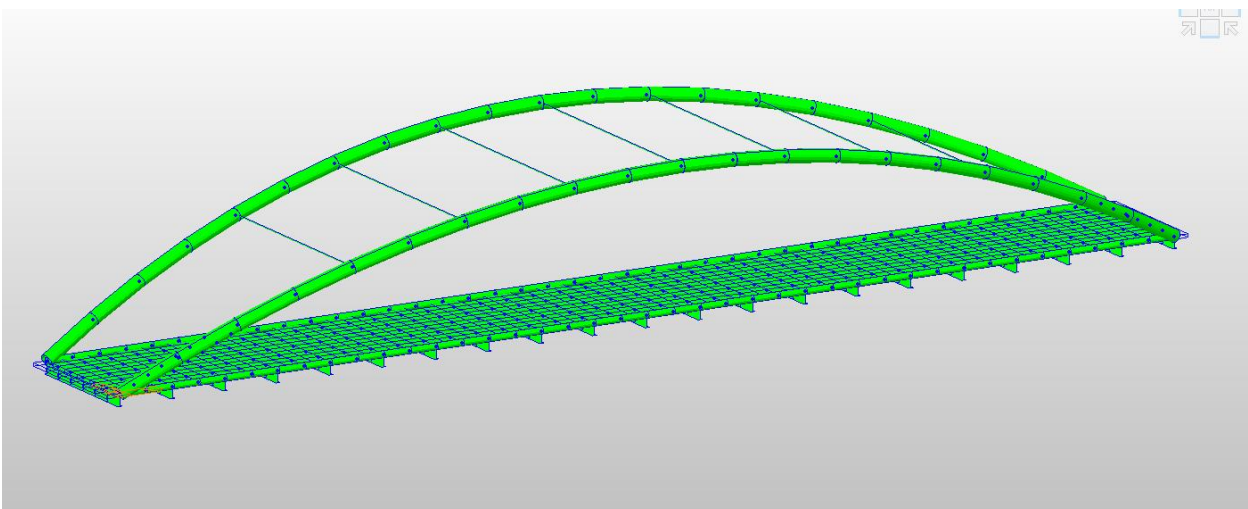


Figura 35. Modelo 3: Dos arcos abiertos

#### 3.3.4.1.4 Un solo arco

Por último, tenemos una tipología distinta a las anteriores, 1 solo arco situado en el centro del tablero, es decir, a 6 metros de ambos extremos.

Continuando la numeración seguida hasta ahora, esta tipología la denominaremos “Modelo 4”

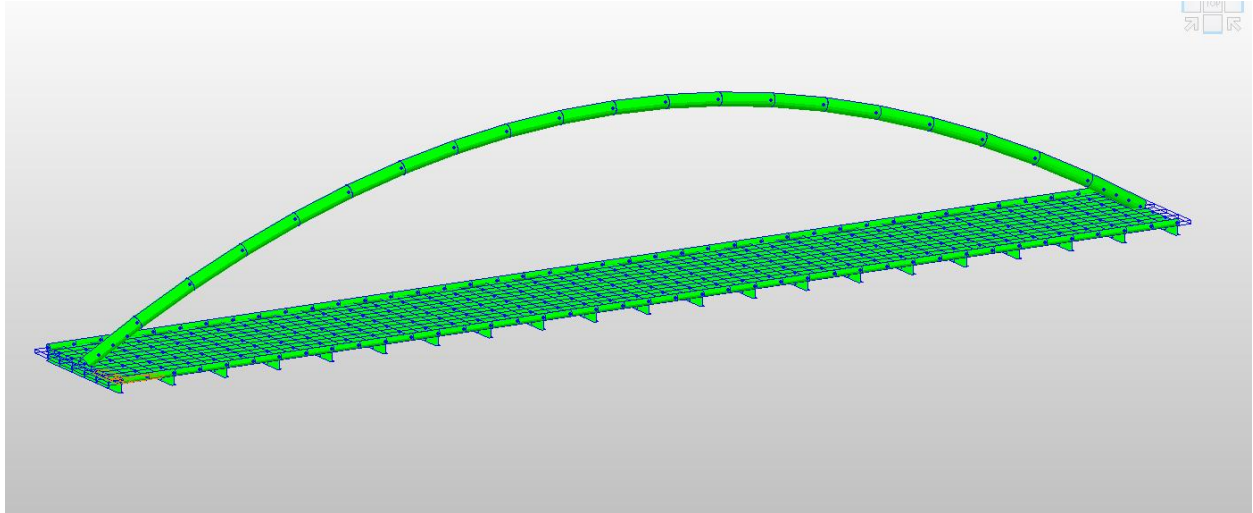


Figura 36. Modelo 4: Un arco centrado

#### 3.3.4.1.5 Un solo arcos con tablero sección cajón

Esta variante no sería exactamente un cambio en la tipología del arco, ya que lo que cambiamos es el tablero, introducimos un nuevo modelo que consiste en una viga mixta de tipo cajon de acero, con el tablero de hormigón, en lugar de las vigas transversales metálicas con sección de tipo doble T y el tablero de hormigón apoyado sobre estas.

Aun así, lo denominamos “Modelo 5”.

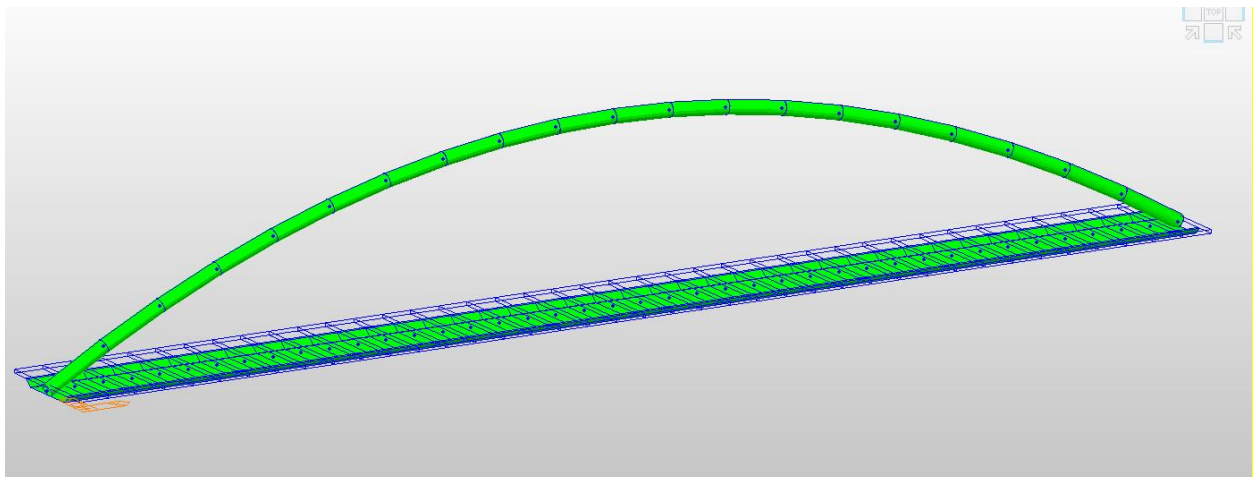


Figura 37. Modelo 5: Un arco centrado con tablero sección en cajón

La sección del tablero es la siguiente:

Section Type : Steel-Tub (Type1)

Slab

Bc	14	m
tc	0.3	m
Hh	0	m

Girder

Hw	0.45	tw	0.1	m
B1	10	B2	9	m
Bf1	0.3	Bf2	0	m
tf1	0.01	tf2	0.1	m
Bf3	0.1	tfp	0.1	m

Stiffener...

Tal y como se puede observar, es similar al tablero que hemos usado para los otros modelos. Seguimos teniendo un ancho de 14 metros para la losa de hormigón, con 30 centímetros de espesor. Lo que varía principalmente es que ahora en vez de tener el tablero sujeto por vigas transversales unidas a vigas longitudinales, tenemos una viga cajón metálica, concretamente de acero S275.

A destacar que hemos incluido un alma central en la sección de tipo cajón del mismo material, espesor y altura que las almas laterales.

### 3.3.4.2 En función de los tirantes

En este subapartado muy relacionado con el anterior, vamos a exponer las diferentes disposiciones de tirantes que vamos a utilizar, 5 en total, para combinar con los 5 modelos de arco y así obtener esos 20 modelos mencionados anteriormente.

Debido a las diferentes tipologías de arcos, y para no ilustrar los tirantes sujetos en el aire, en la “nada”, vamos a ilustrarlos mediante el Modelo 1 de arco.

En este caso en vez de usar números para los diferentes modelos como hemos hecho para los arcos, vamos a utilizar letras.

Las diferentes disposiciones han sido obtenidas del ‘Capítulo 17.3.1.- Arcos de hormigón con tablero intermedio e inferior’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

#### 3.3.4.2.1 Verticales

Esta primera disposición puede ser la más sencilla o sugerente, consiste en una colocación vertical de los tirantes entre arco y viga longitudinal. La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.01 (1)’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

Situamos los tirantes cada 5 metros, coinciden con las vigas transversales en la base, lo que da lugar a 19 tirantes a cada lado de la estructura, unen el arco con las vigas longitudinales.



Este primero correspondería al “tipo a”

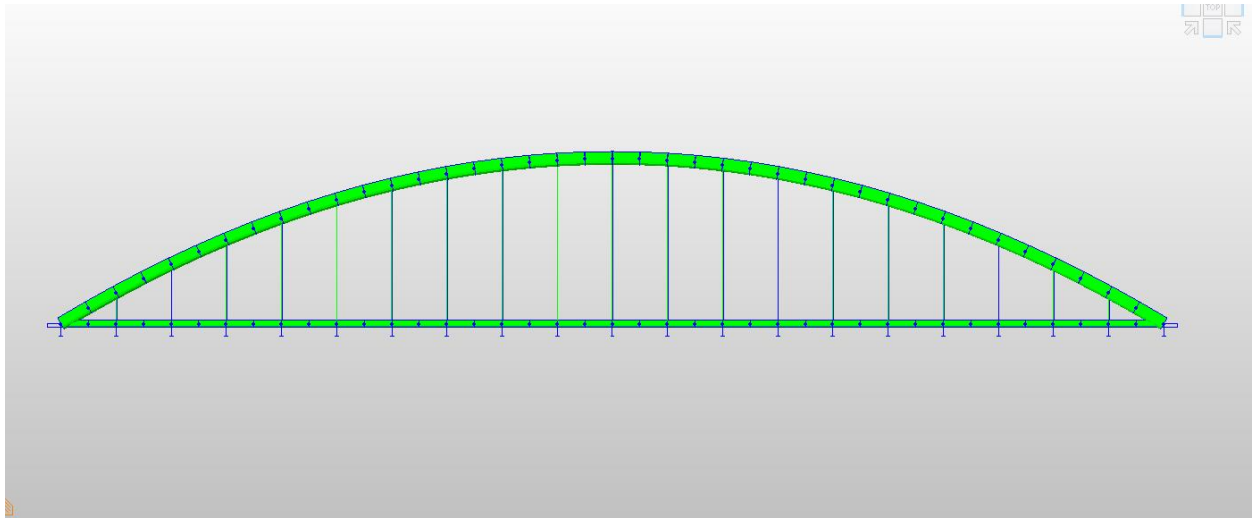


Figura 38. Tipo a: Tirantes verticales

#### 3.3.4.2.2 Abanico

Esta segunda tipología la he denominado abanico, ya que la figura que se observa de perfil es muy similar. La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.13 (2)’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

La denominamos “tipo b”.

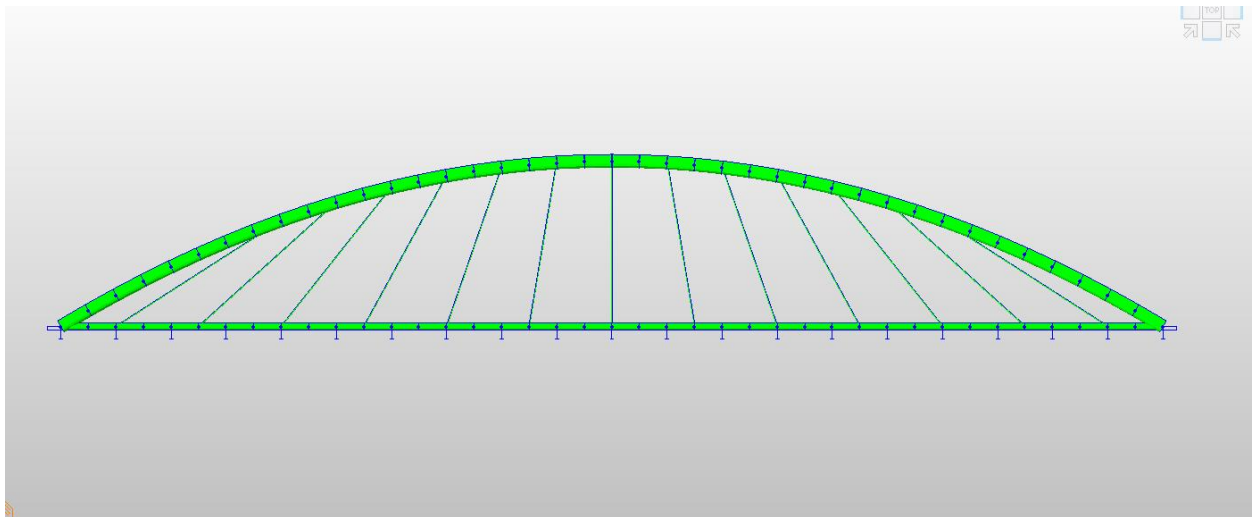


Figura 39. Tipo b: Tirantes en abanico

#### 3.3.4.2.3 Celosía

Esta tipología corresponde a una especie de triangulación entre el arco y las vigas longitudinales, podría considerarse como una especie de celosía la que acaban formando conjuntamente estos elementos junto con los tirantes. La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.01 (3)’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

La denominamos “tipo c”.

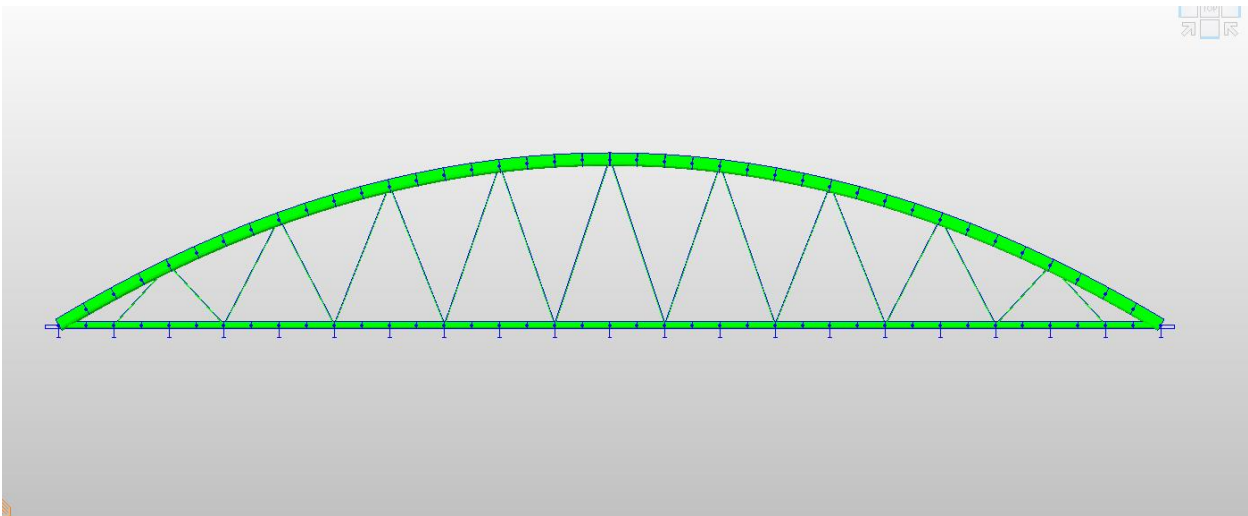


Figura 40. Tipo c: Tirantes en celosía

#### 3.3.4.2.4 Cruzados

Por último, tenemos una tipología muy parecida a la que se observa en el Puente Reina Sofía, en la que se forma una especie de red entre los tirantes. La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.08 (3)’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [1]

Denominamos a esta disposición “tipo d”.

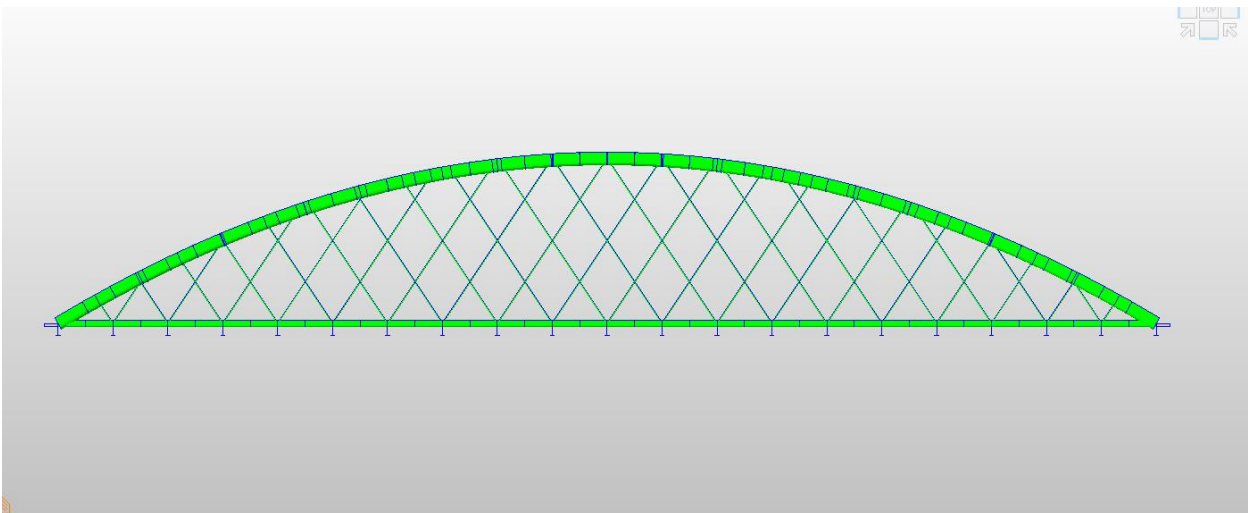


Figura 41. Tipo d: Tirantes cruzados

Una vez tenemos definidos los diferentes modelos, la forma de etiquetarlos o referenciarlos es la siguiente:

- Modelo XY

Donde:

- X corresponde a un número, en función a que tipología de arco nos referimos.
- Y corresponde a una letra, en función de la disposición de tirante que se usa.

### 3.3.5 Condiciones de contorno

La unión de la estructura al terreno es biarticulada, los esfuerzos del tablero se transfieren a las vigas longitudinales, a través de las vigas transversales, que son parte del “esqueleto principal” y estas se encargan de transmitirlos a las pilas de apoyo y posteriormente al terreno. La función del arco junto con los tirantes es ayudar a las vigas longitudinales a resistir estos esfuerzos.

Definimos en el modelo de Midas Civil [12], estas condiciones de contorno, las cuales corresponden a restringir los desplazamientos y el giro de torsión en los extremos de la estructura. En la siguiente figura se muestra donde hemos aplicado esas condiciones de contorno.

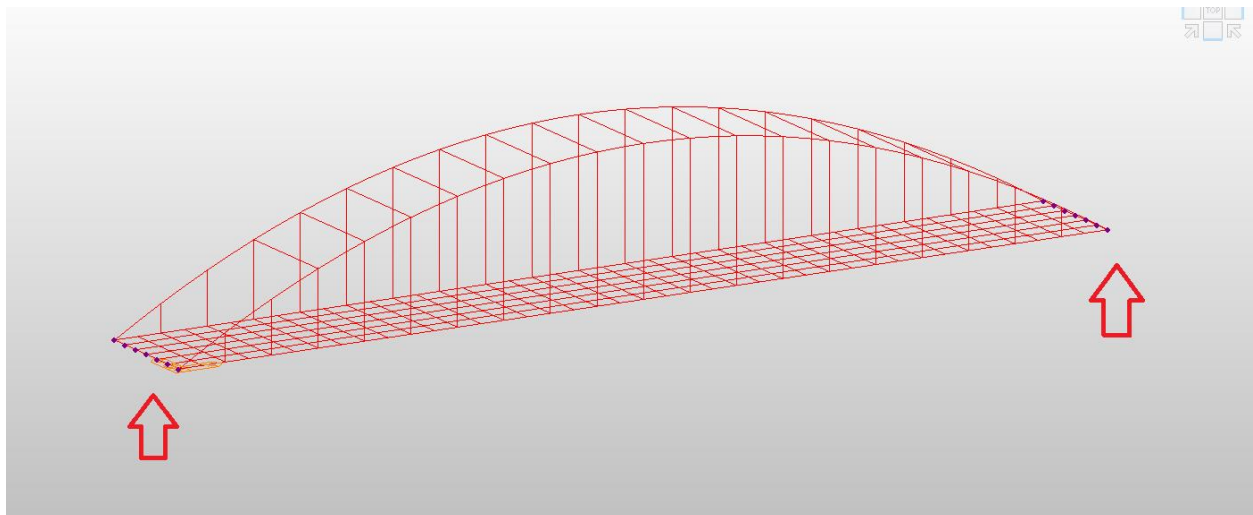


Figura 42. Condiciones de contorno

### 3.3.6 Cargas

Vamos a diferenciar dos tipos de cargas a introducir, por un lado, cargas que consideraríamos de tipo estático como pueden ser el peso propio de la estructura y las cargas muertas asociadas a los diferentes elementos que componen una sección tipo ferroviaria. Por otro lado, tenemos las cargas que consideraríamos de carácter dinámico, asociadas al paso del tren modelo por la vía.

El peso propio es algo intrínseco a la estructura, en concreto a cada elemento que la conforma. Muy sencilla de calcular y de introducir en el programa de Midas Civil [12].

En segundo lugar, tenemos la carga muerta que se encuentra sobre el tablero de hormigón. Considerando los siguientes datos:

- Balasto 18 kN/m<sup>3</sup>
- Traviesas 325 kg

- Carriles 60.340 kg/m
- Muretes guardabarros 25 kN/m<sup>3</sup>
- Canaletas 3.78 kN/m
- Impostas 9.59 kN/m
- Barandilla 1.02 kN/m

Algunos de estos datos los hemos obtenido de la instrucción para puentes ferroviarios del ministerio, en el correspondiente apéndice D de la IAPF [13]

Para introducirlas en el modelo, hemos calculado el ancho tributario a cada viga transversal y la hemos introducido como una carga lineal o puntual a lo largo de la misma según corresponda. La siguiente tabla muestra a modo de resumen los valores introducidos, donde diferenciamos vigas de borde que corresponden a los apoyos, cuyo ancho efectivo es de 2.5 metros, y las vigas de vano cuyo ancho efectivo es de 5 metros.

Carga repartida balasto				
x1	2.950	p1	45.606	22.803
x2	13.050	p2	45.606	22.803
Carga repartida traviesa				
x1	4.125	p1	10.219	5.109
x2	7.071	p2	10.219	5.109
x3	8.929	p3	10.219	5.109
x4	11.875	p4	10.219	5.109
Cargas puntual barandilla, canaletas e impostas				
x1	1	p1	35.975	17.988
x2	15	p2	35.975	17.988
Cargas puntual muro				
x1	2.85	p1	12.500	6.250
x2	13.15	p2	12.500	6.250
Cargas puntual carril				
x1	4.904	p1	2.960	1.480
x2	6.407	p2	2.960	1.480
x3	9.593	p3	2.960	1.480
x4	11.096	p4	2.960	1.480

Tabla 3. Cargas para introducir en el modelo

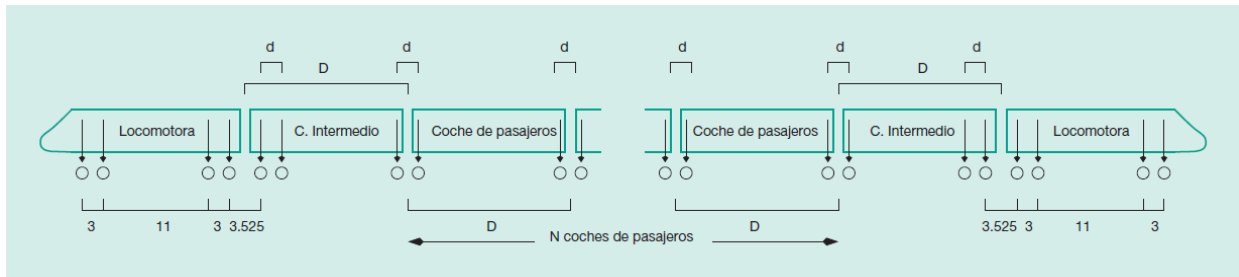
La tabla anterior refleja dichos valores, donde “x” representa el valor de la coordenada a lo largo de la viga transversal, es decir, el ancho del puente, por lo que su valor va desde los 0 a los 16 metros, concretamente de 1 a 15 metros que comprende los 14 metros del tablero.

Las unidades para las cargas repartidas son de kN/m y para las cargas puntuales de kN.

Por último, vamos a ver los valores correspondientes a la carga dinámica que genera el tren modelo de HSLM (High Speed Load Model). El uso de este tren modelo de carga, que viene recogido tanto en la norma UNE-EN 1991-2 [4], como en la IAPF [13], se debe que garantiza la posibilidad de obtener la envolvente de todos los trenes posibles de alta velocidad, para todas sus velocidades de circulación, de acuerdo con los requisitos de la especificación técnica europea de interoperabilidad.

En concreto usamos el Tren Dinámico Universal-A, para tableros continuos, que queda definido por la acción conjunta de una familia de 10 trenes articulados, donde cada tren esta formado por dos locomotoras y un cierto número de coches de pasajeros, con cargas iguales en todos los ejes. Los 10 trenes diferentes se obtienen variando el número de coches, la distancia entre ejes y las cargas por eje.

De la IAPF rescataamos las siguientes figuras, que definen de forma bastante concisa esto que acabamos de explicar.

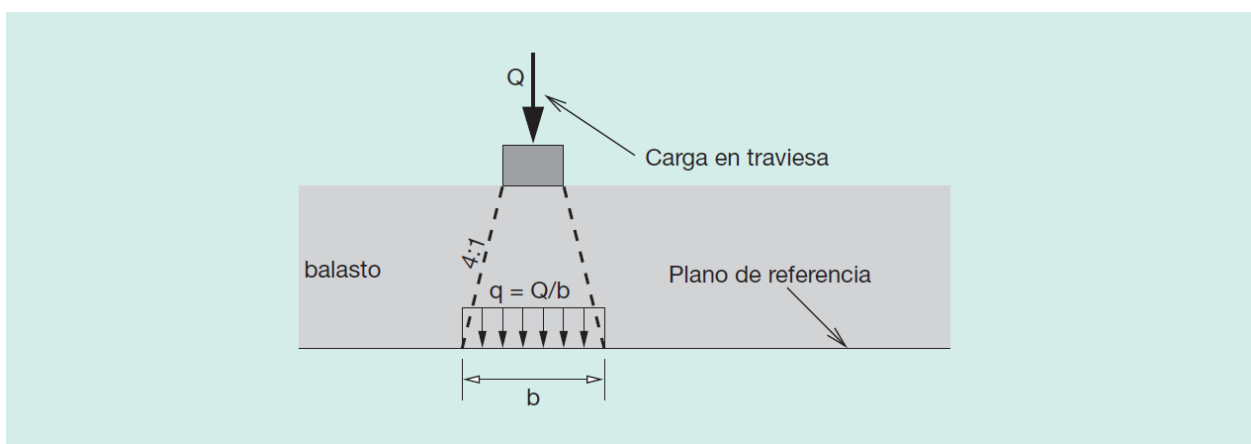


Tren	Número de coches de pasajeros N	Longitud del coche D (m)	Distancia entre ejes de un bogie d (m)	Carga nominal por eje P (kN)
A1	18	18	2.0	170
A2	17	19	3.5	200
A3	16	20	2.0	180
A4	15	21	3.0	190
A5	14	22	2.0	170
A6	13	23	2.0	180
A7	13	24	2.0	190
A8	12	25	2.5	190
A9	11	26	2.0	210
A10	11	27	2.0	210

Para aplicar las cargas que genera el paso de este tren modelo por la vía, las situamos en los nudos debajo de la vía teniendo en cuenta que la traviesa reparte la carga que recibe del eje de forma uniforme al balasto y en el balasto se produce una cierta distorsión de forma que sobre los nudos aplicamos una carga proporcional, es decir, que no se aplica directamente bajo la vía, sino que se reparte entre los nudos mas cercanos a la misma compendidos dentro de un ancho efectivo.

Esto viene recogido en a la IAPF [13], en el apartado “2.3.1.4.2. Reparto local de las cargas.”, para vías de balasto, la carga sobre cada traviesa se distribuye con una pendiente 4 (vertical): 1 (horizontal) a través de su espesor.

Se aprecia perfectamente en la siguiente figura de la IAPF:



Para la consideración de estas cargas de forma dinámica en el modelo, se introducen de forma que consideren todas las posibles combinaciones de velocidad de paso y espaciamiento de los trenes modelo de HSLM, que puedan provocar fenómenos de resonancia para una estructura con unas frecuencias naturales conocidas. De forma que en Midas, mediante las conocidas “Time History Functions”, introducimos 410 situaciones de carga distintas para cada uno de los veinte modelos diferentes, 41 velocidades de paso diferentes para cada uno de los 10 trenes de carga que considera el modelo HSLM.

Entonces tenemos que la sollicitación de un vehículo ferroviario la definimos como cargas puntuales aplicadas de forma periodica en los mismos puntos a lo largo de la zona de actuación para cada una de estas cargas, cada cierto intervalo de tiempo que depende de la velocidad de paso. Para modelar esta sollicitación se realiza mediante la definición de nodos equiespaciados que representan el eje del carril cargado, debido a que no coincide el eje con un nodo, asignamos unos porcentajes de reparto de carga sobre cada nodo. Tomamos como distancia total de un extremo a otro del vano del puente, y asignamos a dichos nodos una sollicitación en función del tiempo que varía linealmente de forma alterna, de modo que si en un nodo tenemos un pico, en el anterior y el posterior tendremos valor nulo.

Se ha hecho uso de una hoja de cálculo para la definición de estas cargas, donde introducimos la designación de los nodos de aplicación de la sollicitación ferroviaria utilizada en el modelo, así como datos referidos al amortiguamiento y el número de modos a estudiar para la obtención de la respuesta dinámica. También consideramos el reparto de carga sobre cada nodo de la sección transversal, debido a que no coincide el eje cargado con un nodo en concreto. Se establece una relación de duración/transito igual a 1.2, de forma que el tiempo de estudio es superior al transito del tren, con lo que consideramos las situaciones en que únicamente algunos de los ejes se encuentran sobre el puente e incluso situaciones de vibración libre.

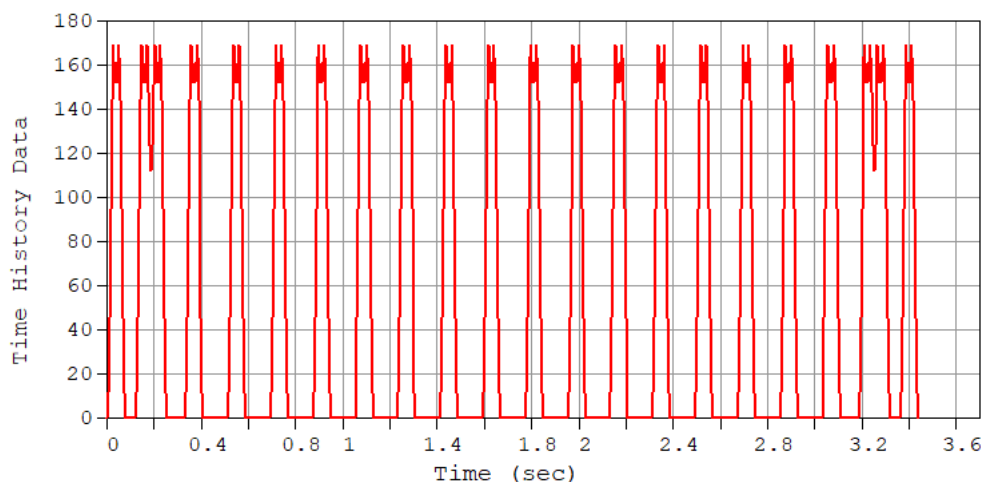


Figura 43. “Time history function” para el modelo de tren A4 a 420 km/h

# 4 RESULTADOS

---

*Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión.*

*“Razón y Ser de los Tipos Estructurales (1957)”*

Eduardo Torroja Miret

**E**n este capítulo vamos a incluir algunos resultados significativos como pueden ser aquellos modos de vibración que varían de forma significativa para una disposición u otra de tirantes así como sus frecuencias naturales y valores de desplazamientos y aceleraciones verticales provocados por el paso de cada uno de los modelos de tren HSLM.

Dado la gran cantidad de datos que tenemos que manejar, se mostraran gráficas de cada uno de los 20 modelos, que recojan los resultados para los desplazamientos y aceleraciones debidos al paso de los 10 tipos de trenes con su respectivo abanico de velocidades.

Junto con cada gráfica analizaremos y comentaremos los resultados obtenidos de modo que quede de forma bastante clara y concisa, y ayude a una mejor comprensión sobre qué representa cada una de ellas.

Después de estas comparativas acerca de los diferentes modelos vamos a incluir también resultados relacionados con el coeficiente de impacto de cada modelo para ver como varía para las diferentes disposiciones tanto de los arcos como de los tirantes.

Por ello iremos recorriendo de forma ordenada los diferentes modelos y comentando aquellos resultados más significativos con el objetivo de mostrar de forma concisa y analizar los resultados más influyentes, más que una volcada masiva de datos.

Para empezar, vamos a reflejar mediante una tabla los valores de masa y primeras 3 frecuencias naturales, para tener una idea somera acerca de como de semejantes son cada uno de los modelos. Dentro de cada apartado analizaremos de manera pormenorizada cada modelo con sus respectivas variaciones de las disposiciones de tirantes.

Posteriormente haremos un análisis donde compararemos para una misma disposición de tirantes los diferentes modelos, es decir, la variación de la tipología de arcos, con ello conseguiremos una visión y comprensión de los diferentes modelos de manera global conociendo que patrones son comunes, en que aspectos coinciden unos con otros y en cuales se diferencian.



## 4.1. RESULTADOS: MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES

### 4.1.1 Modelo 1a: Dos arcos paralelos y tirantes verticales

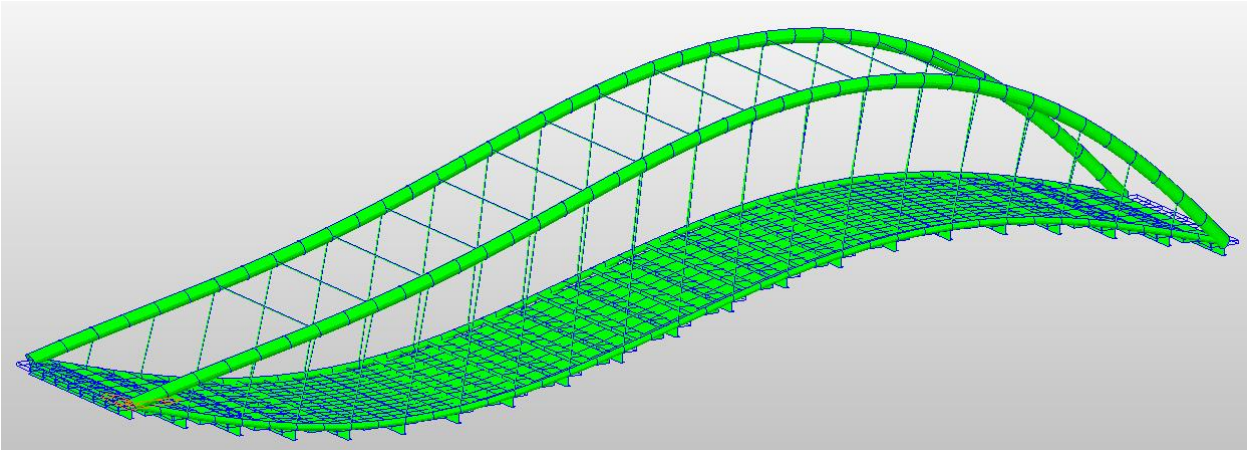


Figura 44. Dos arcos paralelos y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY

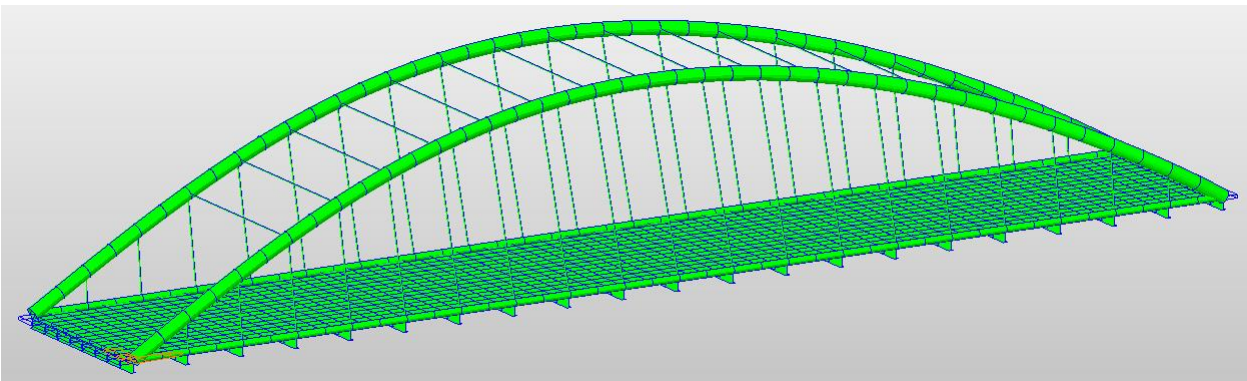


Figura 45. Dos arcos paralelos y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX

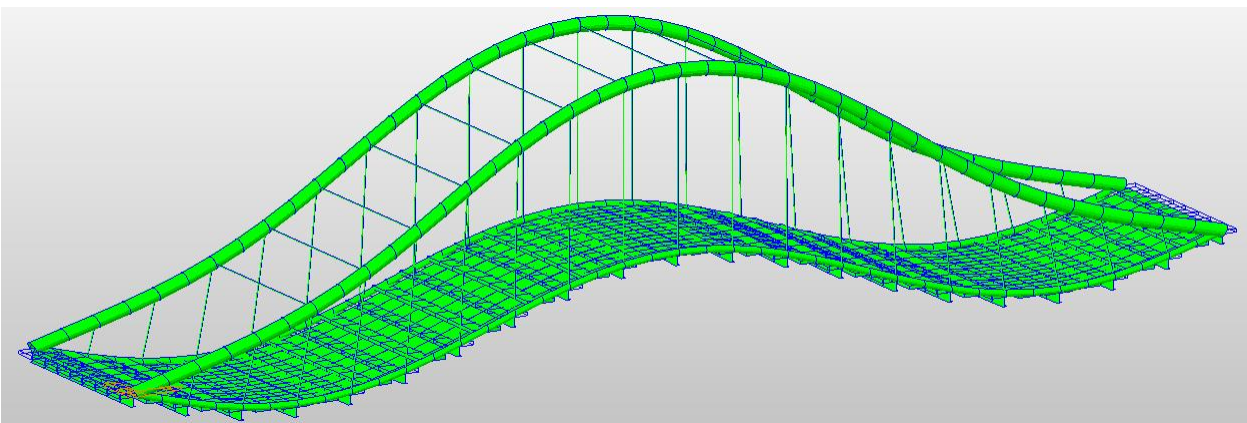


Figura 46. Dos arcos paralelos y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ

Se observa como el primer y tercer modo, que provocan el desplazamiento vertical del tablero, corresponden al segundo y tercer modo de excitación para esa dirección ya que el primero tiene un nodo y el tercero dos. En el segundo modo de vibración observamos que no viene excitado por el tren ya que en el tablero no se produce ningún desplazamiento, lo poco que se mueve corresponde a los arcos.



#### 4.1.2 Modelo 1b: Dos arcos paralelos y tirantes en abanico

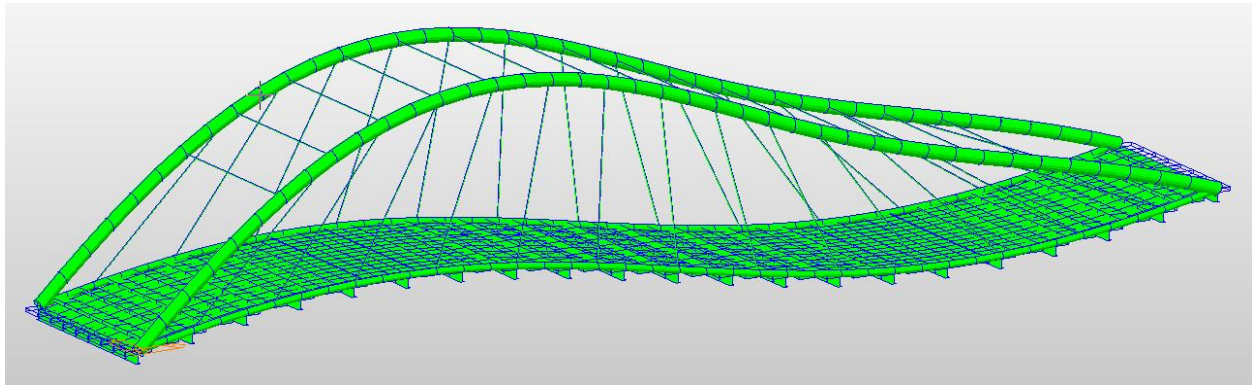


Figura 47. Dos arcos paralelos y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY

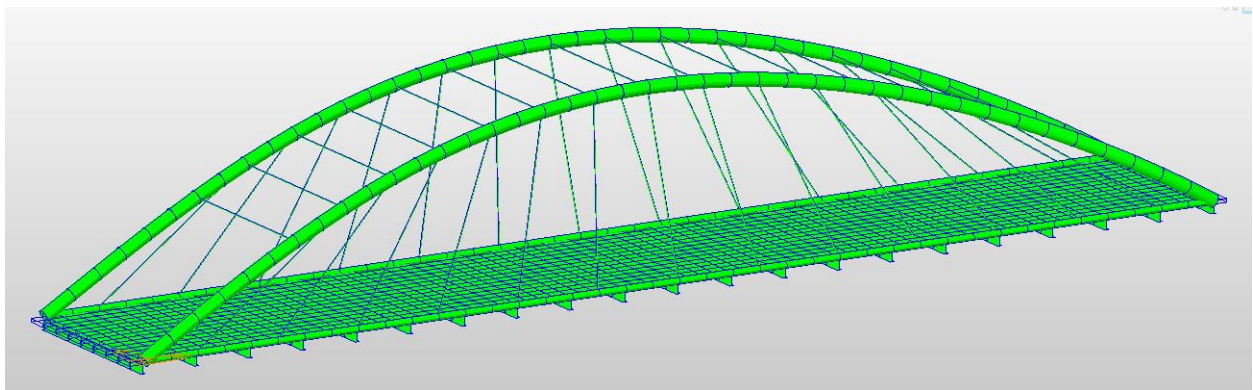


Figura 48. Dos arcos paralelos y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en RX

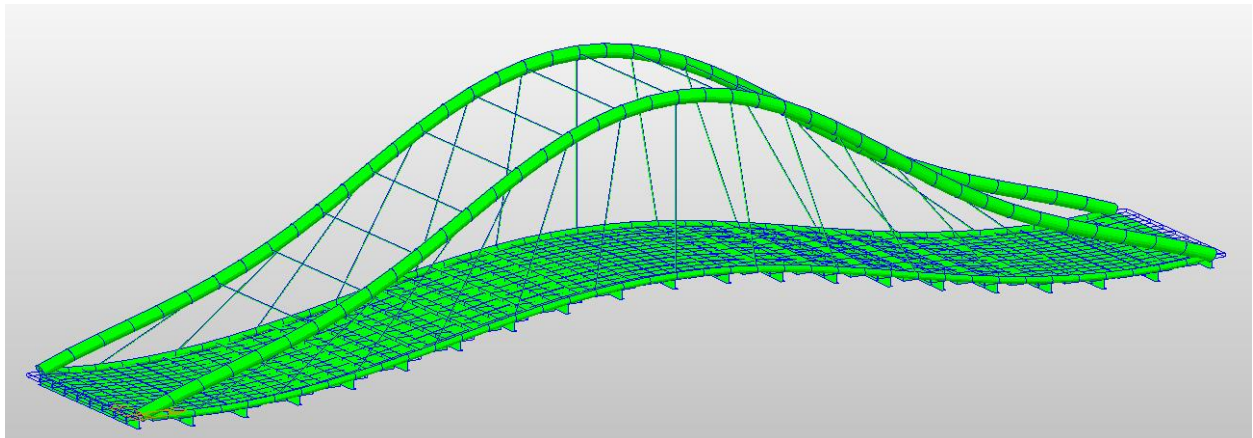


Figura 49. Dos arcos paralelos y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en DZ

Se observa como el primer y tercer modo, que provocan el desplazamiento vertical del tablero, corresponden al segundo y tercer modo de excitación para esa dirección ya que el primero corresponde a medio vano del tercero. En el segundo modo de vibración observamos que no viene excitado por el tren ya que en el tablero no se produce ningún desplazamiento, lo poco que se mueve corresponde a los arcos.

### 4.1.3 Modelo 1c: Dos arcos paralelos y tirantes en celosía

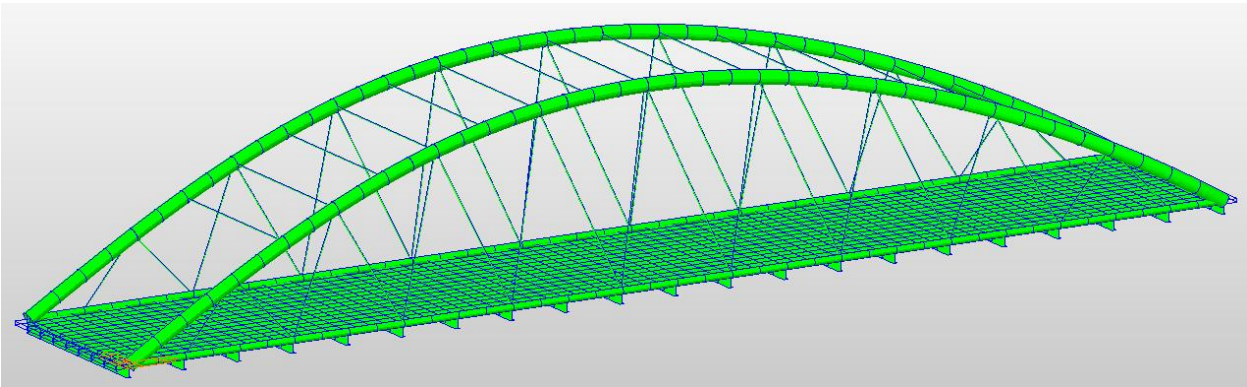


Figura 50. Dos arcos paralelos y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX

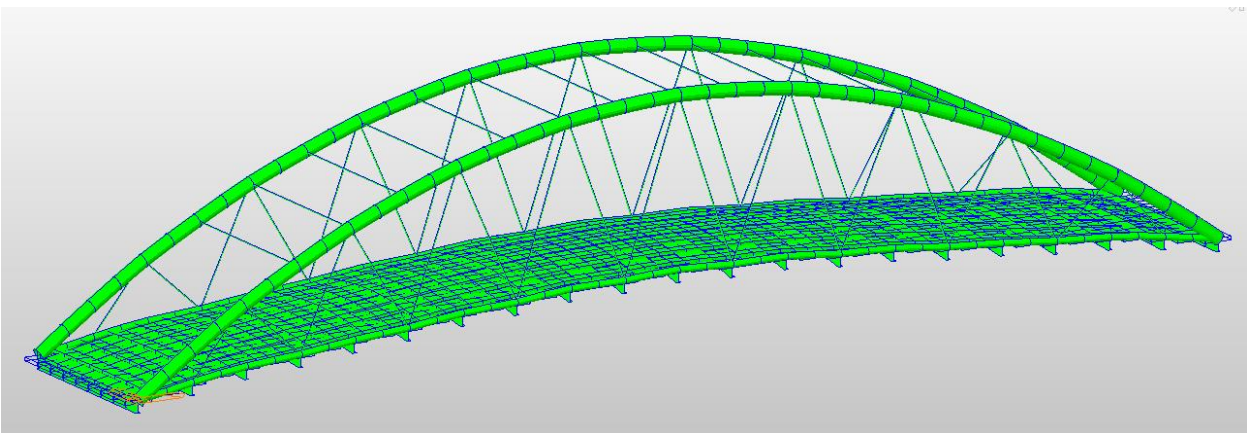


Figura 51. Dos arcos paralelos y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ

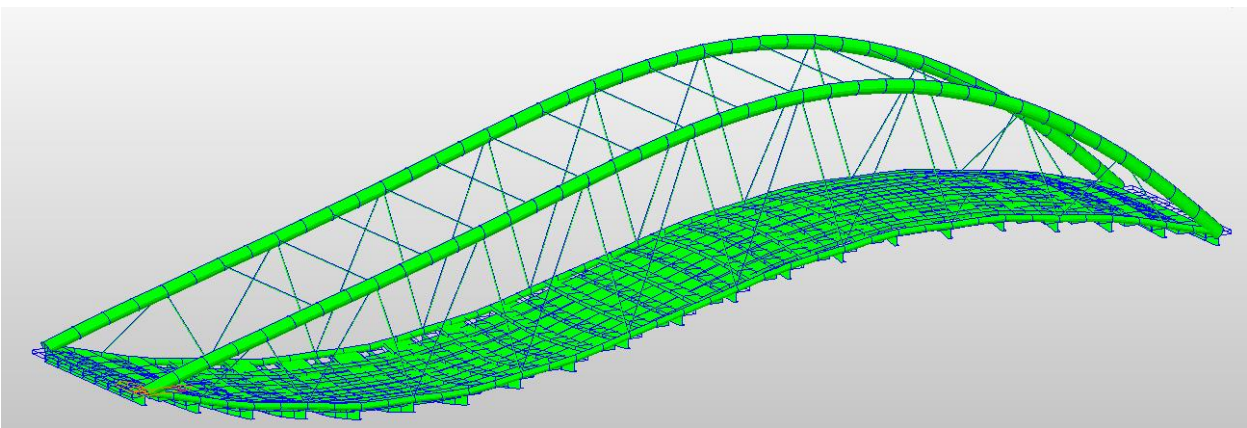


Figura 52. Dos arcos paralelos y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY

Para este modelo observamos como el primer modo no es solicitado por el paso del tren, ya que no se produce ningún desplazamiento del tablero. En el segundo y tercer modo de vibración sí que tenemos una relación en cuanto al desplazamiento vertical, ya que uno es la continuación del otro, observamos que en el segundo modo de vibración no tenemos ningún nodo y en el tercero tenemos uno en el centro.



#### 4.1.4 Modelo 1d: Dos arcos paralelos y tirantes cruzados

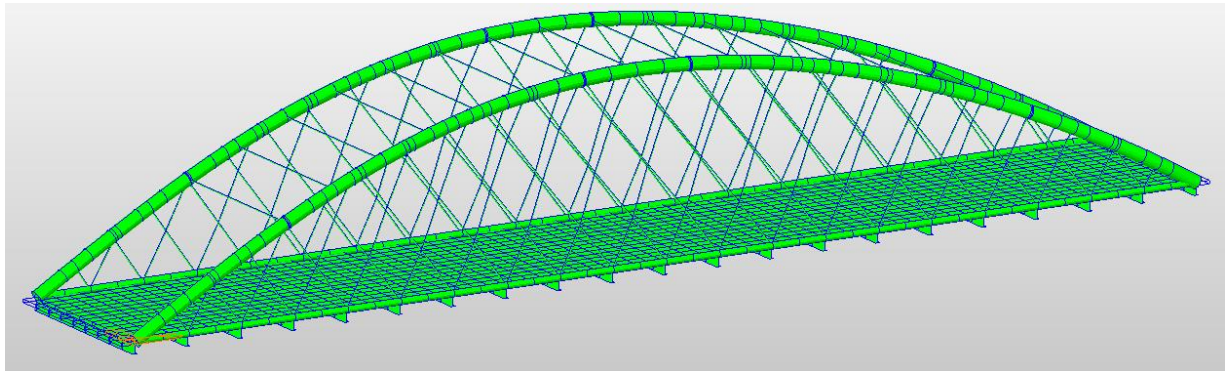


Figura 53. Dos arcos paralelos y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX

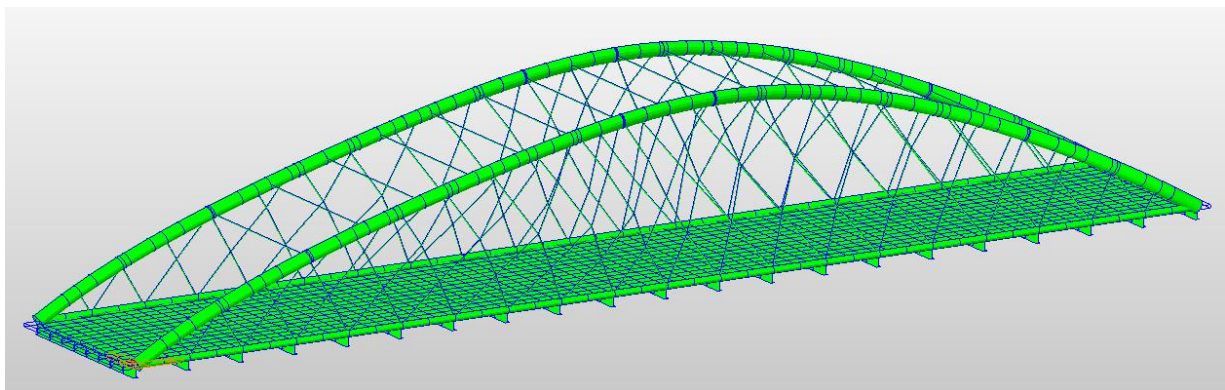


Figura 54. Dos arcos paralelos y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en RZ

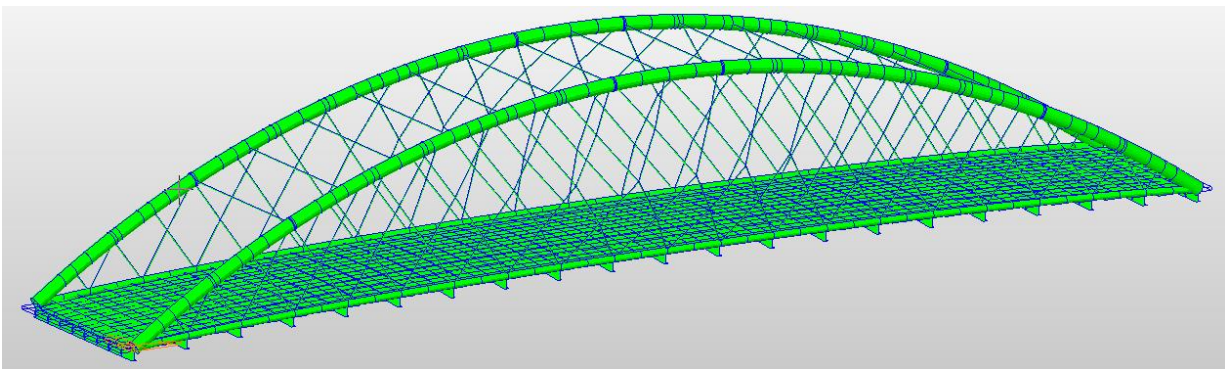


Figura 55. Dos arcos paralelos y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en DZ

En este caso tenemos que los dos primeros modos de vibración no vienen excitados por el paso del tren ya que no se produce ningún desplazamiento en el tablero. Sin embargo, para el tercer modo de vibración si se aprecia un desplazamiento vertical de la estructura.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 1a: Tirantes verticales	Modelo 1b: Tirantes en abanico	Modelo 1c: Tirantes en celosía	Modelo 1d: Tiranetes cruzados
Peso (kN)	2.89683e4	2.29799e4	2.29936e4	2.33074e4
1era frec. Natural	3.04 s	2.06	1.68	1.69
2nda frec. Natural	1.67 s	1.70	0.63	0.63
3era frec. natural	1.46 s	1.52	0.60	0.61

Tabla 4. Frecuencias naturales modelos de dos arcos paralelos

Una vez mostramos los diferentes modos de vibración y las diferentes frecuencias naturales que excitan cada uno de esos modos podemos sacar las siguientes conclusiones.

En primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 1a (tirantes verticales) y 1b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares, el primero y el tercero provocan desplazamiento vertical del tablero y el segundo no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero. También tal y como se observa en la tabla se dan para valores de periodo parecidos. Para los modelos 1c (tirantes en celosía) y 1d (tirantes cruzados) también se observa un comportamiento similar, ya que tenemos un primer modo que no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero, pero si que coinciden los modos 2 y 3 del modelo 1c y 1d respectivamente. A parte de los valores del periodo de las frecuencias naturales que son casi iguales.

#### 4.1.5 Modelos 2a: Dos arcos cerrados y tirantes verticales

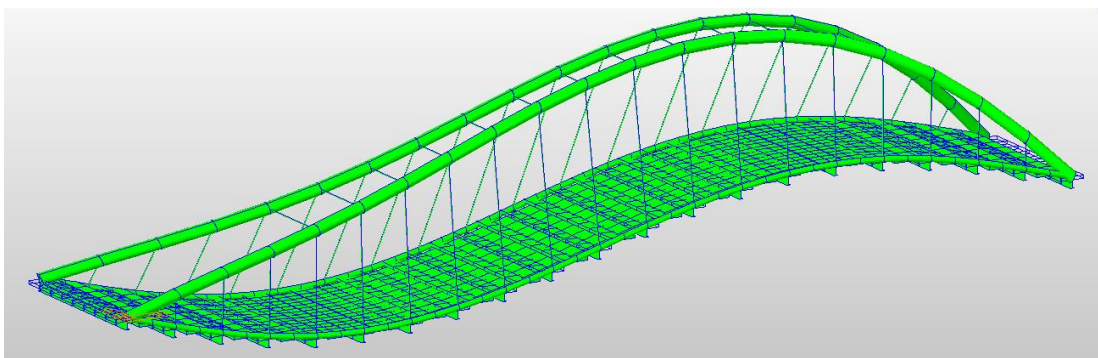


Figura 56. Dos arcos cerrados y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY

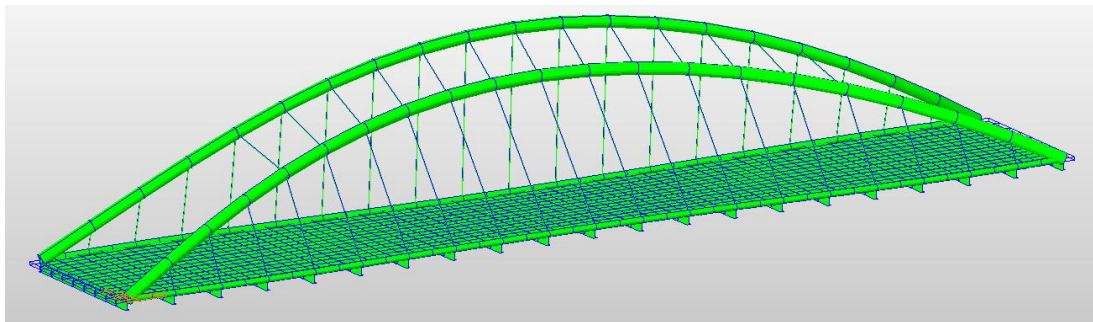


Figura 57. Dos arcos cerrados y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX

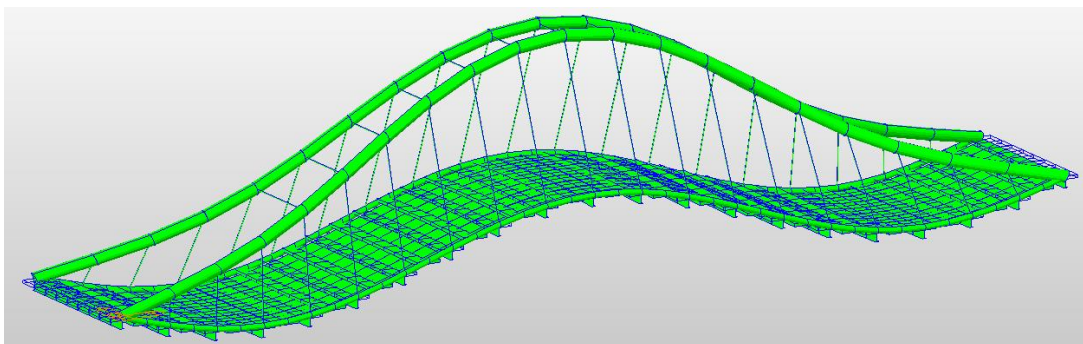


Figura 58. Dos arcos cerrados y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ

Se observa como el primer y tercer modo, que provocan el desplazamiento vertical del tablero, corresponden al segundo y tercer modo de excitación para esa dirección ya que el primero corresponde a medio vano del tercero.



En el segundo modo de vibración observamos que no viene excitado por el tren ya que en el tablero no se produce ningún desplazamiento, lo poco que se mueve corresponde a los arcos.

#### 4.1.6 Modelo 2b: Dos arcos cerrados y tirantes en abanico

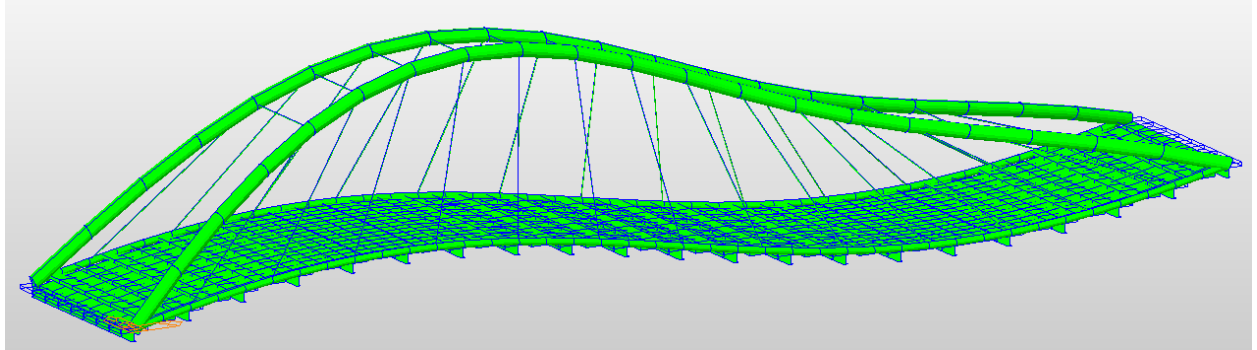


Figura 59. Dos arcos cerrados y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY

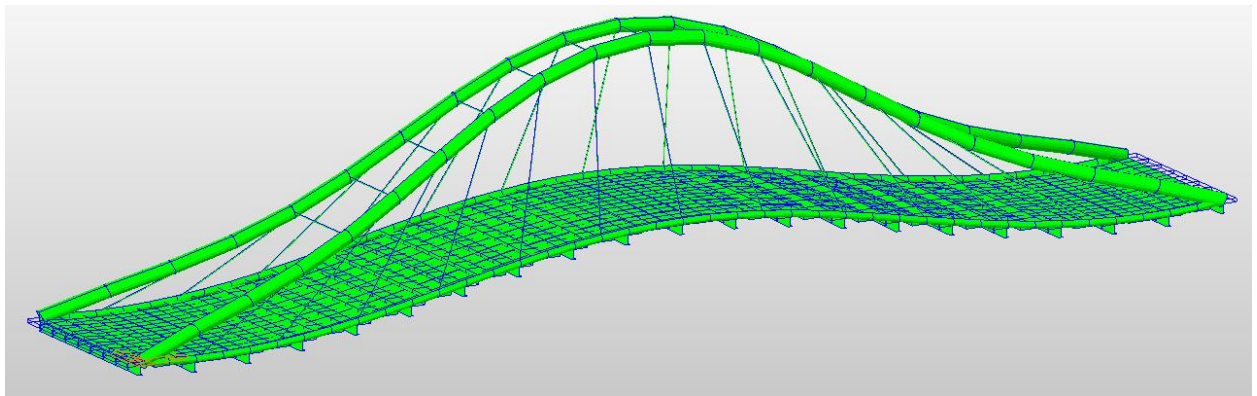


Figura 60. Dos arcos cerrados y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en DZ

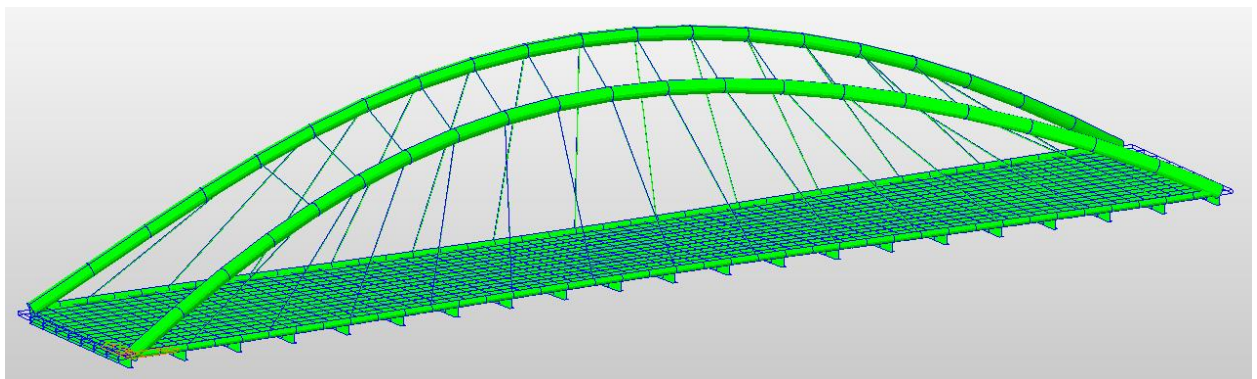


Figura 61. Dos arcos cerrados y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en RX

En este caso tenemos que los dos primeros modos de vibración vienen excitados por el paso del tren ya que producen desplazamiento en el tablero. Sin embargo, para el tercer modo de vibración no se aprecia un desplazamiento exclusivo de los arcos, por lo que no viene excitado por el paso del tren.

#### 4.1.7 Modelo 2c: Dos arcos cerrados y tirantes en celosía

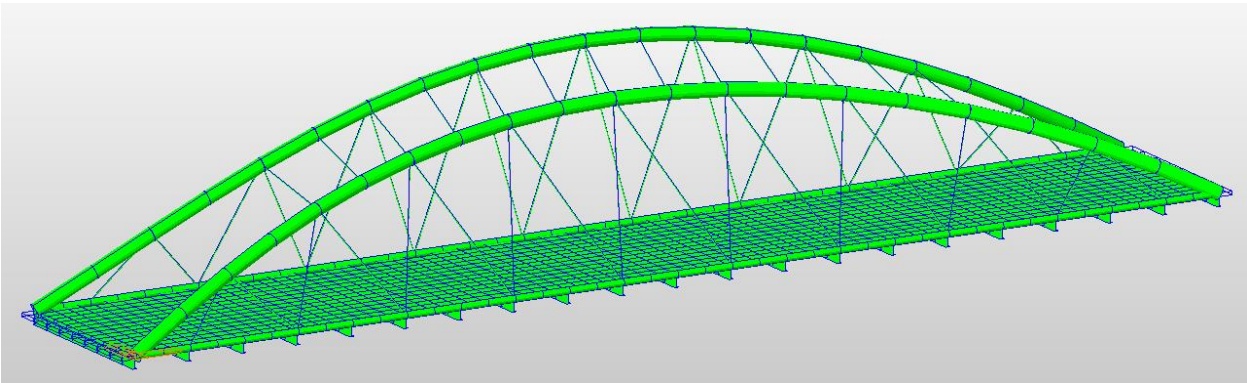


Figura 62. Dos arcos cerrados y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX

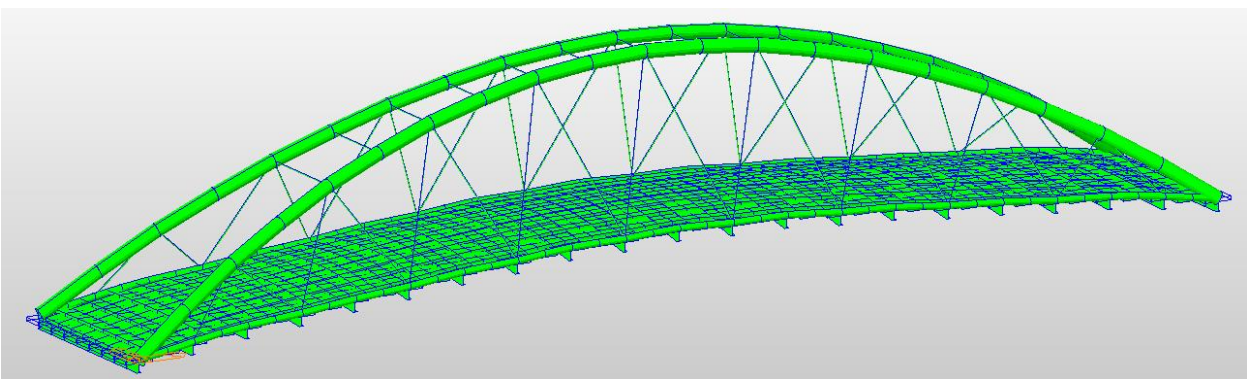


Figura 63. Dos arcos cerrados y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ

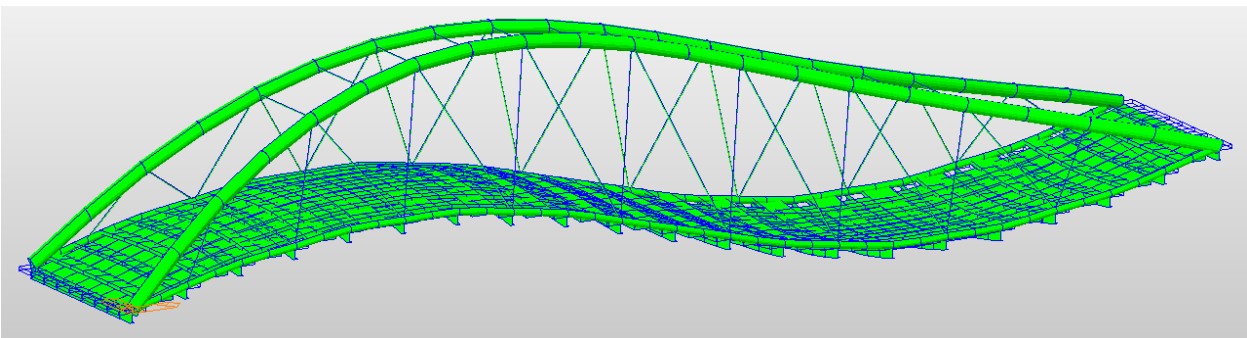


Figura 64. Dos arcos cerrados y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY

Para este modelo observamos como el primer modo no es solicitado por el paso del tren, ya que no se produce ningún desplazamiento del tablero. En el segundo y tercer modo de vibración sí que tenemos una relación en cuanto al desplazamiento vertical, ya que uno es la continuación del otro, observamos que en el segundo modo de vibración no tenemos ningún nodo y en el tercero tenemos uno en el centro.



#### 4.1.8 Modelo 2d: Dos arcos cerrados y tirantes cruzados

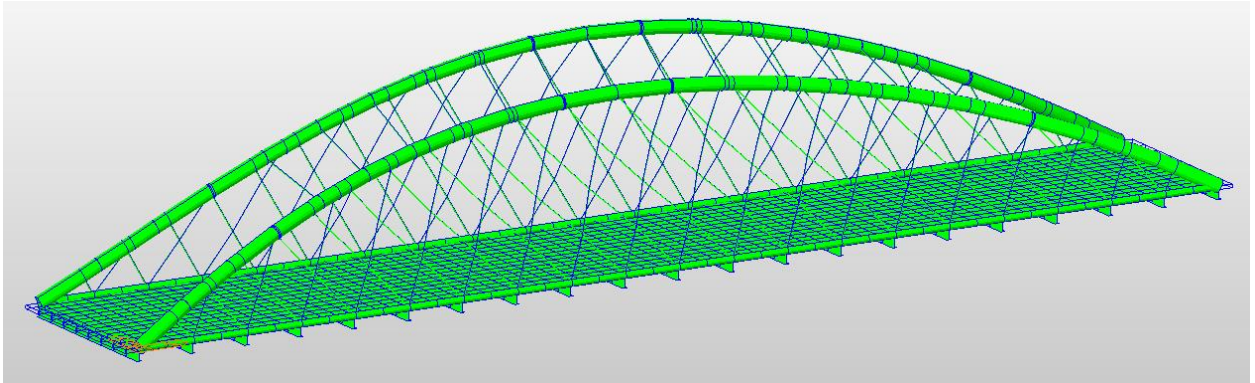


Figura 65. Dos arcos cerrados y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX

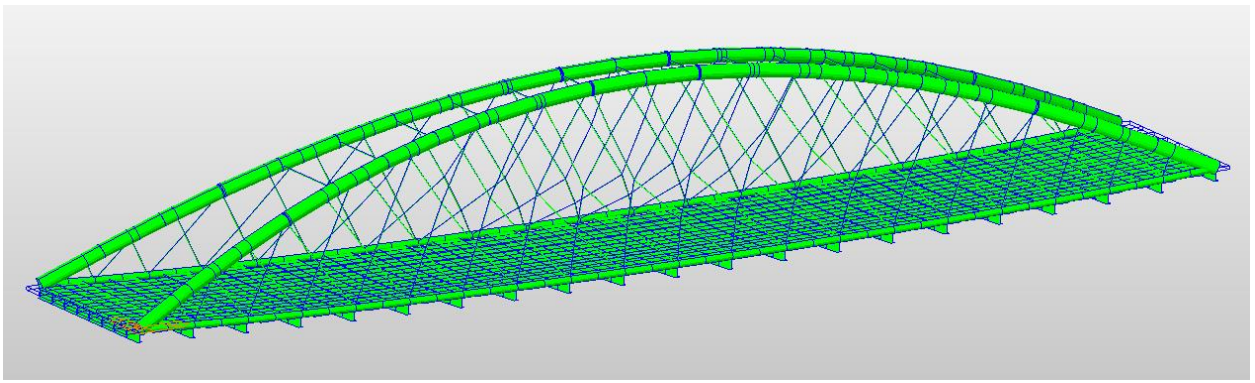


Figura 66. Dos arcos cerrados y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ

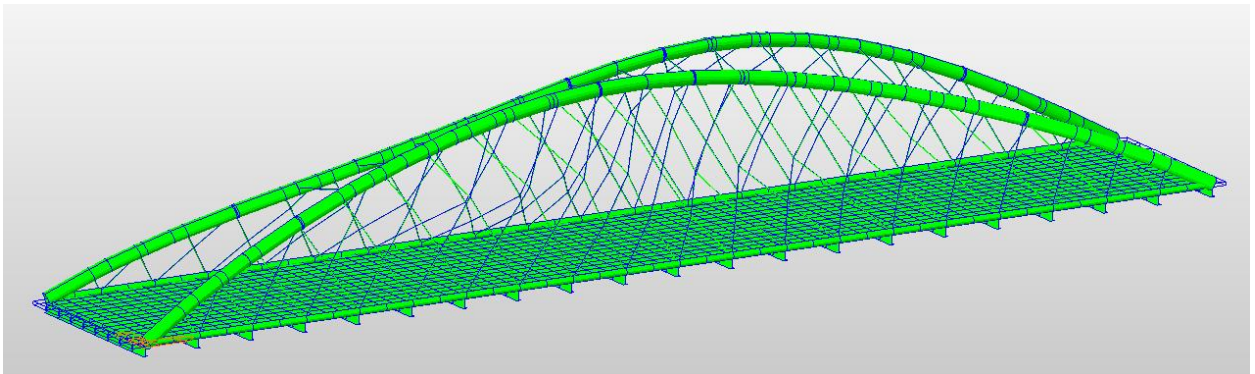


Figura 67. Dos arcos cerrados y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RZ

En este caso tenemos que el primer y tercer modo de vibración no vienen excitados por el paso del tren ya que no se produce ningún desplazamiento en el tablero. Sin embargo, para el segundo modo de vibración si se aprecia un desplazamiento vertical de la estructura.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 2a: Tirantes verticales	Modelo 2b: Tirantes en abanico	Modelo 2c: Tirantes en celosía	Modelo 2d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.28746e4	2.28851e4	2.28988e4	2.32117e4
1era frec. Natural	2.82 s	2.06 s	1.41 s	1.43 s
2nda frec. Natural	1.42 s	1.54 s	0.67 s	0.66 s
3era frec. natural	1.36 s	1.45 s	0.64 s	0.61 s

Tabla 5. Frecuencias naturales modelos de arcos cerrados

A modo de resumen, tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 2a (tirantes verticales) y 2b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares aunque con un orden distinto, tenemos dos modos que provocan desplazamiento vertical del tablero y uno es la continuación del otro y otro modo de vibración no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero. También tal y como se observa en la tabla se dan para valores de periodo parecidos. Para los modelos 2c (tirantes en celosía) y 2d (tirantes cruzados) también se observa un comportamiento similar, ya que tenemos un primer modo que no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero, un segundo modo similar que provoca el desplazamiento vertical del tablero, y un tercer modo diferente aunque si ampliasemos el rango de estudio, podemos comprobar que el siguiente modo de vibración que excita el paso del tren sobre la estructura coincide en ambos modelos con el mostrado para el modo 3 del modelo 2c.

#### 4.1.9 Modelo 3a: Dos arcos abiertos y tirantes verticales

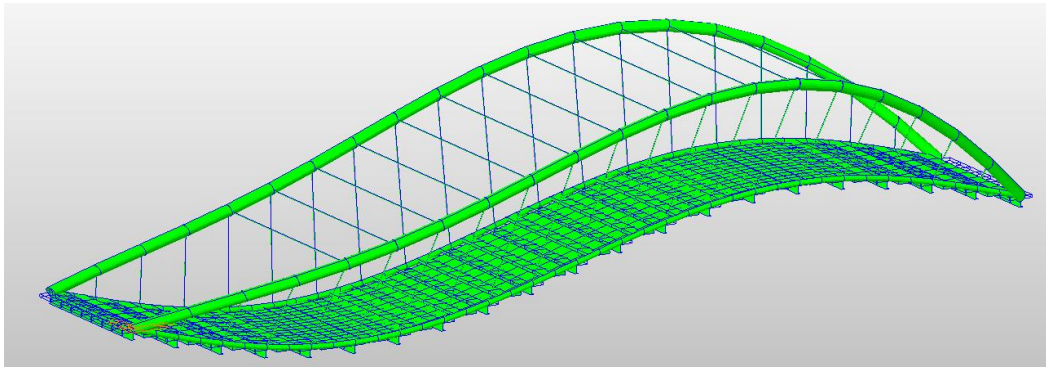


Figura 68. Dos arcos abiertos y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY

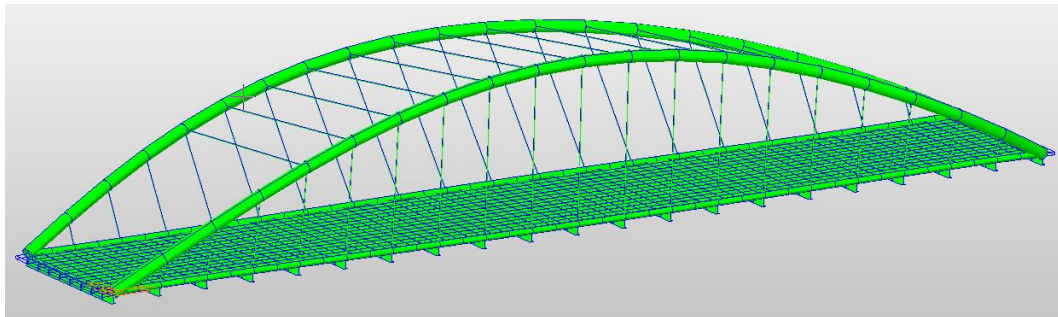


Figura 69. Dos arcos abiertos y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX

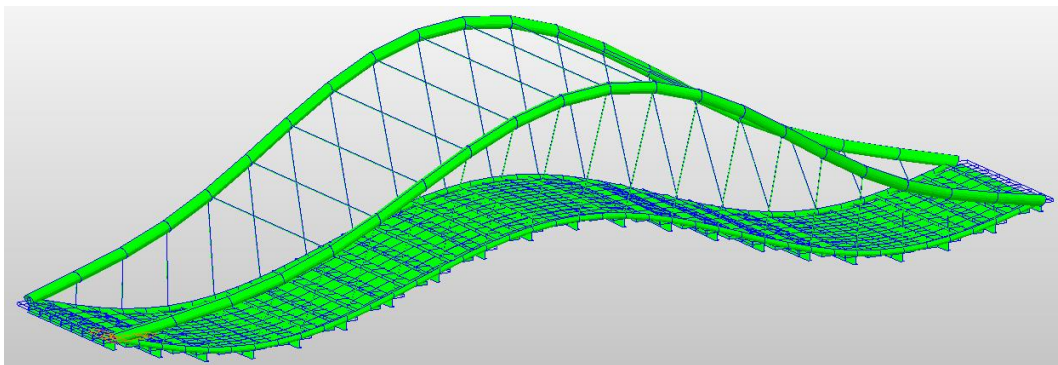


Figura 70. Dos arcos abiertos y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ

Se observa como el primer y tercer modo, que provocan el desplazamiento vertical del tablero, corresponden al segundo y tercer modo de excitación para esa dirección ya que el primero corresponde a medio vano del tercero.



En el segundo modo de vibración observamos que no viene excitado por el tren ya que en el tablero no se produce ningún desplazamiento, lo poco que se mueve corresponde a los arcos.

#### 4.1.10 Modelo 3b: Dos arcos abiertos y tirantes en abanico

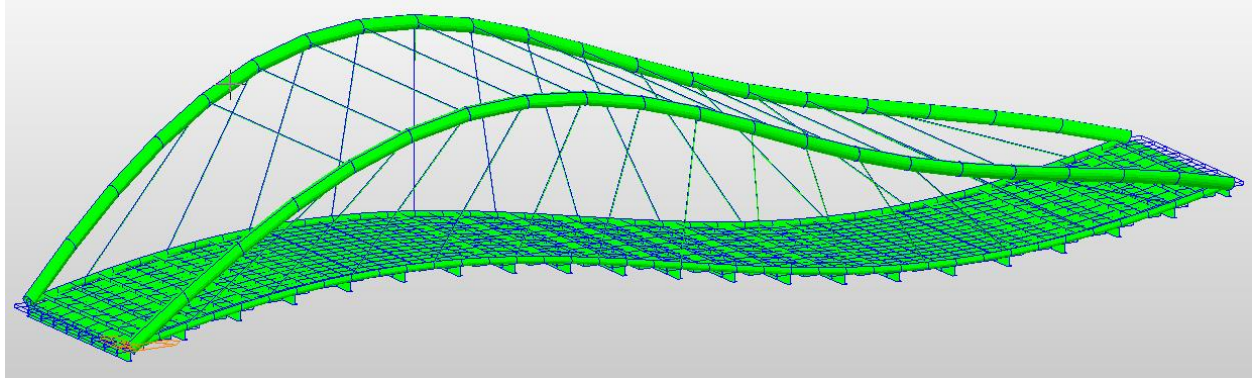


Figura 71. Dos arcos abiertos y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY

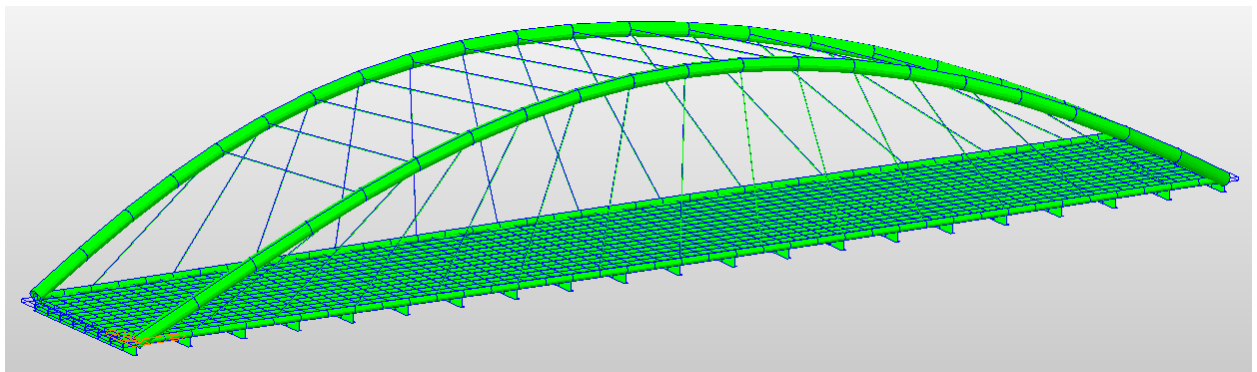


Figura 72. Dos arcos abiertos y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en RX

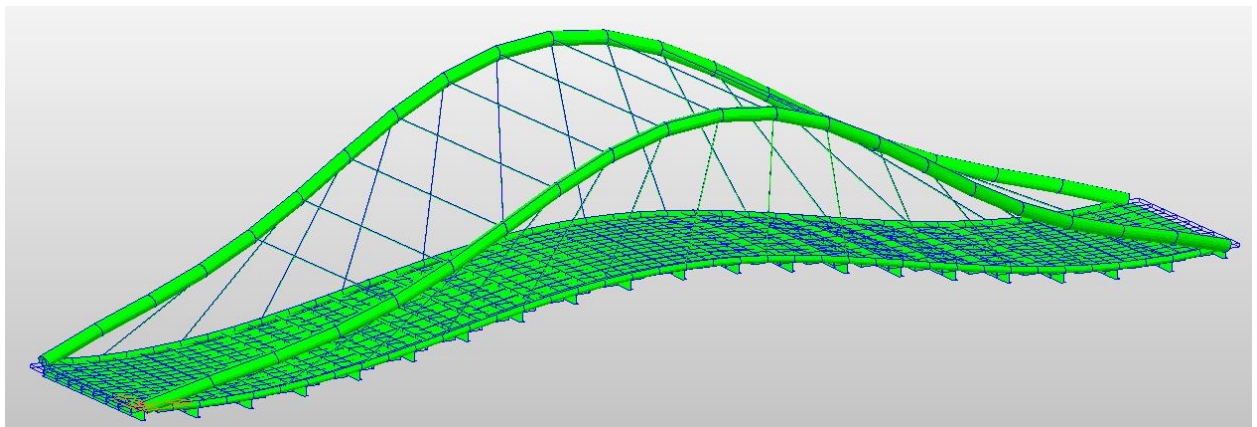


Figura 73. Dos arcos abiertos y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en DZ

Se observa como el primer y tercer modo, que provocan el desplazamiento vertical del tablero, corresponden al segundo y tercer modo de excitación para esa dirección ya que el primero corresponde a medio vano del tercero. En el segundo modo de vibración observamos que no viene excitado por el tren ya que en el tablero no se produce ningún desplazamiento, lo poco que se mueve corresponde a los arcos.

#### 4.1.11 Modelo 3c: Dos arcos abiertos y tirantes en celosía

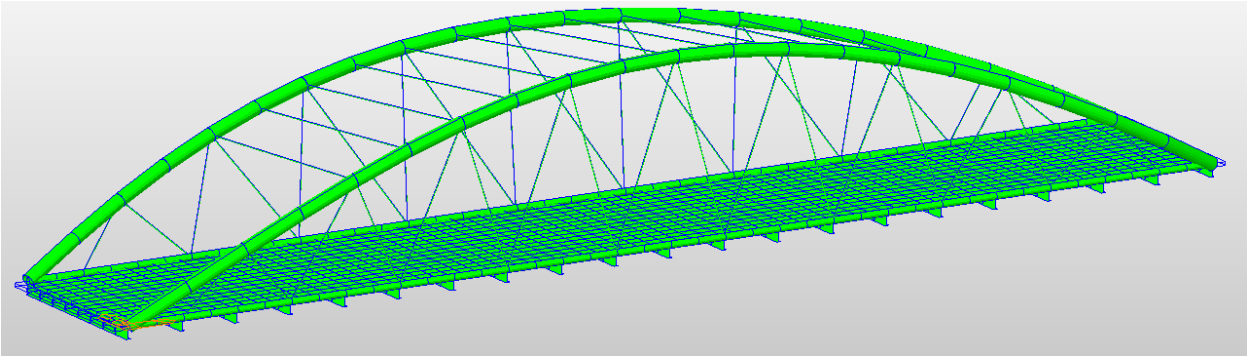


Figura 74. Dos arcos abiertos y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX

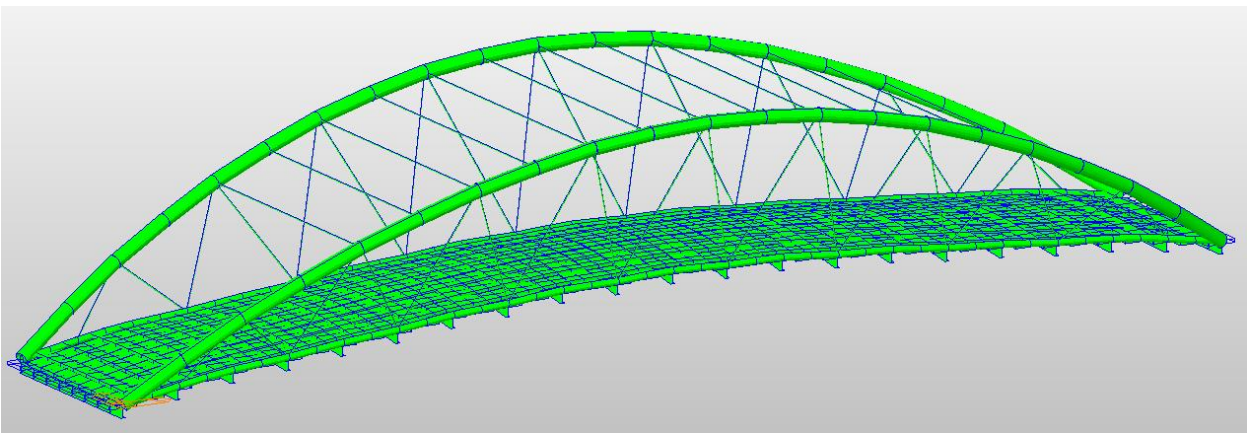


Figura 75. Dos arcos abiertos y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ

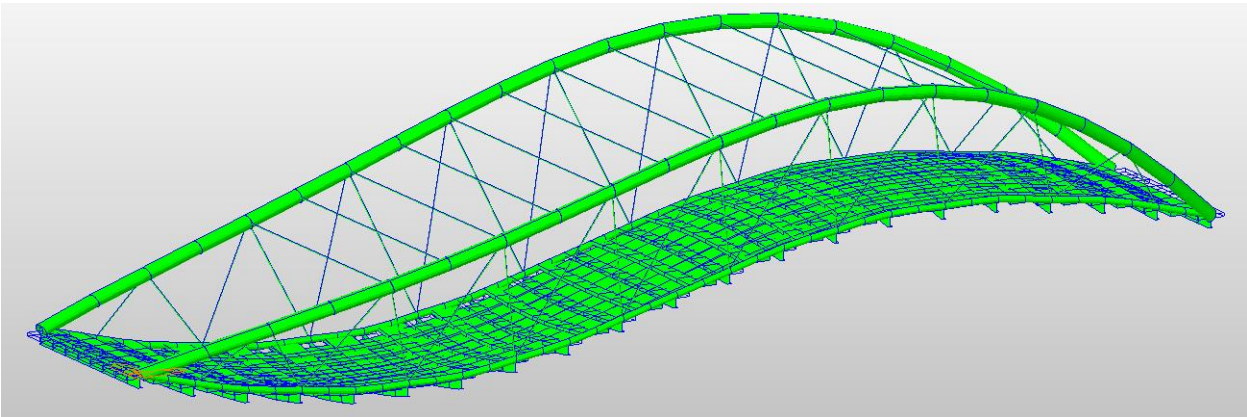


Figura 76. Dos arcos abiertos y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY

Para este modelo observamos como el primer modo no es solicitado por el paso del tren, ya que no se produce ningún desplazamiento del tablero. En el segundo y tercer modo de vibración sí que tenemos una relación en cuanto al desplazamiento vertical, ya que uno es la continuación del otro, observamos que en el segundo modo de vibración no tenemos ningún nodo y en el tercero tenemos uno en el centro.

#### 4.1.12 Modelo 3d: Dos arcos abiertos y tirantes cruzados

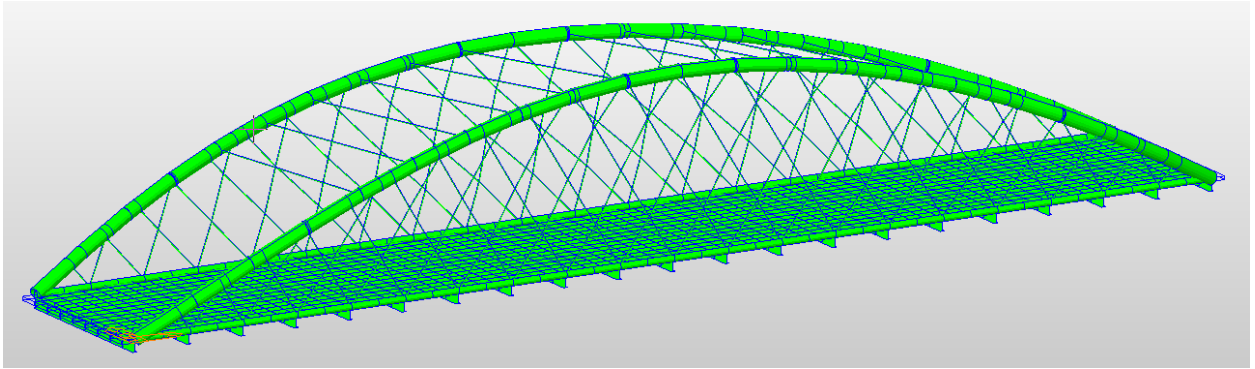


Figura 77. Dos arcos abiertos y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX

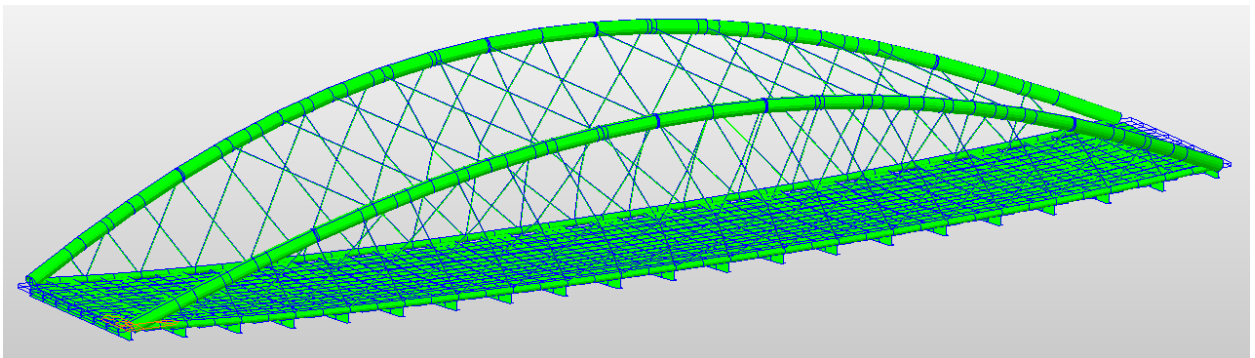


Figura 78. Dos arcos abiertos y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ

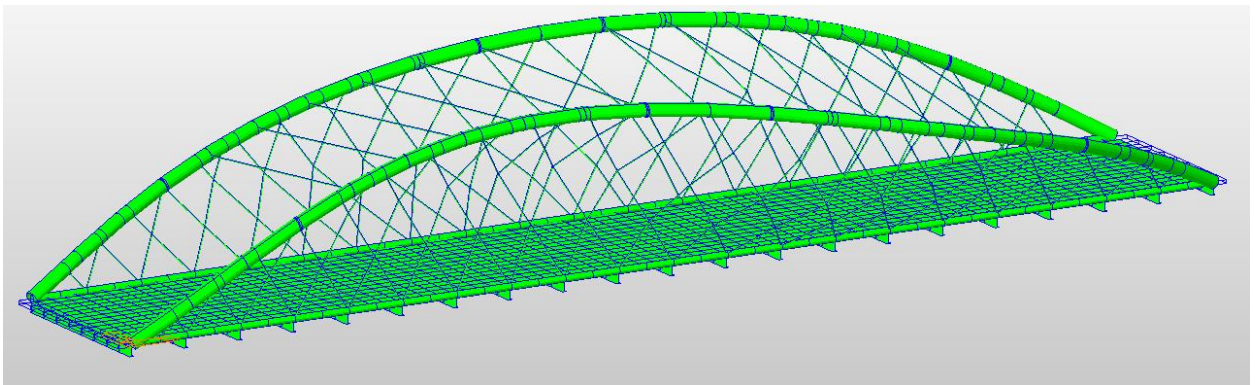


Figura 79. Dos arcos abiertos y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RZ

En este caso tenemos que el primer y tercer modo de vibración no vienen excitados por el paso del tren ya que no se produce ningún desplazamiento en el tablero. Sin embargo, para el segundo modo de vibración si se aprecia un desplazamiento vertical de la estructura.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 3a: Tirantes verticales	Modelo 3b: Tirantes en abanico	Modelo 3c: Tirantes en celosía	Modelo 3d: Tiranetes cruzados
Peso (kN)	2.30252e4	2.30357e4	2.30494e4	2.33444e4
1era frec. Natural	2.84 s	2.07 s	1.76 s	1.75 s
2nda frec. Natural	1.76 s	1.79 s	0.67 s	1.53 s
3era frec. natural	1.36 s	1.54 s	0.64 s	0.65 s

Tabla 6. Frecuencias naturales modelos de arcos abiertos



A modo de resumen, tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 3a (tirantes verticales) y 3b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares, tenemos dos modos que provocan desplazamiento vertical del tablero y uno es la continuación del otro y otro modo de vibración no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero. También tal y como se observa en la tabla se dan para valores de periodo parecidos. Para los modelos 3c (tirantes en celosía) y 3d (tirantes cruzados) también se observa un comportamiento similar, ya que tenemos un primer modo que no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero, un segundo modo similar que provoca el desplazamiento vertical del tablero, y un tercer modo diferente aunque si ampliasemos el rango de estudio, podemos comprobar que el siguiente modo de vibración que excita el paso del tren sobre la estructura coincide en ambos modelos con el mostrado para el modo 3 del modelo 3c.

#### 4.1.13 Modelo 4a: Un solo arco centrado y tirantes verticales

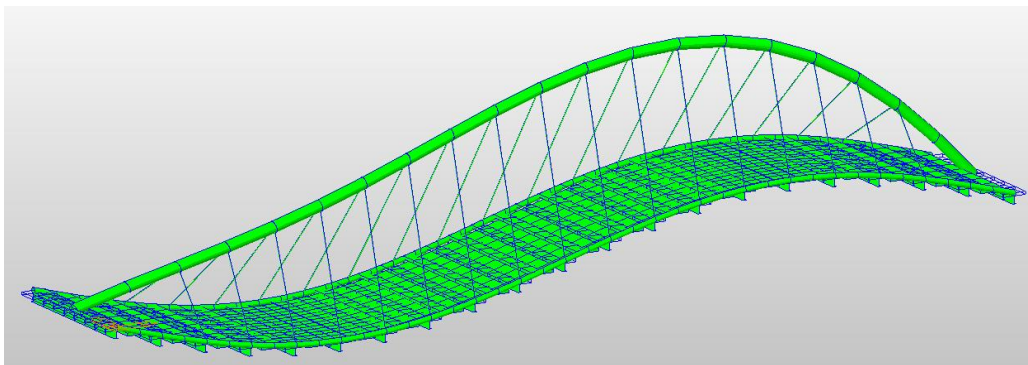


Figura 80. Un solo arco centrado y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RY

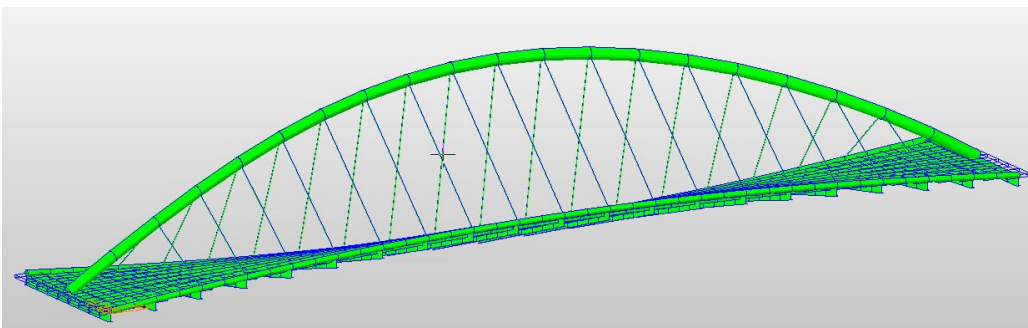


Figura 81. Un solo arco centrado y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RX

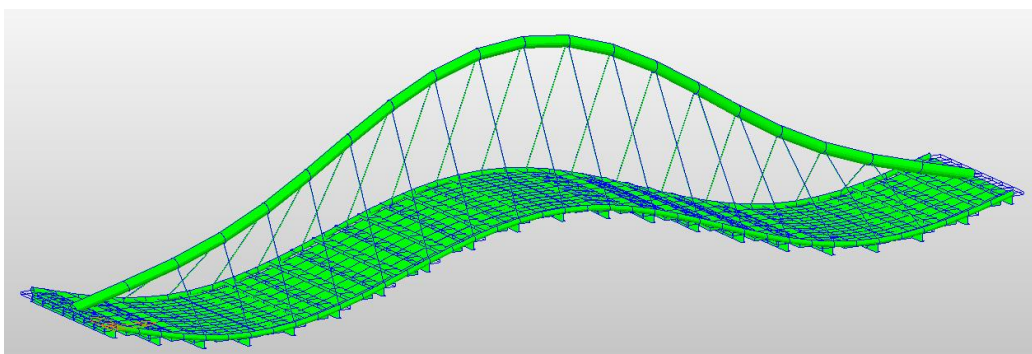


Figura 82. Un solo arco centrado y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ

Se observa como los modos de vibración 1 y 3 son consecutivos y corresponden al desplazamiento vertical del tablero, mientras que el segundo modo de vibración se produce debido a la rotación del tablero alrededor de su

eje longitudinal, que también provoca un desplazamiento vertical.

#### 4.1.14 Modelo 4b: Un solo arco centrado y tirantes en abanico

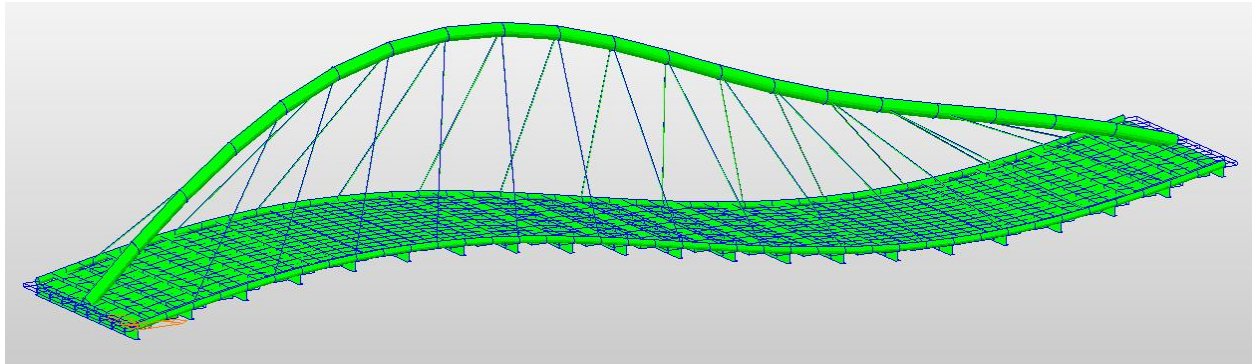


Figura 83. Un solo arco centrado y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RY

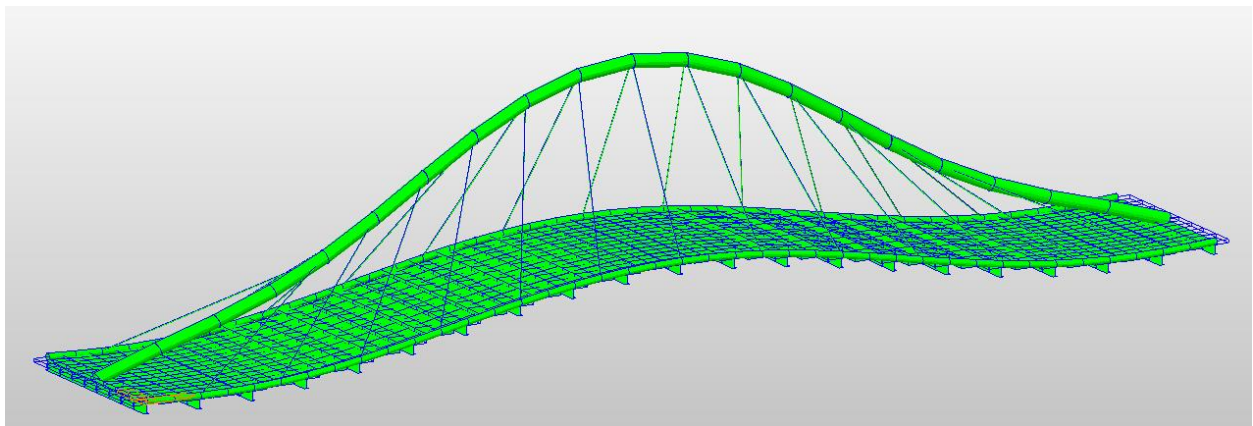


Figura 84. Un solo arco centrado y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en DZ

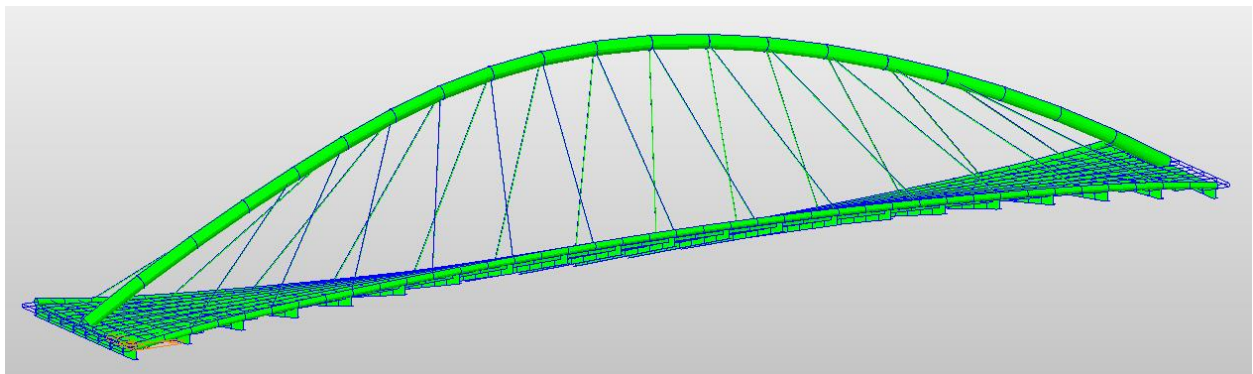


Figura 85. Un solo arco centrado y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en RX

Se observa como los dos primeros modos de vibración son consecutivos y corresponden al desplazamiento vertical del tablero, mientras que el tercer modo de vibración se produce debido a la rotación del tablero alrededor de su eje longitudinal, que también provoca un desplazamiento vertical.

#### 4.1.15 Modelo 4c: Un solo arco centrado y tirantes en celosía

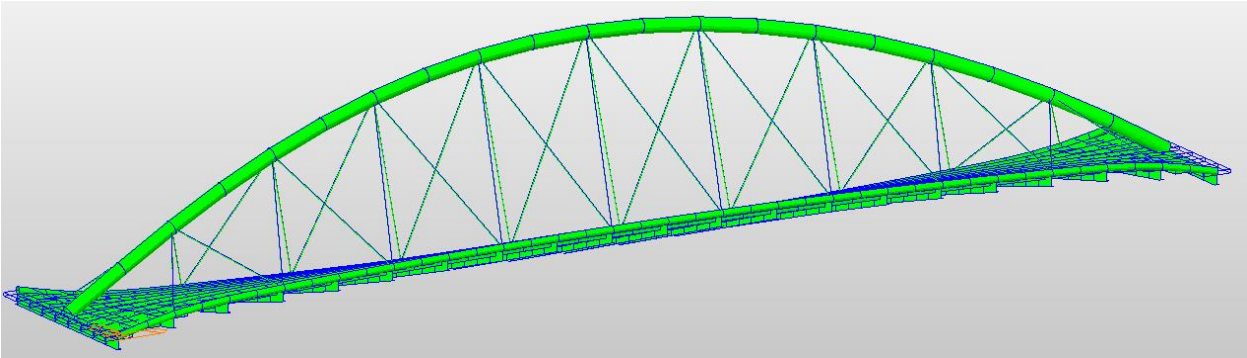


Figura 86. Un solo arco centrado y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX

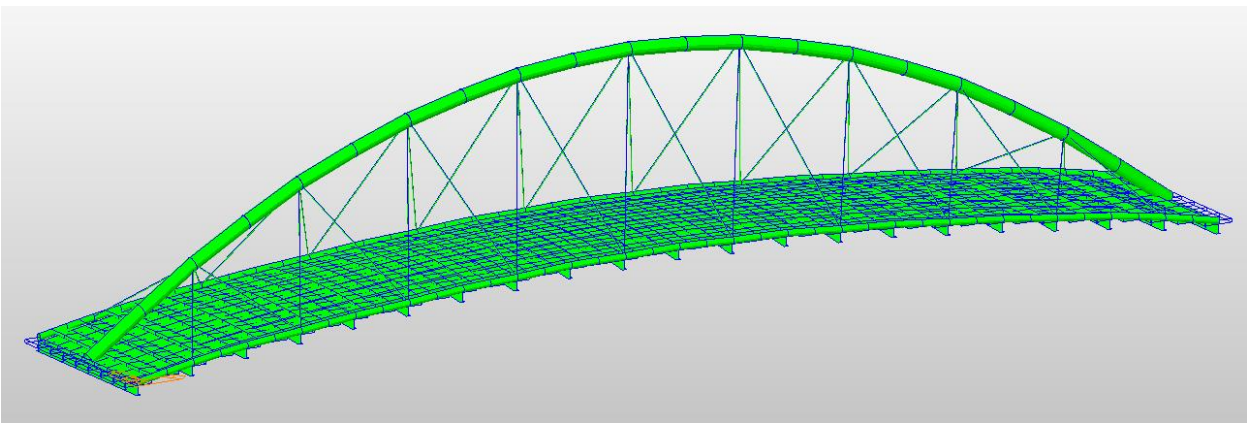


Figura 87. Un solo arco centrado y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ

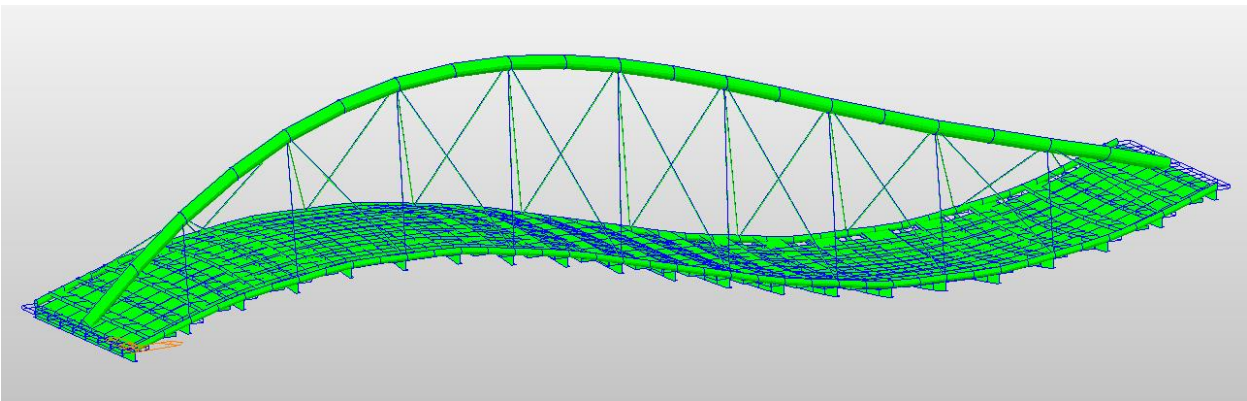


Figura 88. Un solo arco centrado y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY

En este modelo, tenemos un primer modo de vibración cuya excitación provoca la rotación del tablero alrededor de su eje longitudinal, y el segundo y tercer modo que provocan el desplazamiento vertical del tablero y el tercer modo corresponde al siguiente que se produciría con respecto al segundo.



#### 4.1.16 Modelo 4d: Un solo arco centrado y tirantes cruzados

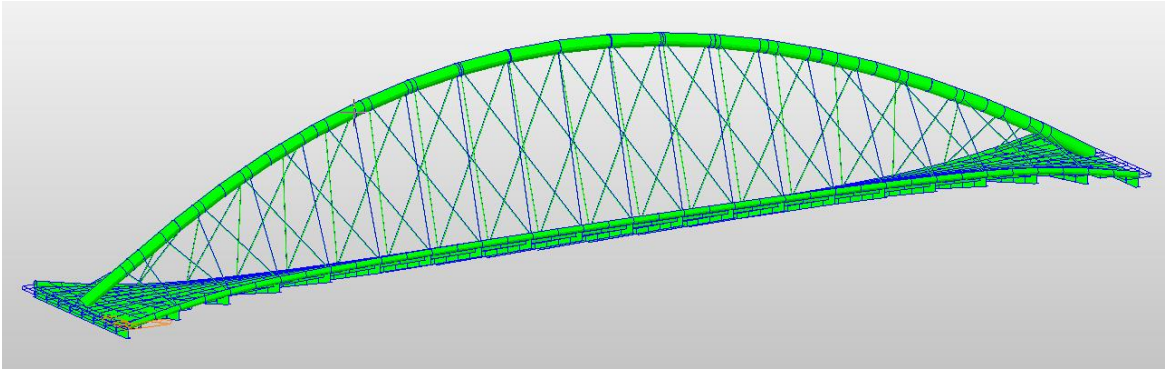


Figura 89. Un solo arco centrado y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX

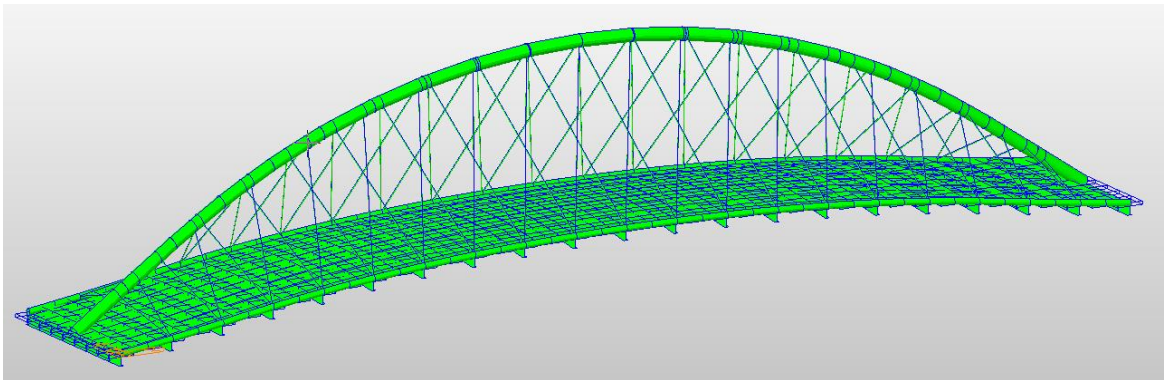


Figura 90. Un solo arco centrado y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ

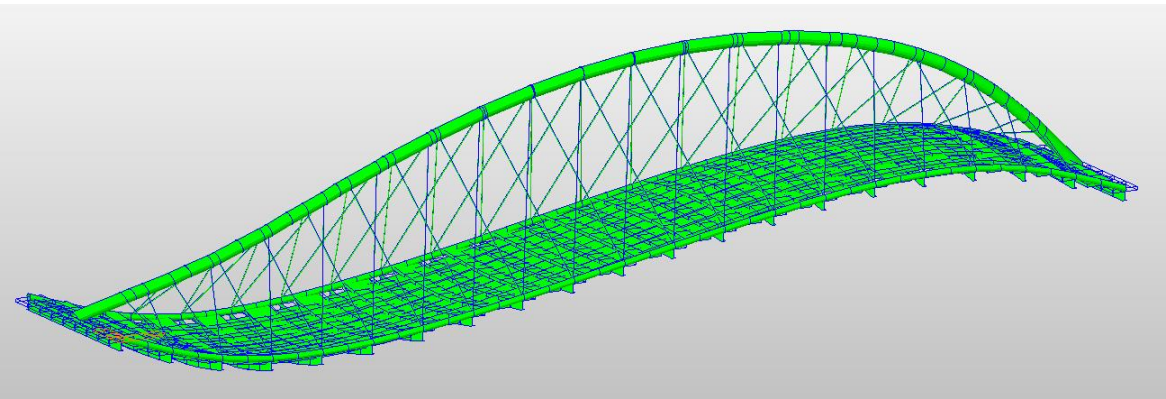


Figura 91. Un solo arco centrado y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RY

En este modelo, tenemos un primer modo de vibración cuya excitación provoca la rotación del tablero alrededor de su eje longitudinal, y el segundo y tercer modo que provocan el desplazamiento vertical del tablero y el tercer modo corresponde al siguiente que se produciría con respecto al segundo.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 4a: Tirantes verticales	Modelo 4b: Tirantes en abanico	Modelo 4c: Tirantes en celosía	Modelo 4d: Tiranetes cruzados
Peso (kN)	2.19749e4	2.19671e4	2.20056e4	2.23258e4
1era frec. Natural	3.38 s	2.58 s	1.19 s	1.44 s
2nda frec. Natural	2.15 s	2.02 s	0.85 s	0.83 s
3era frec. natural	1.62 s	1.80 s	0.72 s	0.60 s

Tabla 7. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado

A modo de resumen, tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 4a (tirantes verticales) y 4b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares aunque en distinto orden, tenemos dos modos que provocan desplazamiento vertical del tablero y uno es la continuación del otro y otro modo de vibración provoca la rotación del tablero a lo largo del eje longitudinal. Tal y como se observa en la tabla los valores de periodo que obtenemos no son tan parecido como para modelos anteriores. Para los modelos 4c (tirantes en celosía) y 4d (tirantes cruzados) se observa un comportamiento mas parejo, ya que tenemos un primer modo que excita la rotación del tablero alrededor del eje longitudinal del puente, y el segundo y tercer modo corresponden uno a la continuación del otro que provocan desplazamiento vertical del puente. Cuando me refiero a que son uno continuación del otro es en referencia a que en el segundo modo no tenemos ningún nodo o punto nulo de desplazamiento y para el tercero tenemos uno, para sollicitaciones de desplazamiento vertical del tablero. Se puede observar en la tabla que se dan para valores similares.

#### 4.1.17 Modelo 5a: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales

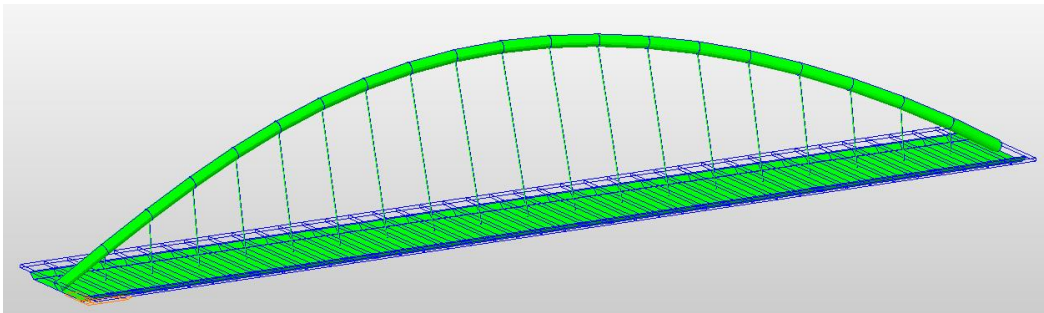


Figura 92. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales, Modo de vibración 1 en RX

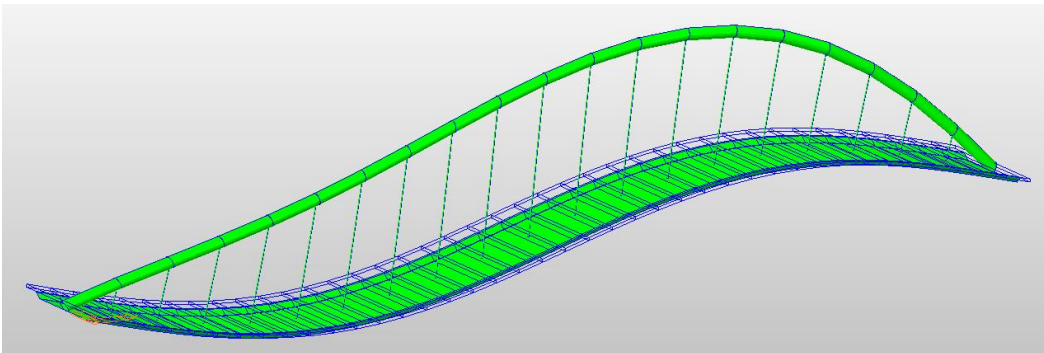


Figura 93. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales, Modo de vibración 2 en RY

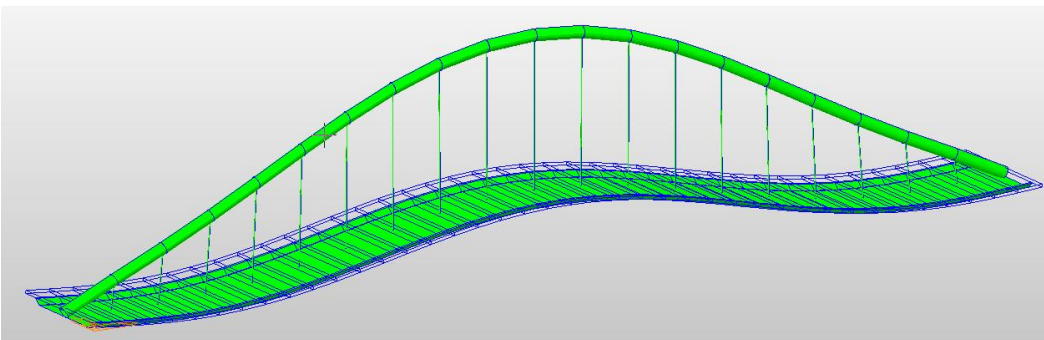


Figura 94. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes verticales, Modo de vibración 3 en DZ

En este modelo, tenemos un primer modo de vibración que no excita el tablero, por lo que no es sollicitado por el paso del tren, sólo afecta al arco, y el segundo y tercer modo que provocan el desplazamiento vertical del



tablero.

#### 4.1.18 Modelo 5b: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico

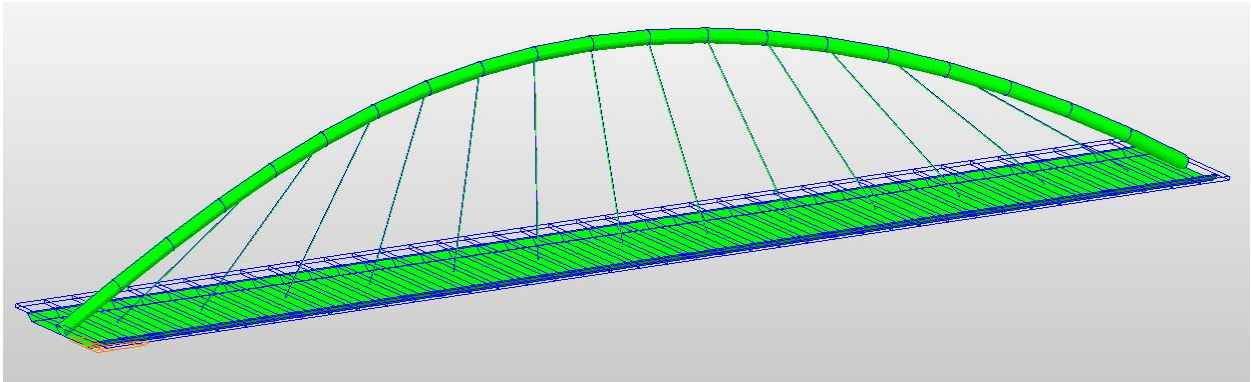


Figura 95. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico, Modo de vibración 1 en RX

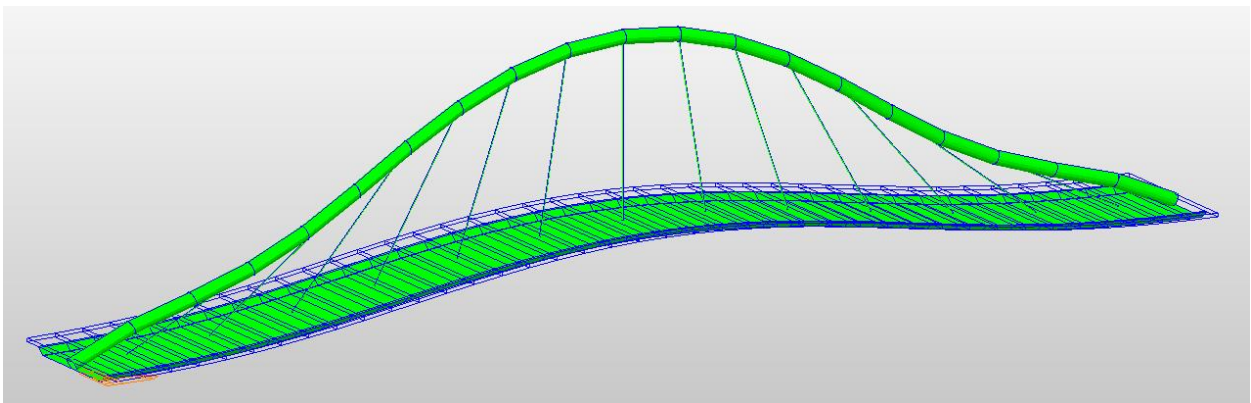


Figura 96. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico, Modo de vibración 2 en DZ

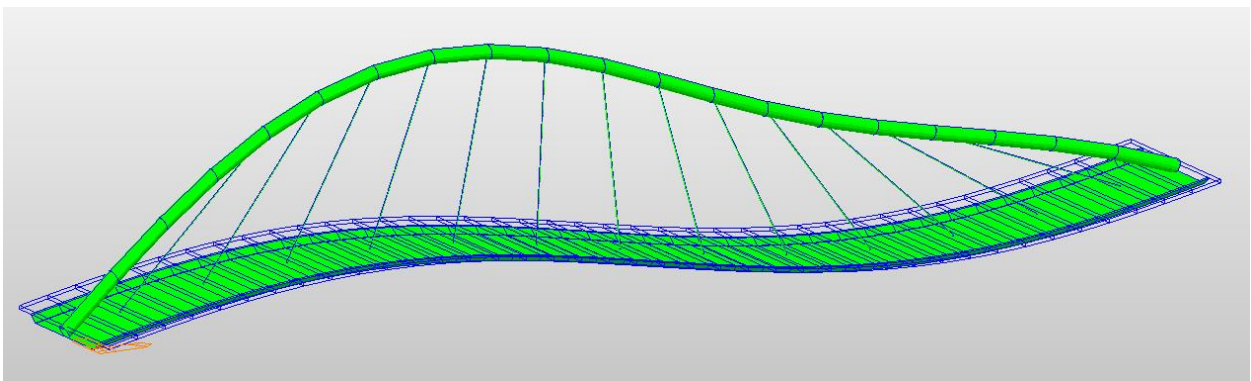


Figura 97. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en abanico, Modo de vibración 3 en RY

En este modelo, tenemos un primer modo de vibración que no excita el tablero, por lo que no es solicitado por el paso del tren, sólo afecta al arco, y el segundo y tercer modo que provocan el desplazamiento vertical del tablero.

#### 4.1.19 Modelo 5c: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía

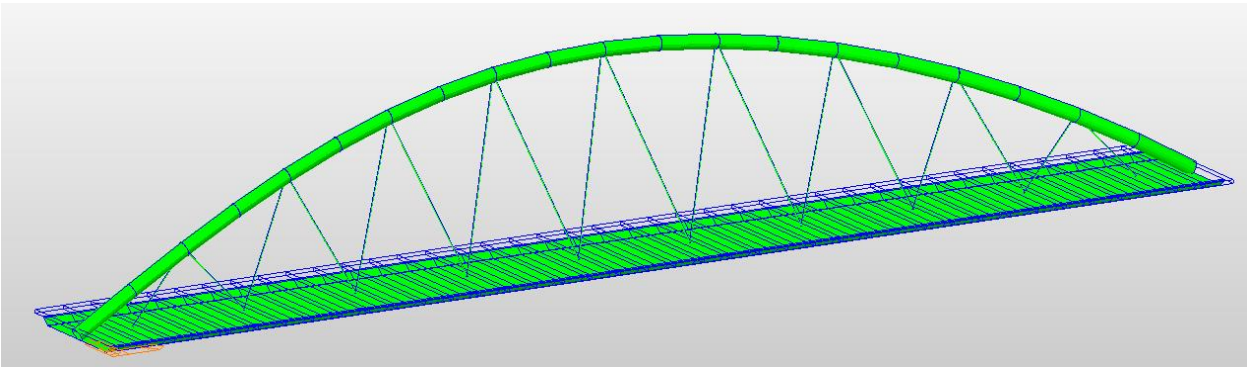


Figura 98. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía, Modo de vibración 1 en RX

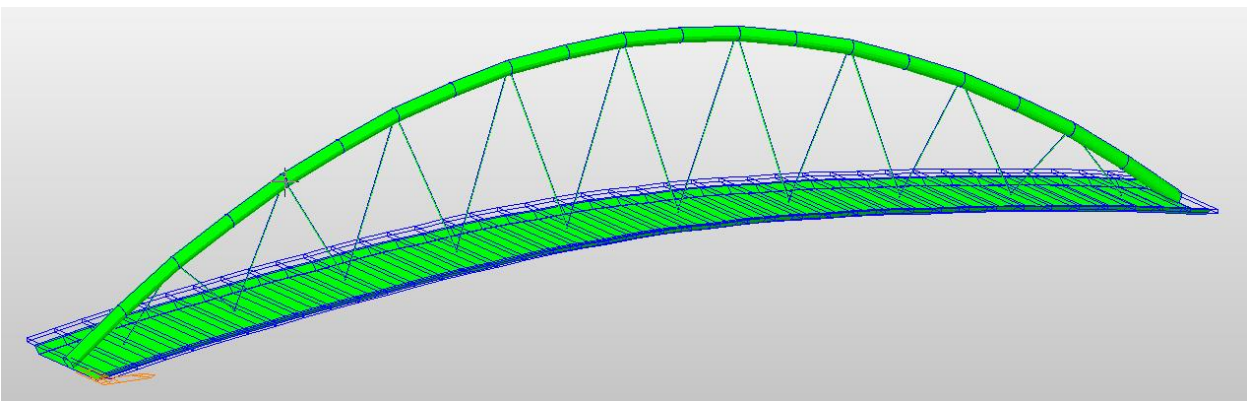


Figura 99. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía, Modo de vibración 2 en DZ

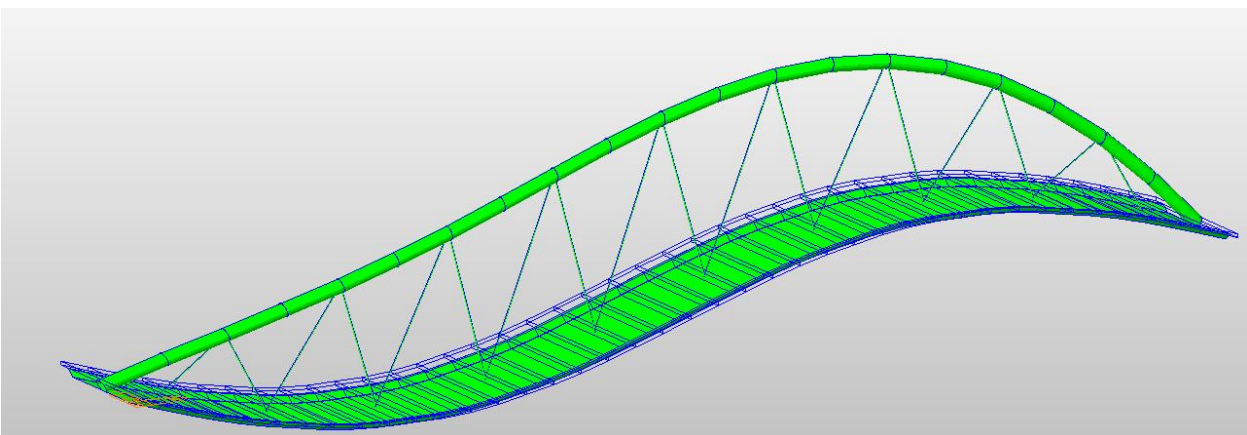


Figura 100. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes en celosía, Modo de vibración 3 en RY

En este modelo, tenemos un primer modo de vibración que no excita el tablero, por lo que no es solicitado por el paso del tren, sólo afecta al arco, y el segundo y tercer modo que provocan el desplazamiento vertical del tablero, que se observa que son uno continuación del otro, ya que para el segundo modo no tenemos ningún nodo y en el tercer modo aparece un nodo o punto nulo de desplazamiento.

#### 4.1.20 Modelo 5d: Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados

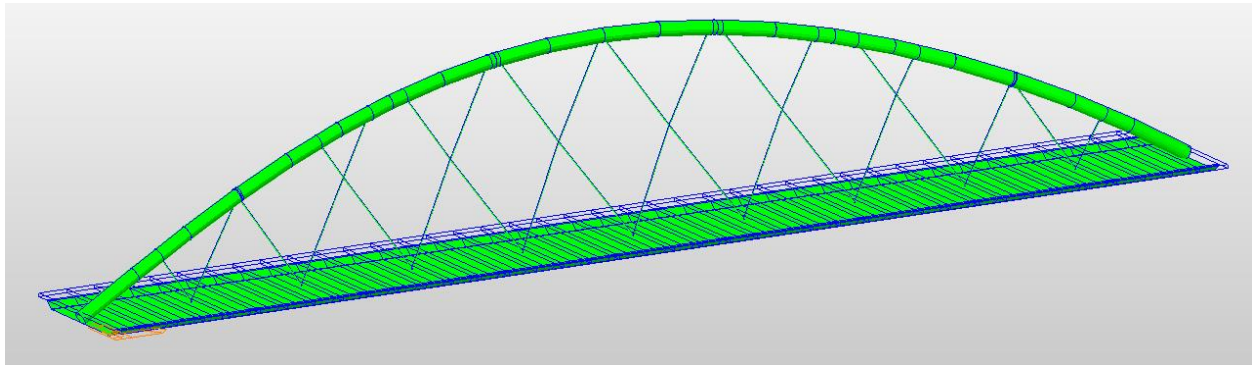


Figura 101. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados, Modo de vibración 1 en RX

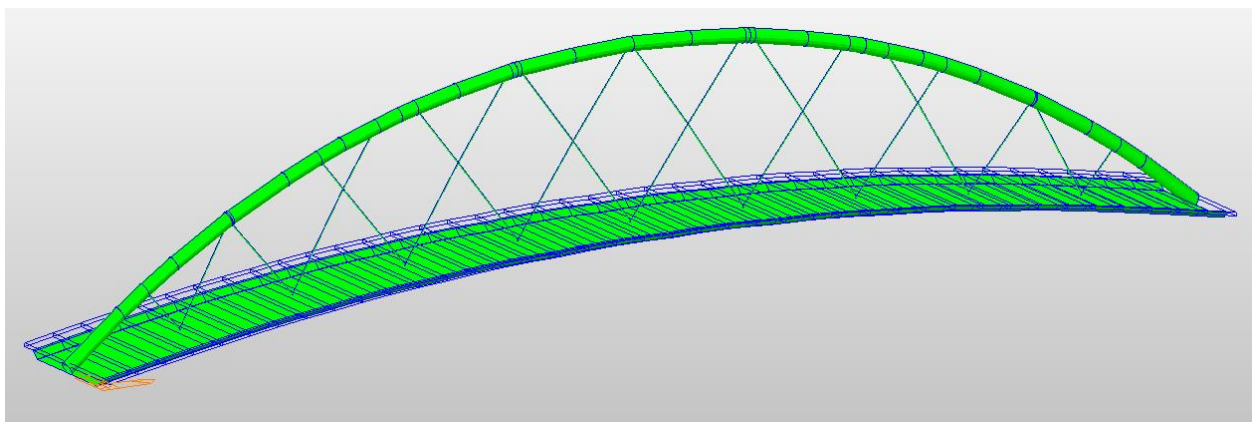


Figura 102. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados, Modo de vibración 2 en DZ

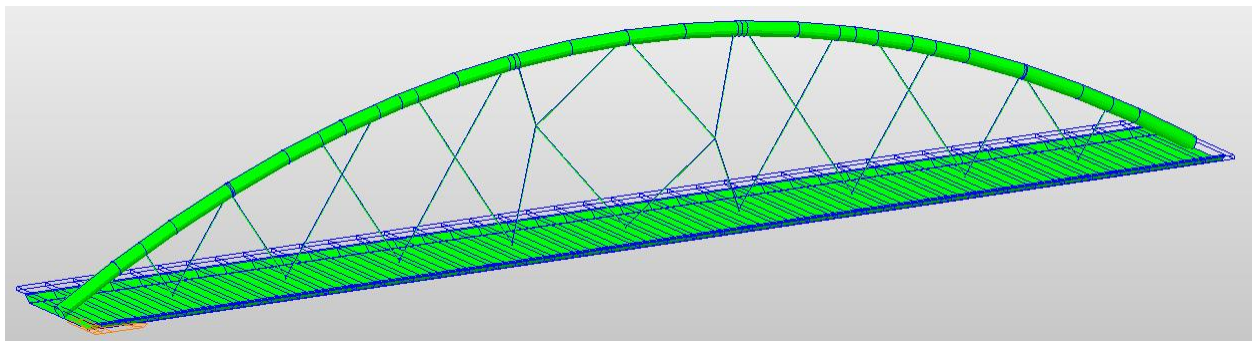


Figura 103. Arco centrado con tablero sección cajón y tirantes cruzados, Modo de vibración 3 en RZ

Para este modelo observamos que el primer y el tercer modo de vibración no provocan desplazamiento del tablero, por lo que no vienen solicitados por el paso del tren, frente al segundo modo, donde sí que se observa desplazamiento vertical del tablero.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 5a: Tirantes verticales	Modelo 5b: Tirantes en abanico	Modelo 5c: Tirantes en celosía	Modelo 5d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.01198e4	2.01251e4	1.93820e4	1.93926e4
1era frec. Natural	1.58 s	1.61 s	1.59 s	1.59 s
2nda frec. Natural	1.50 s	1.43 s	0.78 s	0.79 s
3era frec. natural	1.15 s	0.70 s	0.68 s	0.77 s

Tabla 8. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado y sección del tablero en cajón

A modo de resumen, tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 5a (tirantes verticales) y 5b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares aunque en distinto orden. Un primer modo de vibración que no viene excitado por el paso del tren, ya que no provoca desplazamiento del tablero, y los siguientes dos modos de vibración que provocan el desplazamiento vertical del tablero, de forma que para el primer modelo se da primero la excitación de rotación sobre un eje perpendicular al eje longitudinal del tablero y después el desplazamiento vertical, siendo alrevés para el modelo 5b. Para los modelos 5c (tirantes en celosía) y 5d (tirantes cruzados) se observa un comportamiento más parejo, ya que tenemos un primer modo que excita la rotación del tablero alrededor del eje longitudinal del puente, y el segundo y tercer modo corresponden uno a la continuación del otro que provocan desplazamiento vertical del puente. Cuando me refiero a que son una continuación del otro es en referencia a que en el segundo modo no tenemos ningún nodo o punto nulo de desplazamiento y para el tercero tenemos uno, para sollicitaciones de desplazamiento vertical del tablero. Se puede observar en la tabla que se dan para valores similares. Dado que estamos analizando los tres primeros modos, en el caso del modelo 5d, aparece como tercer modo vibración uno que no provoca desplazamiento del tablero, si seguimos avanzando encontraremos uno similar al tercer modo de vibración del modelo 5c.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento similar para las disposiciones de tirantes verticales junto con la disposición en abanico. De modo que, para los 4 primeros modelos de diferentes tipologías de arco, coincide que para la disposición de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) se suele excitar primeramente la rotación sobre el eje Y, seguida una frecuencia que no viene excitada por el paso del tren sobre la estructura y como tercer modo de vibración tenemos el desplazamiento vertical del tablero.

Para las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) tenemos un comportamiento parecido por parejas al igual que sucede para las otras dos disposiciones de tirantes. Se da una situación similar esta vez para los 5 primeros modelos, de forma que el primer modo de vibración no viene excitado por el paso del tren, no provoca desplazamiento del tablero, seguido del segundo modo de vibración que provoca el desplazamiento vertical de la estructura y un tercer modo de vibración que para el caso de los tirantes tipo c (tirantes en celosía) también viene excitado por el paso del tren y para el caso de los tirantes tipo d (tirantes cruzados) no viene excitado por el paso del mismo. Aclarar que en los modelos de tipo 1 (dos arcos paralelos) para los modos de vibración 2 y 3 tenemos un comportamiento diferente al resto que no sigue esta dinámica que acabamos de comentar.

Observamos que el modelo 5, para las disposiciones de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) tienen como primera frecuencia natural, la excitación de rotación sobre el eje longitudinal del tablero, que afecta al arco y no viene provocado por el paso del tren sobre la estructura, distinto a lo que hemos observado en el resto de los modelos, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que son diferentes. Para los siguientes modos de vibración si que vienen excitados por el paso del tren ya que tenemos desplazamiento vertical del tablero.

En lo relativo a los valores de frecuencias naturales, sucede algo parecido ya que si que tenemos valores similares diferenciados por parejas. Para las disposiciones de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) se dan valores parejos para aquellos modos de vibración que coinciden dentro del mismo modelo de tipología de arco.

En el caso de las disposiciones de tirantes tipo c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) si que tenemos valores similares de forma general para los diferentes modelos en para aquellos modos de vibración que sean coincidentes.



## 4.2. RESULTADOS: DESPLAZAMIENTOS

### 4.2.1 MODELO 1a: Dos arcos paralelos y tirantes verticales

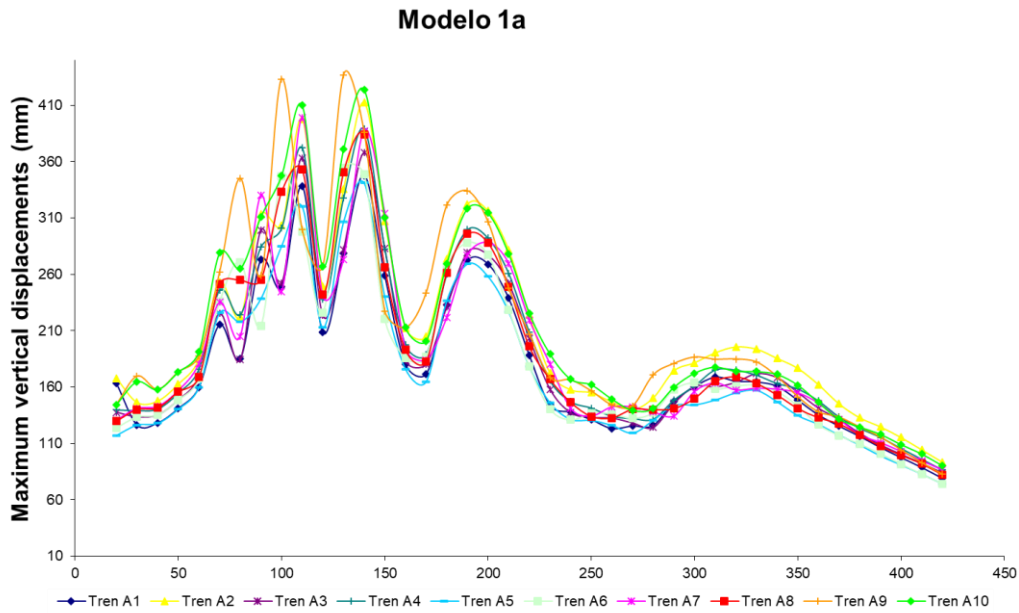


Figura 104. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes verticales

En este primer modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 100 y 150 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 130 km/h, cuyo valor es de 43.7 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.2.2 MODELO 1b: Dos arcos paralelos y tirantes en abanico

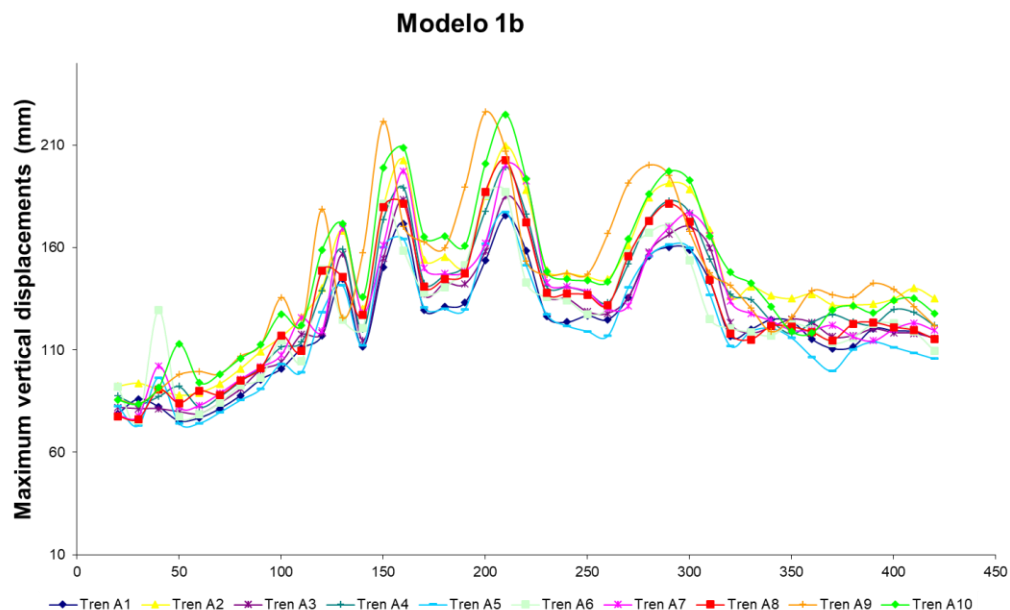


Figura 105. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes en abanico

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 150 y 200 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 200 km/h, cuyo valor es de 22.6 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.3 MODELO 1c: Dos arcos paralelos y tirantes en celosía

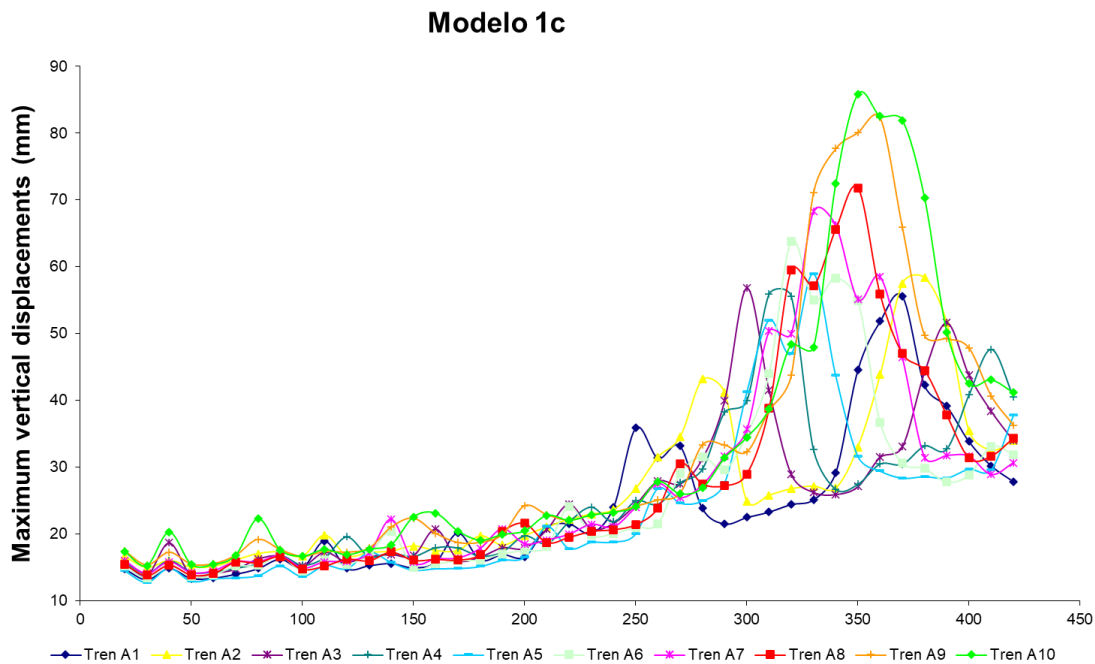


Figura 106. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes en celosía

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 350 km/h, cuyo valor es de 8.58 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.4 MODELO 1d: Dos arcos paralelos y tirantes cruzados

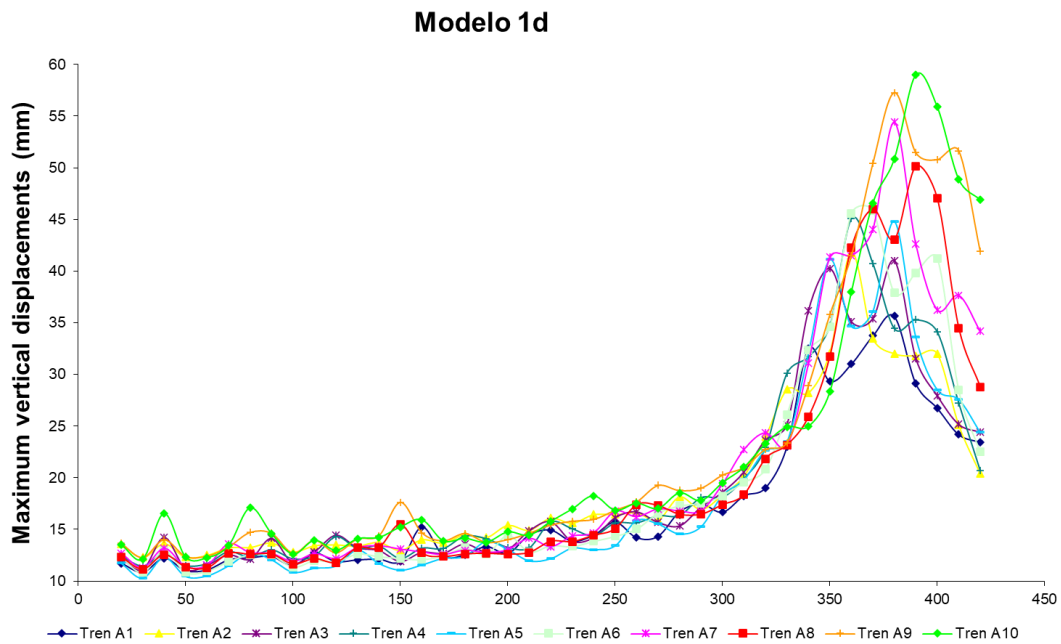


Figura 107. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos paralelos y tirantes cruzados

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 370 y 410 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 390 km/h, cuyo valor es de 5.9 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.5 MODELO 2a: Dos arcos cerrados y tirantes verticales

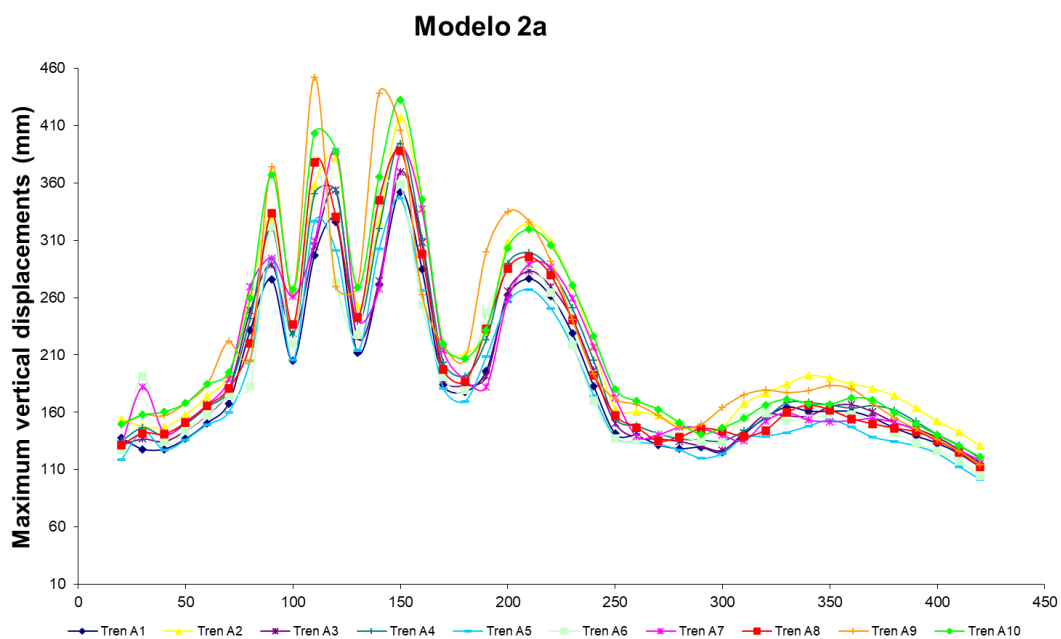


Figura 108. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes verticales

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 100 y 150 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 110 km/h, cuyo valor es de 45.2 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.6 MODELO 2b: Dos arcos cerrados y tirantes en abanico

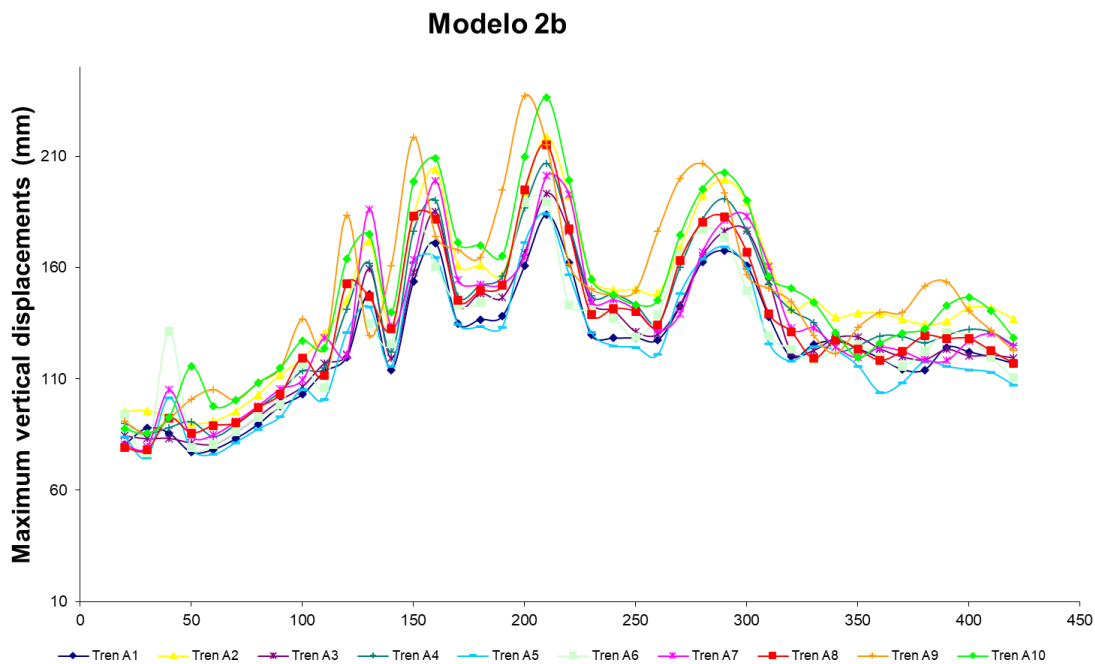


Figura 109. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes en abanico

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen en varios picos para velocidades en torno a 150, 200 y 300 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 200 km/h, cuyo valor es de 23.7 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.



#### 4.2.7 MODELO 2c: Dos arcos cerrados y tirantes en celosía

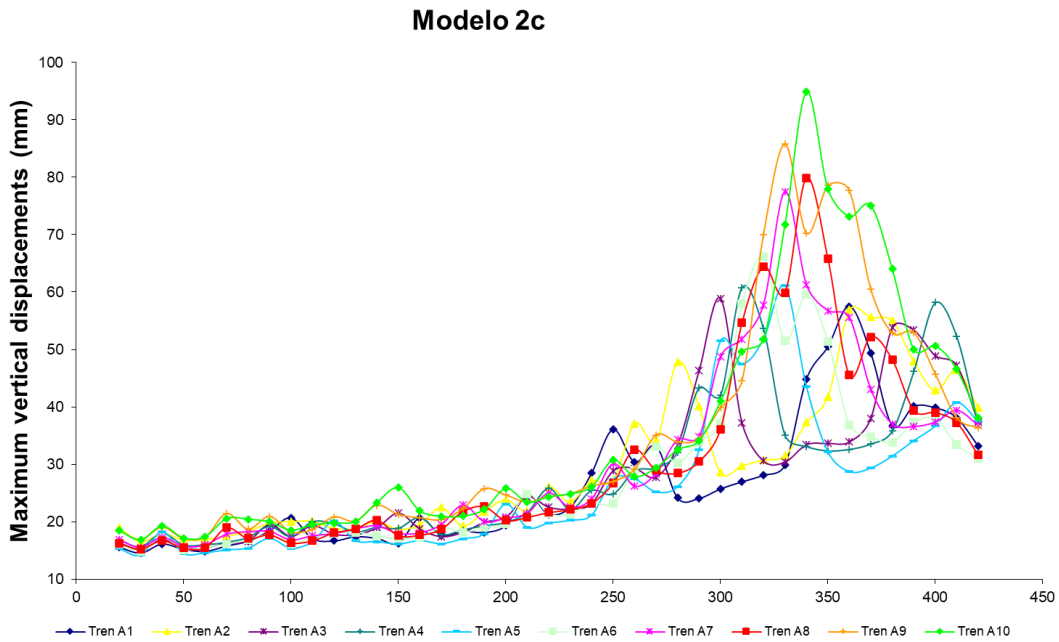


Figura 110. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes en celosía

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades en torno a los 350 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 340 km/h, cuyo valor es de 9.49 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.8 MODELO 2d: Dos arcos cerrados y tirantes cruzados

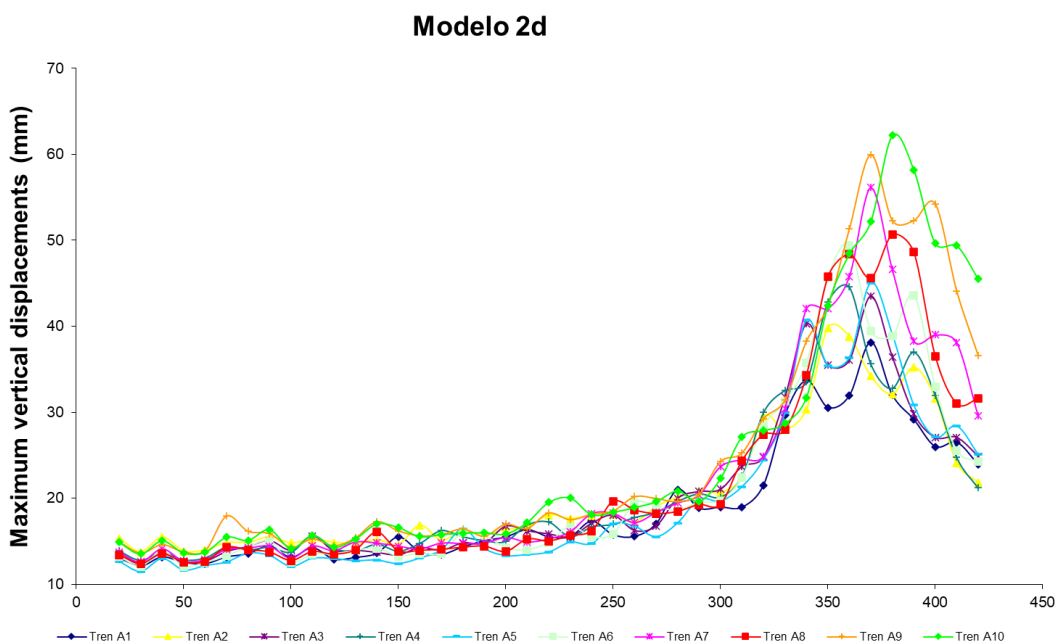


Figura 111. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos cerrados y tirantes cruzados

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 380 km/h, cuyo valor es de 6.22 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.9 MODELO 3a: Dos arcos abiertos y tirantes verticales

##### Modelo 3a: arcos cerrados con tirantes verticales

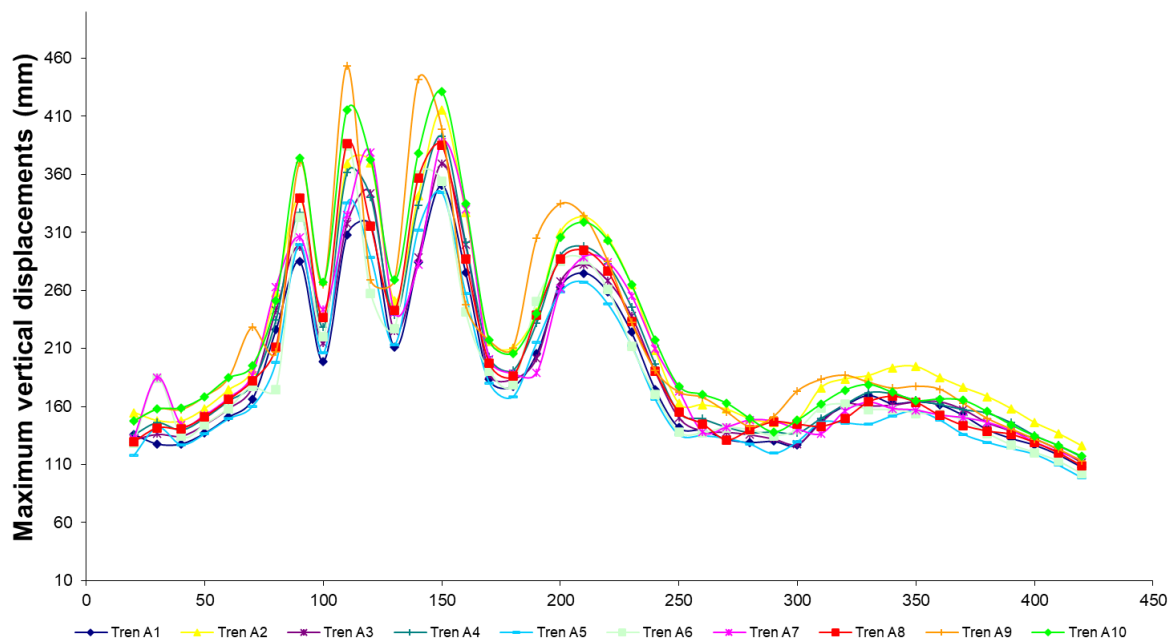


Figura 112. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes verticales

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 100 y 150 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 110 km/h, cuyo valor es de 45.34 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.10 MODELO 3b: Dos arcos abiertos y tirantes en abanico

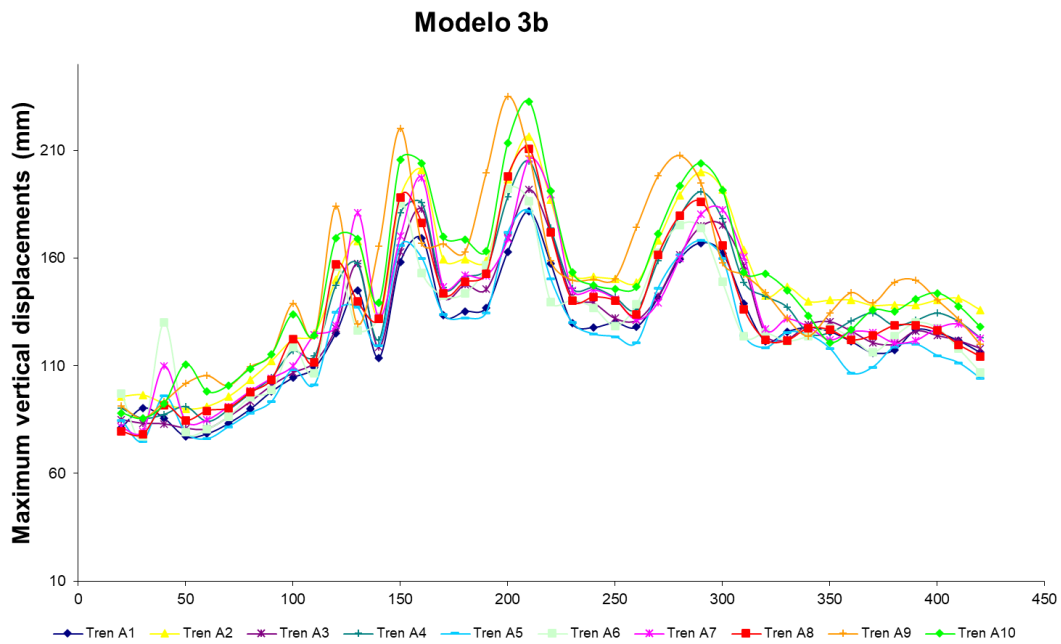


Figura 113. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes en abanico

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen en varios picos para velocidades en torno a 150, 200 y 300 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 200 km/h, cuyo valor es de 23.51 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.11 MODELO 3c: Dos arcos abiertos y tirantes en celosía

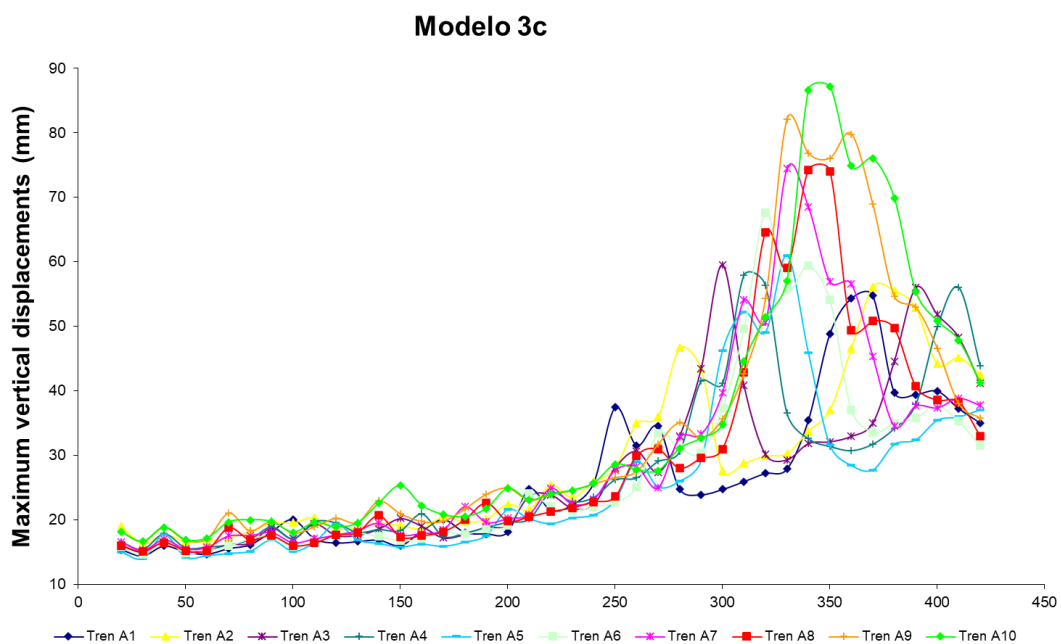


Figura 114. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes en celosía

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades en torno a 350 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 350 km/h, cuyo valor es de 8.72 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.12 MODELO 3d: Dos arcos abiertos y tirantes cruzados

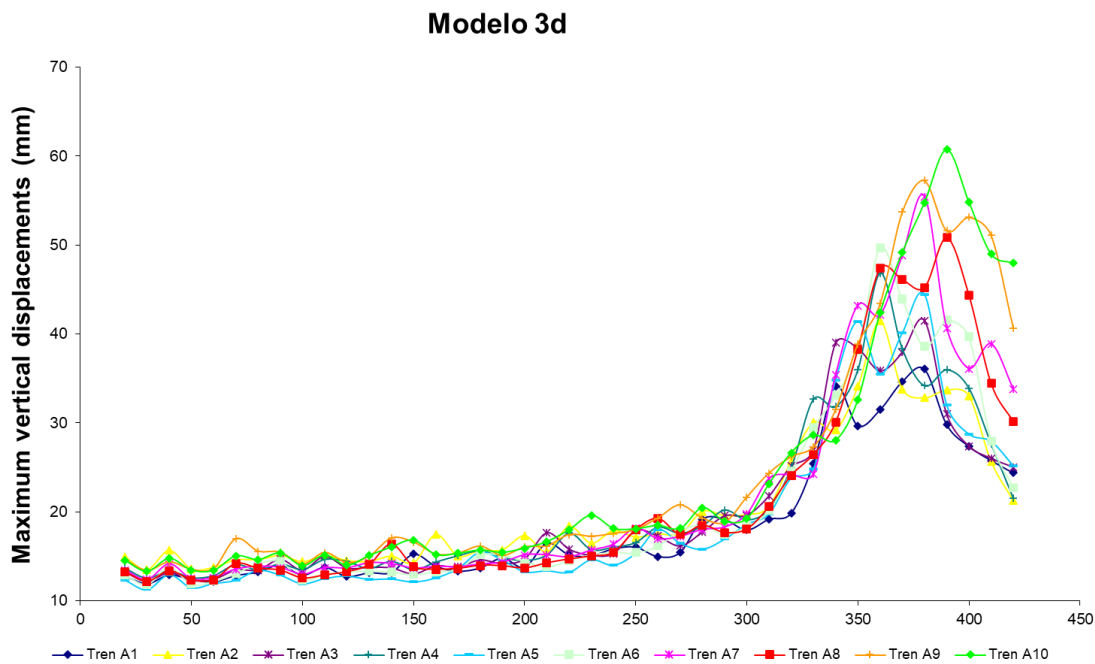


Figura 115. Resultados desplazamientos Modelo dos arcos abiertos y tirantes cruzados

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 390 km/h, cuyo valor es de 6.07 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.13 MODELO 4a: Un arco centrado y tirantes verticales

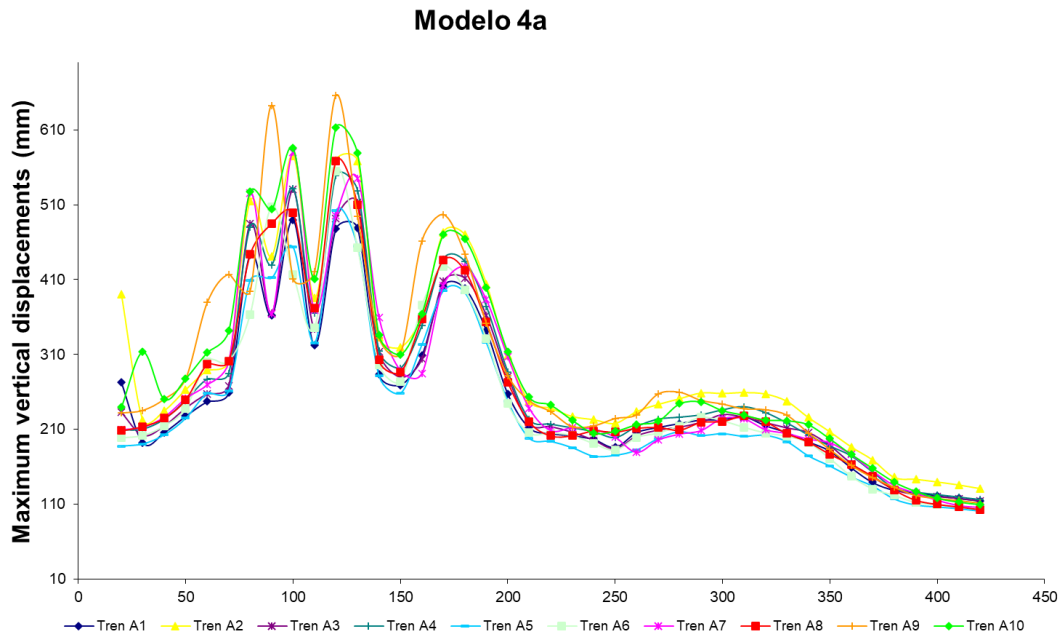


Figura 116. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes verticales

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 70 y 120 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 120 km/h, cuyo valor es de 65.6 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.14 MODELO 4b: Un arco centrado y tirantes en abanico

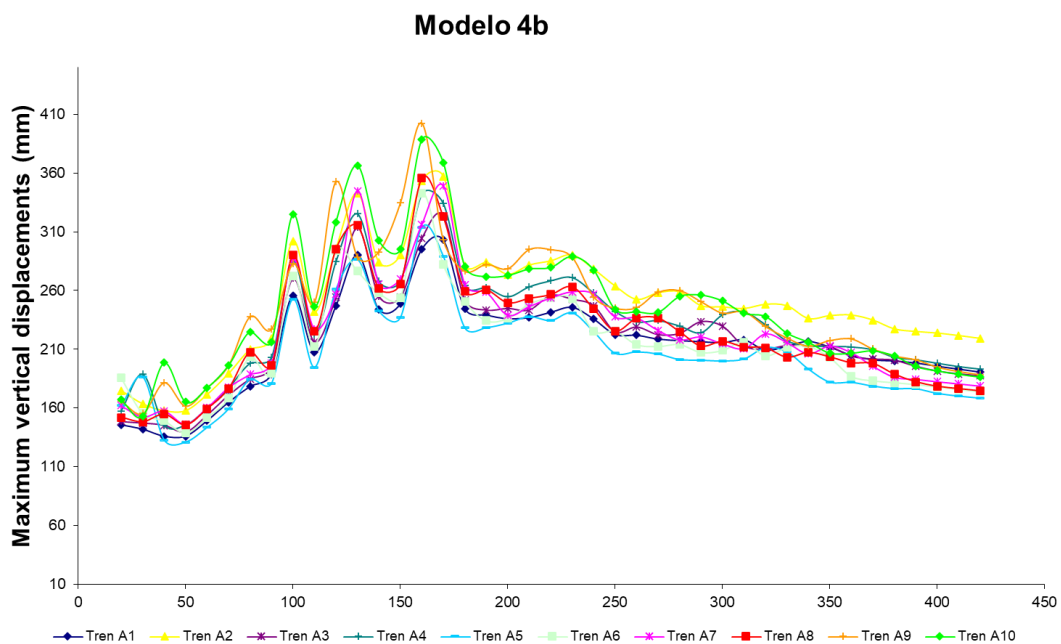


Figura 117. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes en abanico

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 100 y 150 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 160 km/h, cuyo valor es de 40.3 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.15 MODELO 4c: Un arco centrado y tirantes en celosía

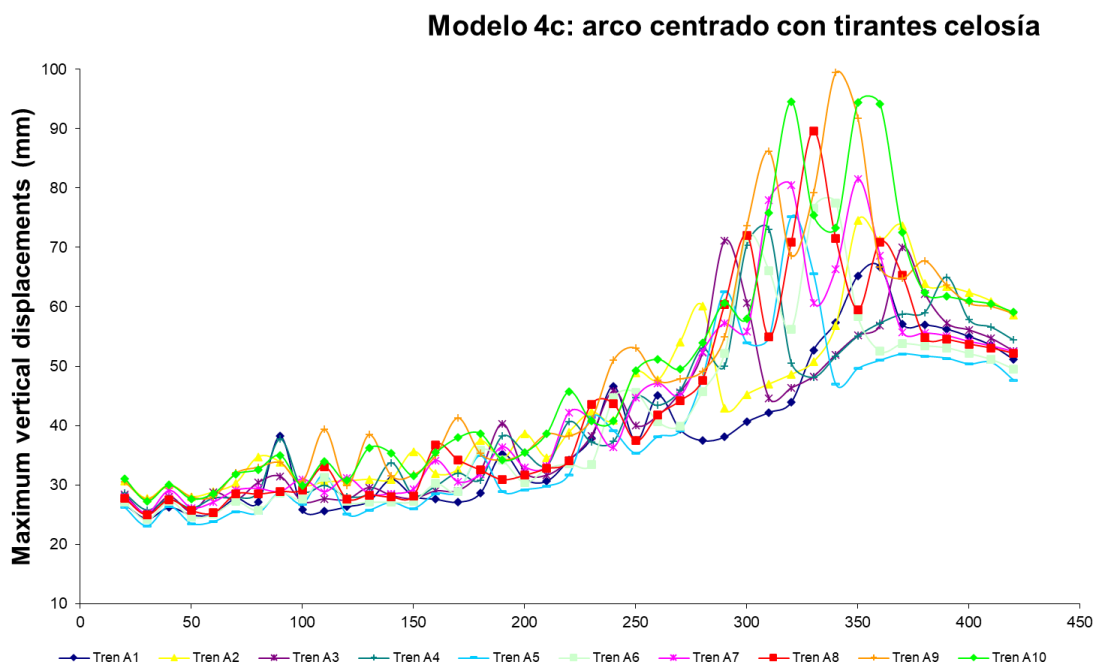


Figura 118. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes en celosía

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades entre 300 y 370 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 340 km/h, cuyo valor es de 9.93 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.16 MODELO 4d: Un arco centrado y tirantes cruzados

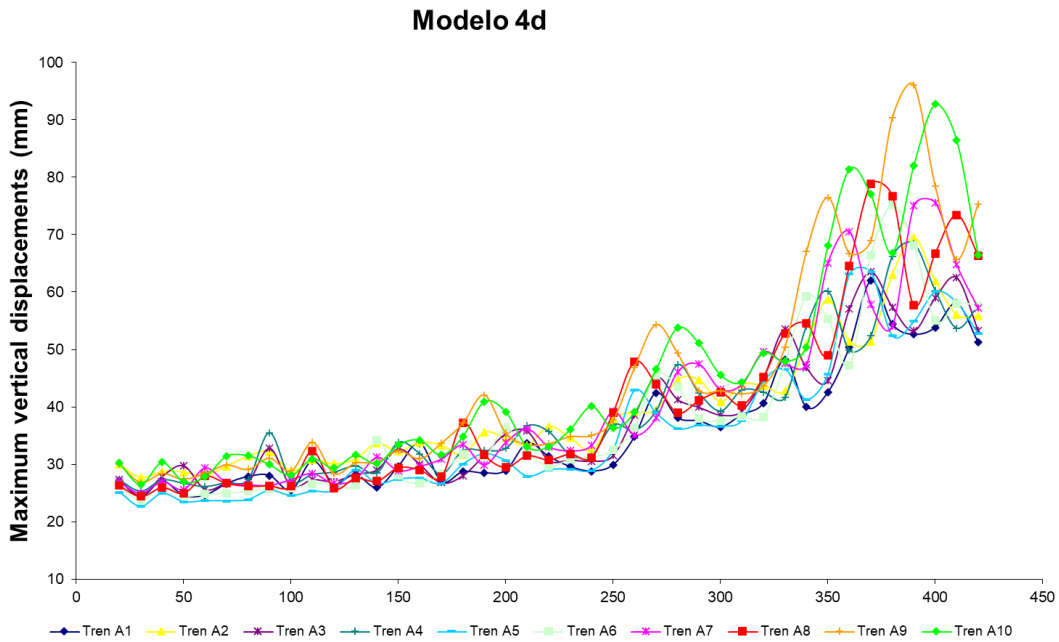


Figura 119. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado y tirantes cruzados

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 390 km/h, cuyo valor es de 9.61 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.17 MODELO 5a: Un solo arco centrado, tirantes verticales y tablero con sección en cajón

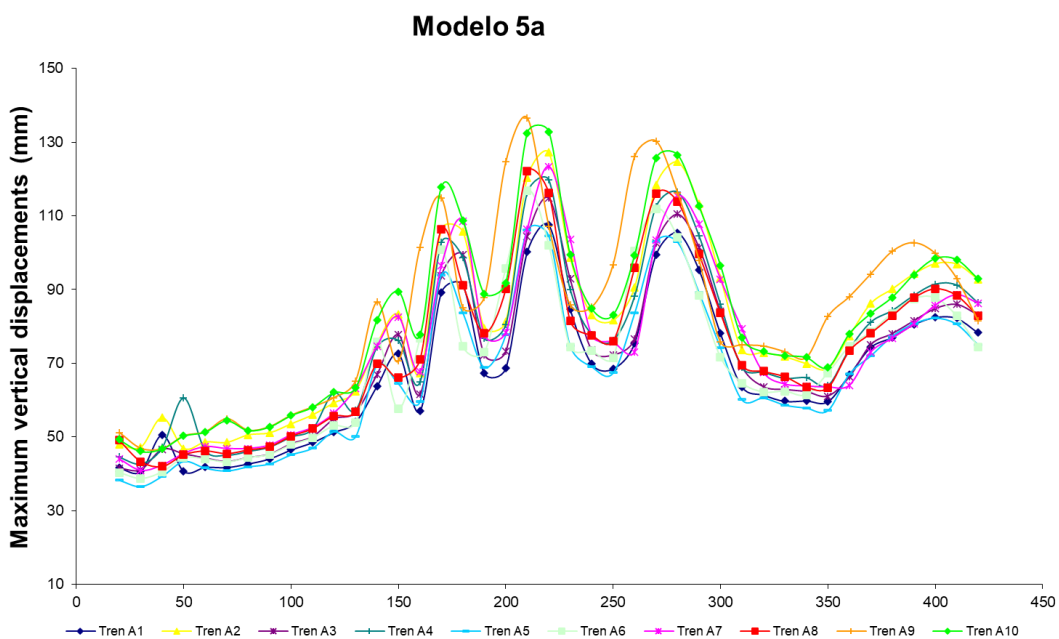


Figura 120. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes verticales

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen en varios picos para velocidades en torno a 150, 200 y 300 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 210 km/h, cuyo valor es de 13.65 cm.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.18 MODELO 5b: Un solo arco centrado, tirantes en abanico y tablero con sección en cajón

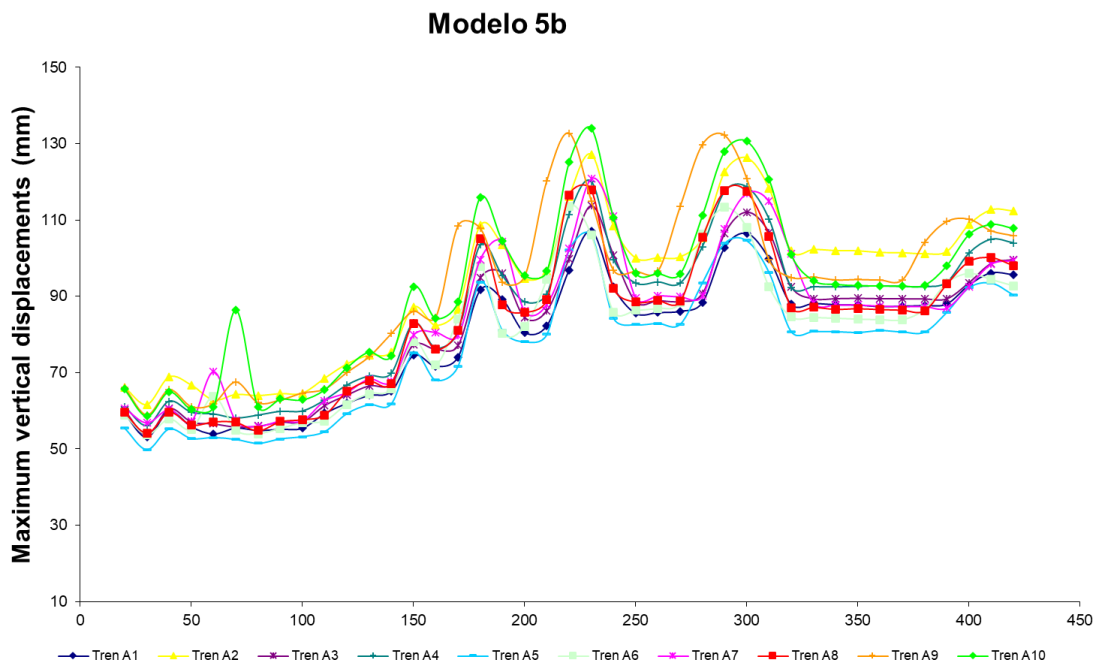


Figura 121. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes en abanico

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen en varios picos para velocidades en torno a 150, 220 y 300 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 230 km/h, cuyo valor es de 13.40 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.



#### 4.2.19 MODELO 5c: Un solo arco centrado, tirantes en celosía y tablero con sección en cajón

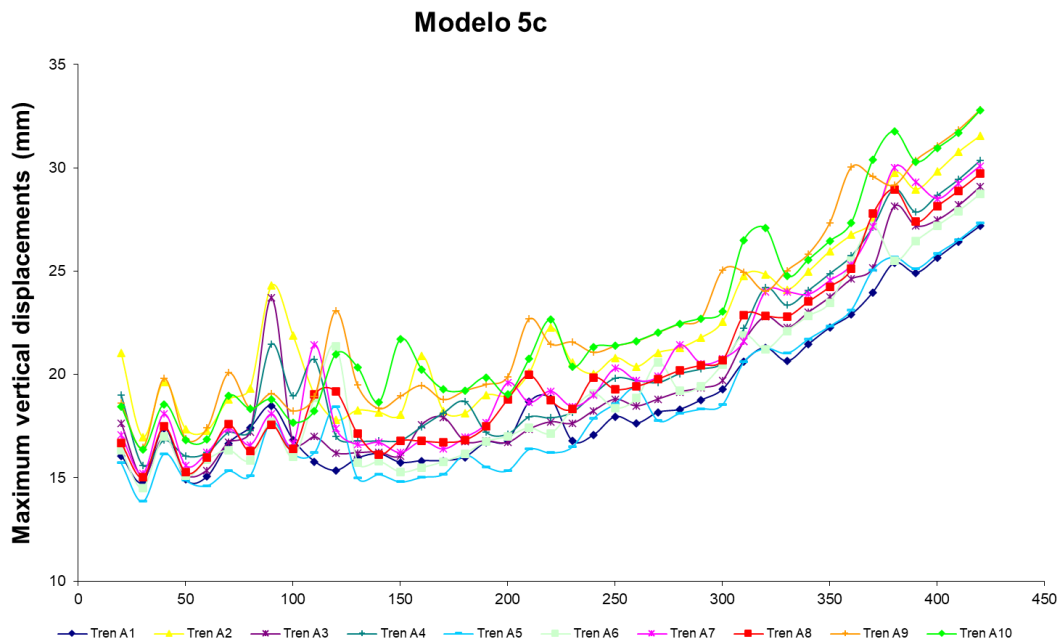


Figura 122. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes en celosía

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades en torno a 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 420 km/h, cuyo valor es de 3.28 cm.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.2.20 MODELO 5d: Un solo arco centrado, tirantes cruzados y tablero con sección en cajón

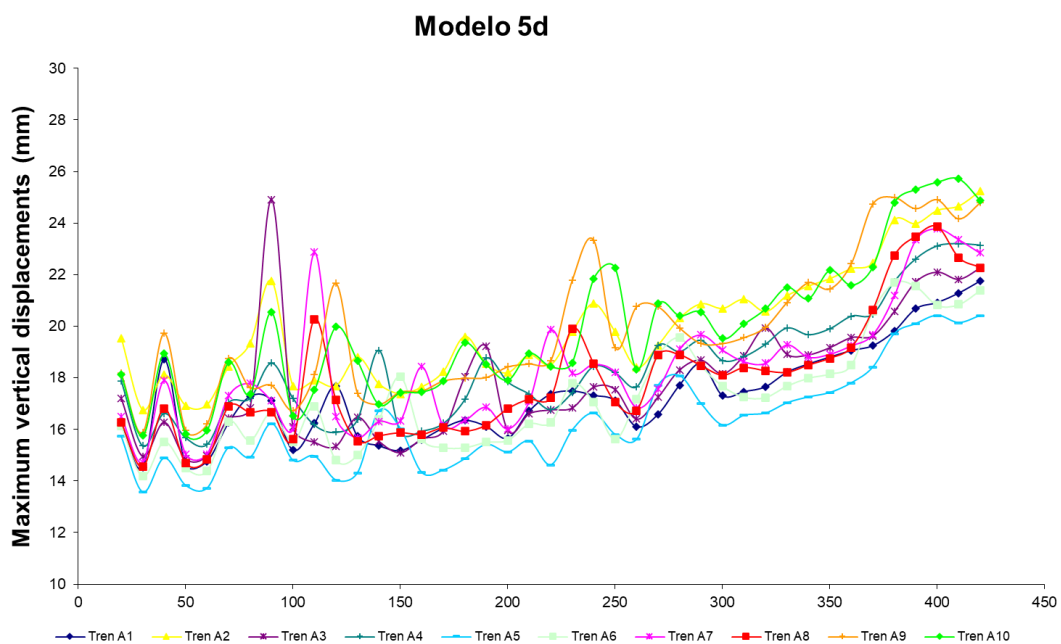


Figura 123. Resultados desplazamientos Modelo arco centrado con tablero cajón y tirantes cruzados

En este modelo observamos que los mayores desplazamientos verticales se producen para velocidades en torno a 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 410 km/h, cuyo valor es de 2.57 cm. A destacar el pico que produce el modelo de tren A3 a 90 km/h.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3. RESULTADOS: ACELERACIONES

#### 4.3.1 MODELO 1a: Dos arcos paralelos y tirantes verticales

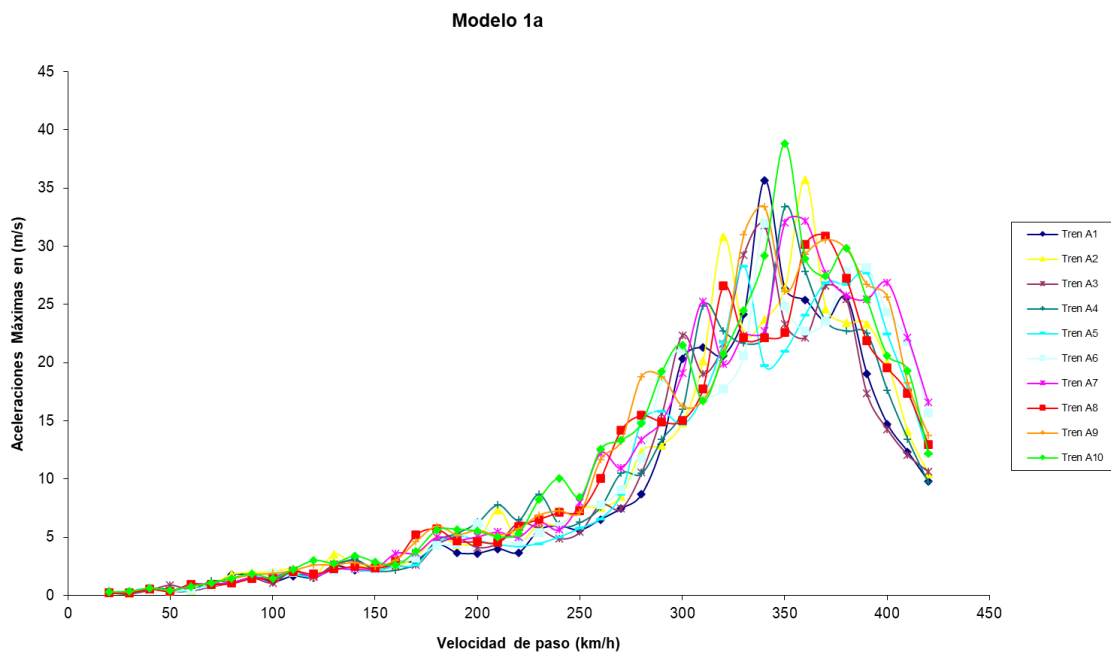


Figura 124. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes verticales

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 350 km/h, cuyo valor es de 38.86 m/s<sup>2</sup>.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3.2 MODELO 1b: Dos arcos paralelos y tirantes en abanico

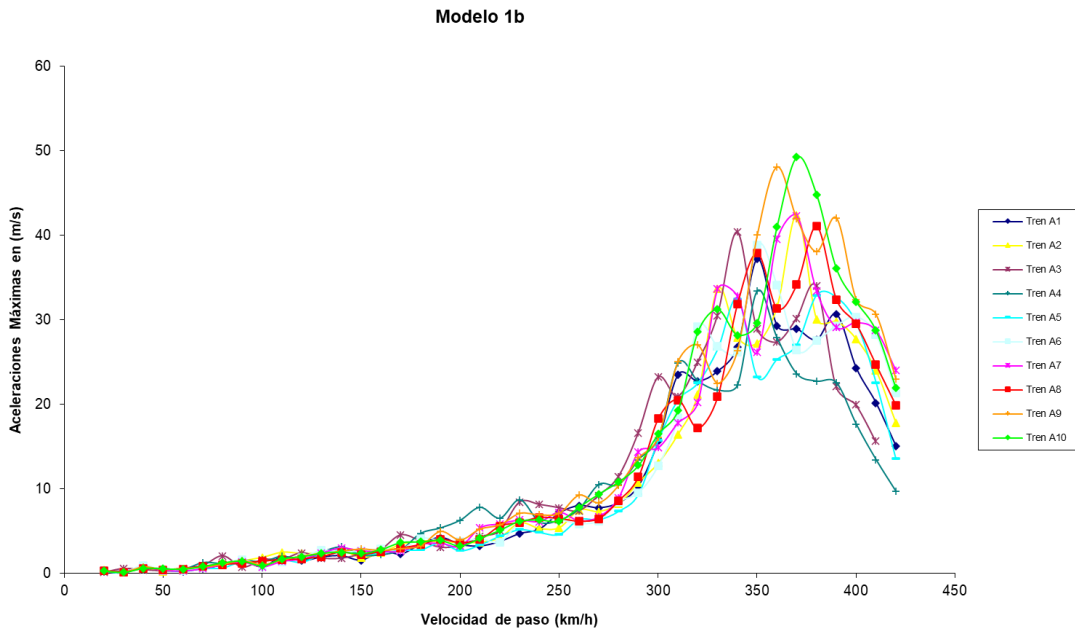


Figura 125. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes en abanico

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a los 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de  $49.25 \text{ m/s}^2$ .

El tren A10 en concreto está formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3.3 MODELO 1c: Dos arcos paralelos y tirantes en celosía

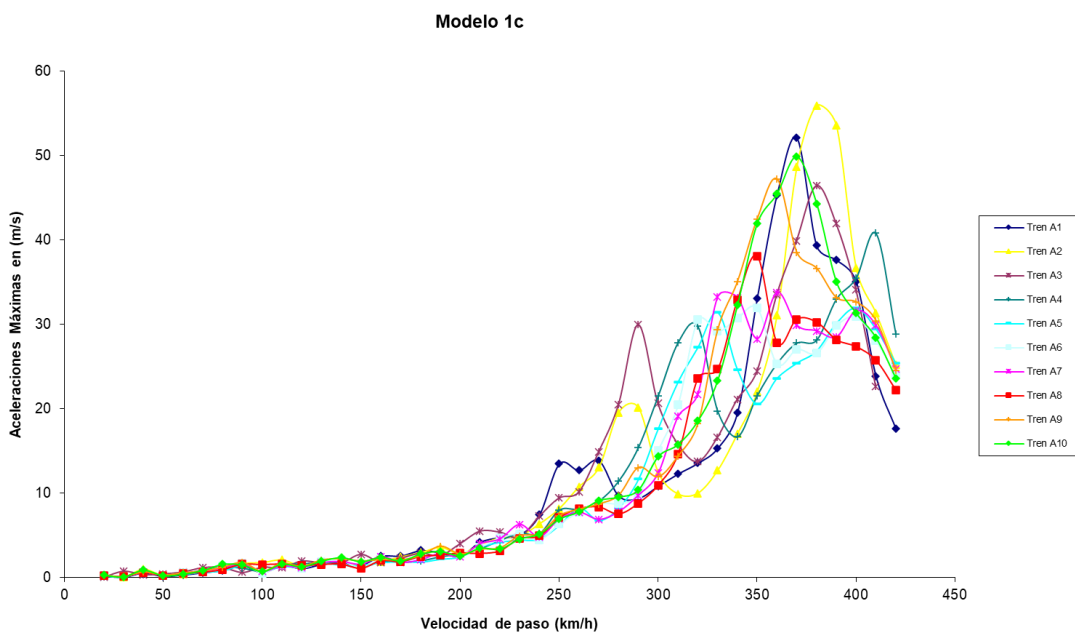


Figura 126. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes en celosía

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a los 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 380 km/h, cuyo valor es de  $55.94 \text{ m/s}^2$ .

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.50 metros.

#### 4.3.4 MODELO 1d: Dos arcos paralelos y tirantes cruzados

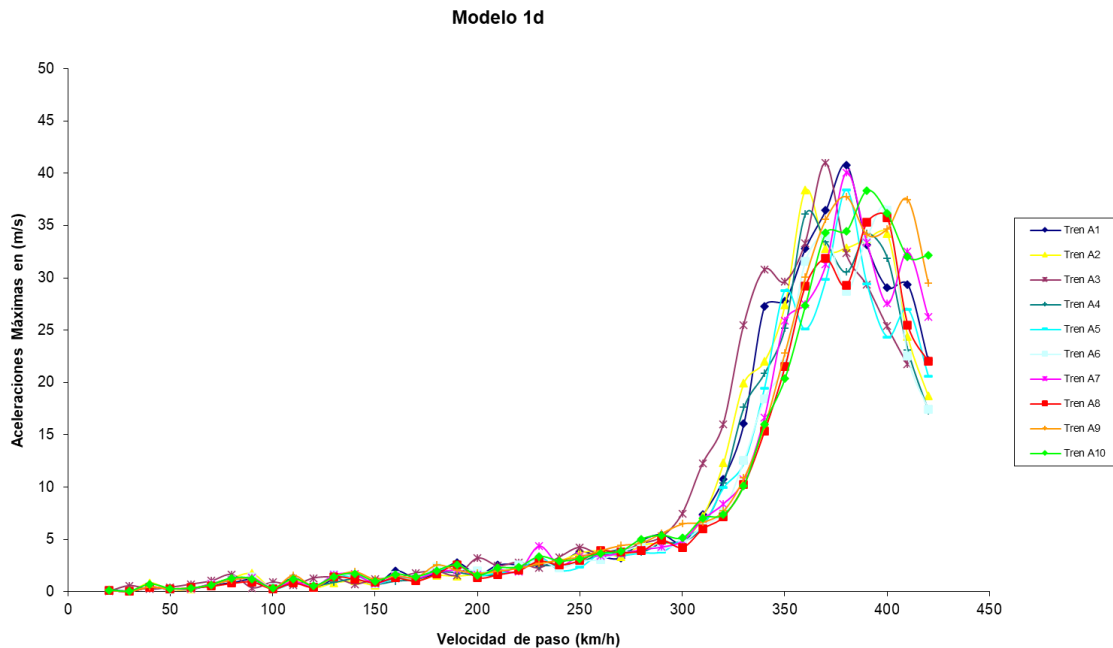


Figura 127. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos paralelos y tirantes cruzados

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a los 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A3 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de  $90.48 \text{ m/s}^2$ . A destacar un valor muy similar que se obtiene para el modelo de tren A1 a 380 km/h.

El tren A3 en concreto esta formado por 16 vagones intermedios con una longitud de 20 metros y carga de 180 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

El tren A1 en concreto esta formado por 18 vagones intermedios con una longitud de 18 metros y carga de 170 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3.5 MODELO 2a: Dos arcos cerrados y tirantes verticales

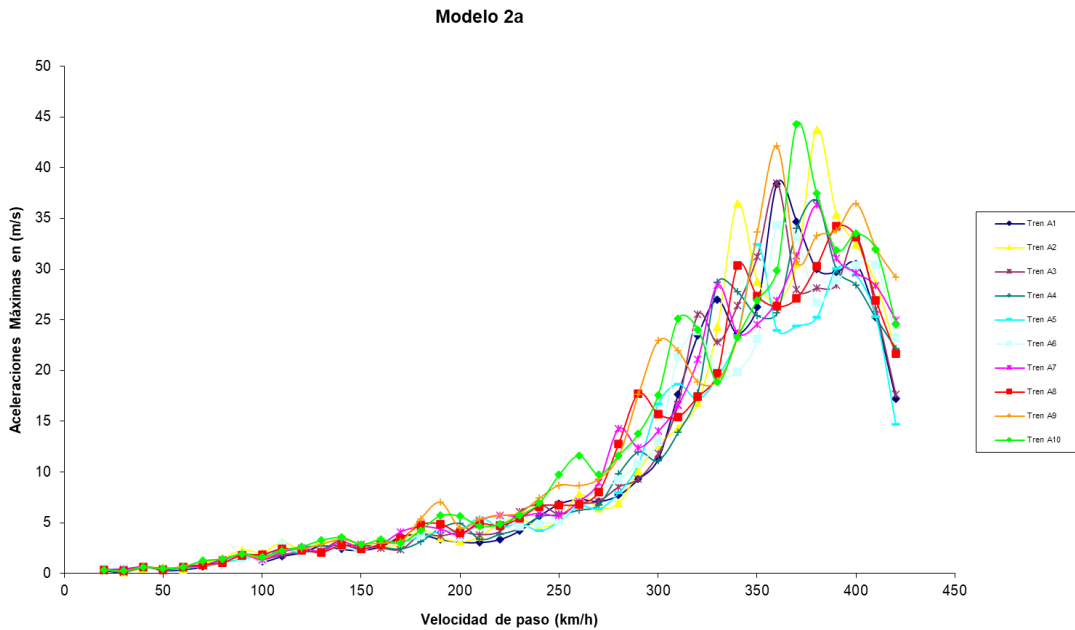


Figura 128. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes verticales

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de  $44.32 \text{ m/s}^2$ .

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3.6 MODELO 2b: Dos arcos cerrados y tirantes en abanico

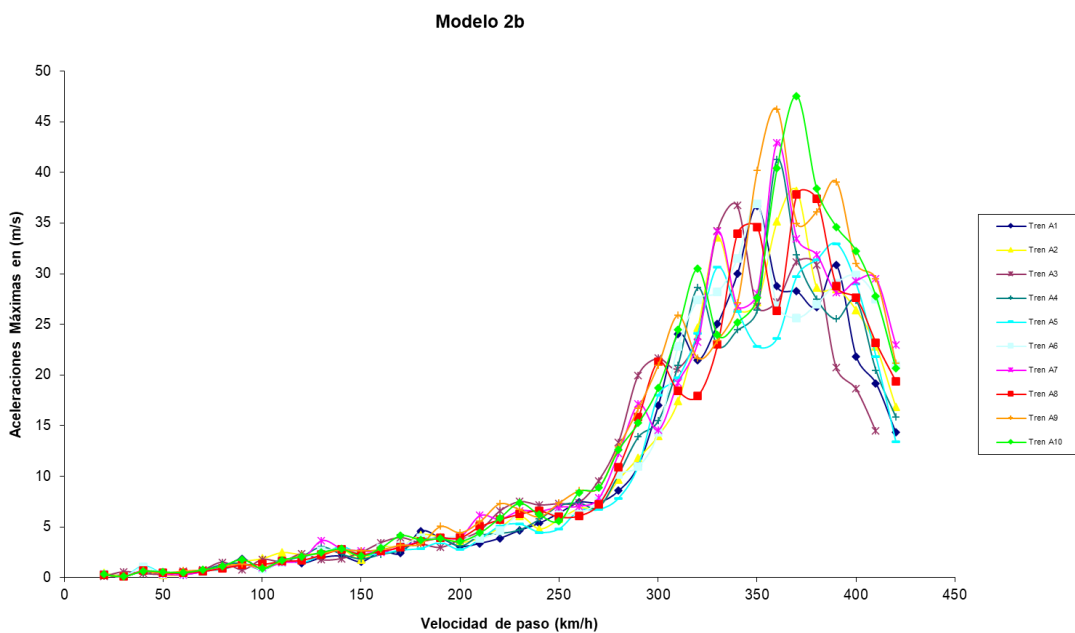


Figura 129. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes en abanico

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de 47.54 m/s<sup>2</sup>.

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.3.7 MODELO 2c: Dos arcos cerrados y tirantes en celosía

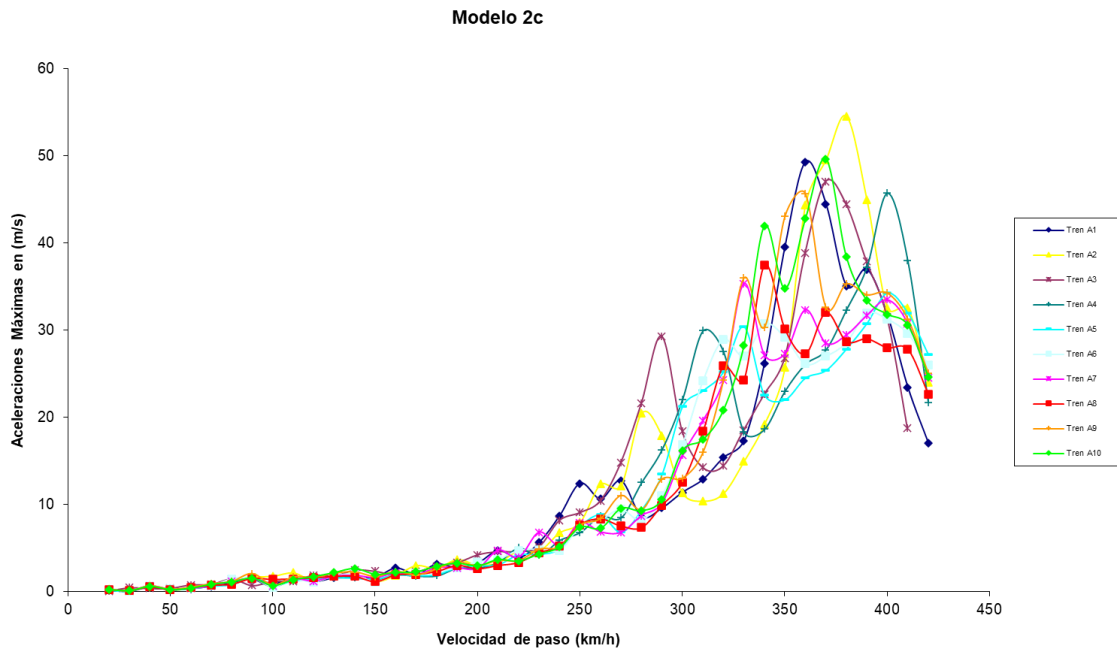


Figura 130. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes en celosía

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 380 km/h, cuyo valor es de 54.57 m/s<sup>2</sup>.

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.5 metros.

### 4.3.8 MODELO 2d: Dos arcos cerrados y tirantes cruzados

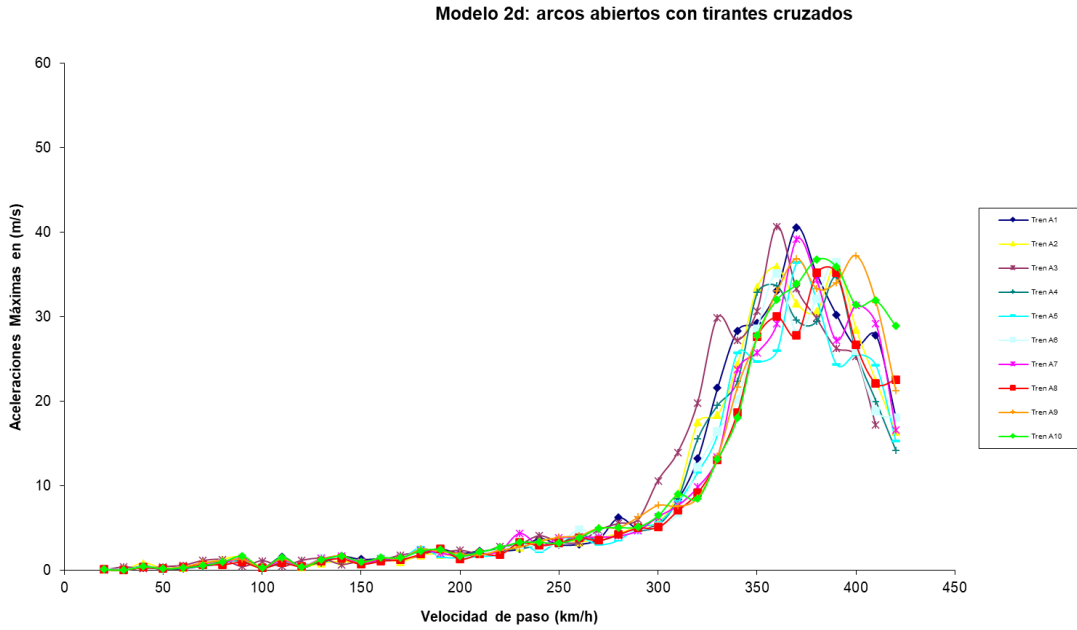


Figura 131. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos cerrados y tirantes cruzados

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A3 a su paso a 360 km/h, cuyo valor es de  $40.67 \text{ m/s}^2$ . A destacar un valor muy similar que obtenemos por el tren modelo A1 a su paso a 370 km/h.

El tren A3 en concreto esta formado por 16 vagones intermedios con una longitud de 20 metros y carga de 180 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3.9 MODELO 3a: Dos arcos abiertos y tirantes verticales

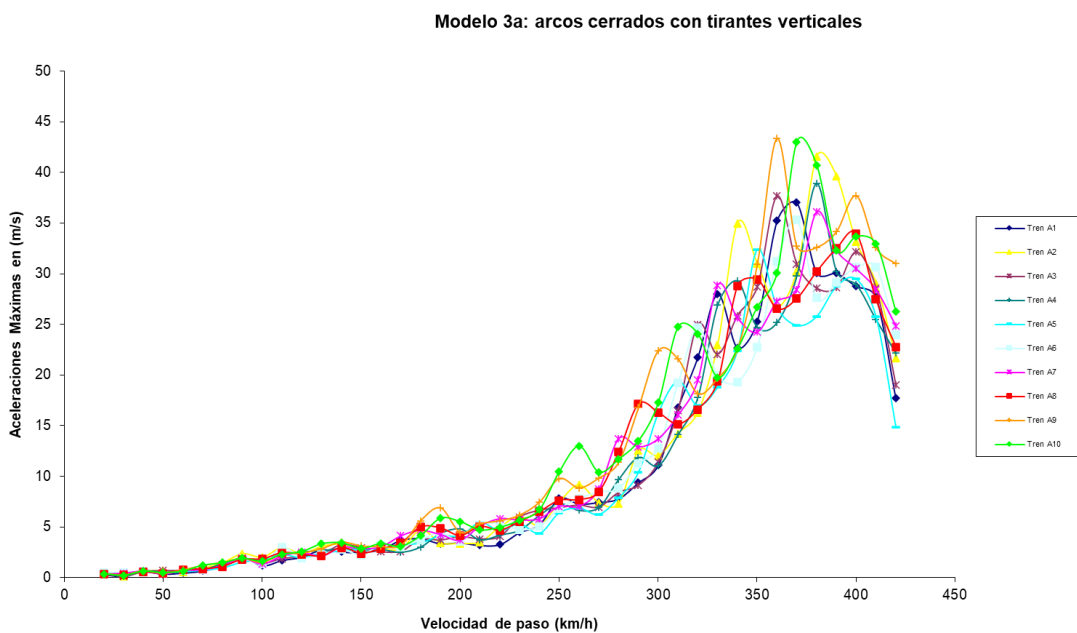


Figura 132. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes verticales



En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 360 km/h, cuyo valor es de  $43.38 \text{ m/s}^2$ . A destacar un valor muy similar que obtenemos por el tren modelo A10 a su paso a 370 km/h.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.3.10 MODELO 3b: Dos arcos abiertos y tirantes en abanico

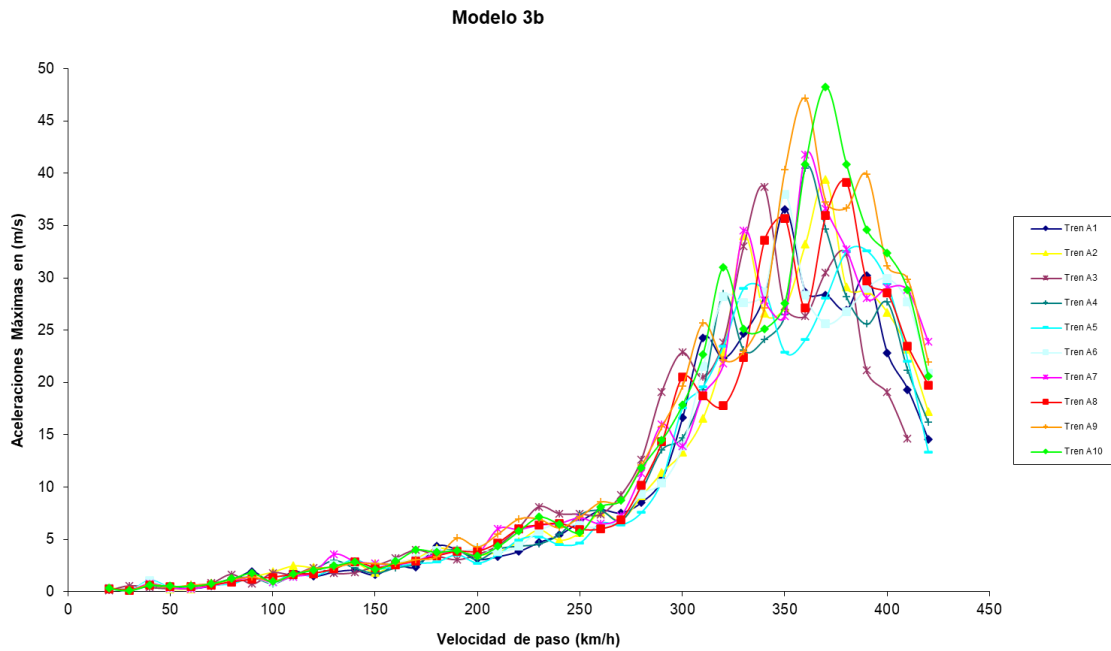


Figura 133. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes en abanico

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de  $48.21 \text{ m/s}^2$ .

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

### 4.3.11 MODELO 3c: Dos arcos abiertos y tirantes en celosía

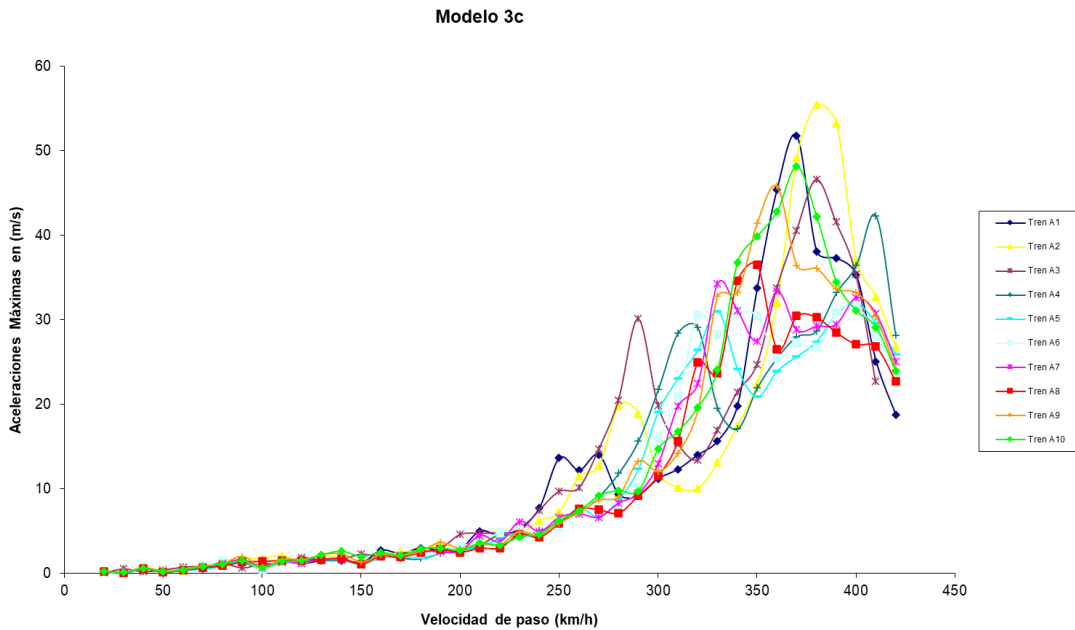


Figura 134. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes en celosía

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 380 km/h, cuyo valor es de 55.43 m/s<sup>2</sup>.

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.50 metros.

### 4.3.12 MODELO 3d: Dos arcos abiertos y tirantes cruzados

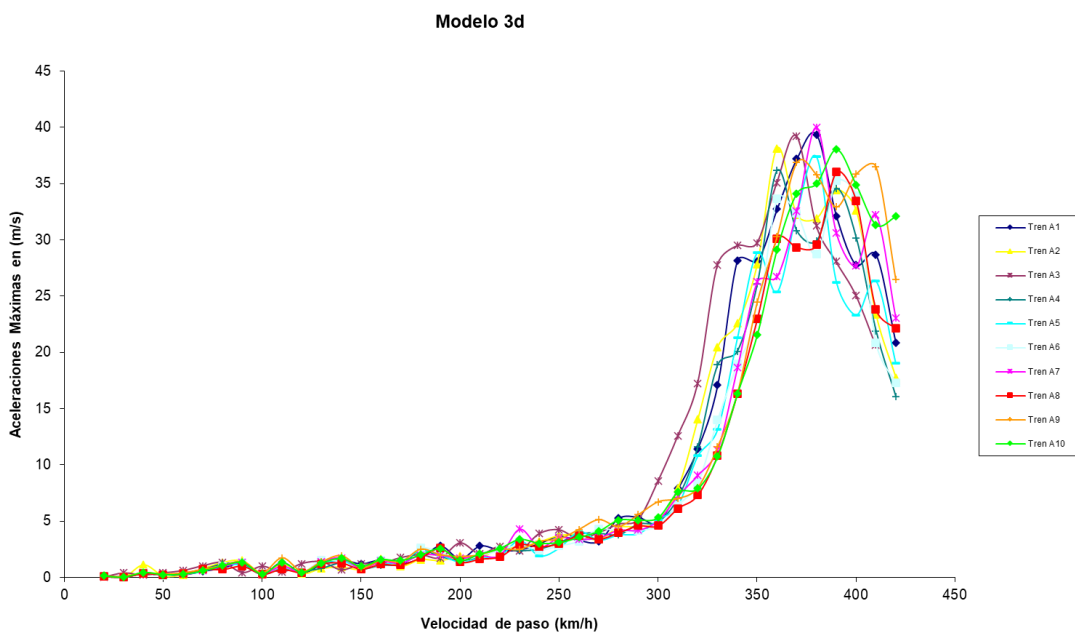


Figura 135. Resultados aceleraciones Modelo dos arcos abiertos y tirantes cruzados

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 300 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A7 a su paso a 380 km/h, cuyo valor es de  $40.02 \text{ m/s}^2$ . A destacar un valor muy similar que obtenemos por el tren modelo A1 a su paso a 380 km/h y para el modelo de tren A3 a 370 km/h.

El tren A7 en concreto esta formado por 13 vagones intermedios con una longitud de 24 metros y carga de 190 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

El tren A1 en concreto esta formado por 18 vagones intermedios con una longitud de 18 metros y carga de 170 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

El tren A3 en concreto esta formado por 16 vagones intermedios con una longitud de 20 metros y carga de 180 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.3.13 MODELO 4a: Un arco centrado y tirantes verticales

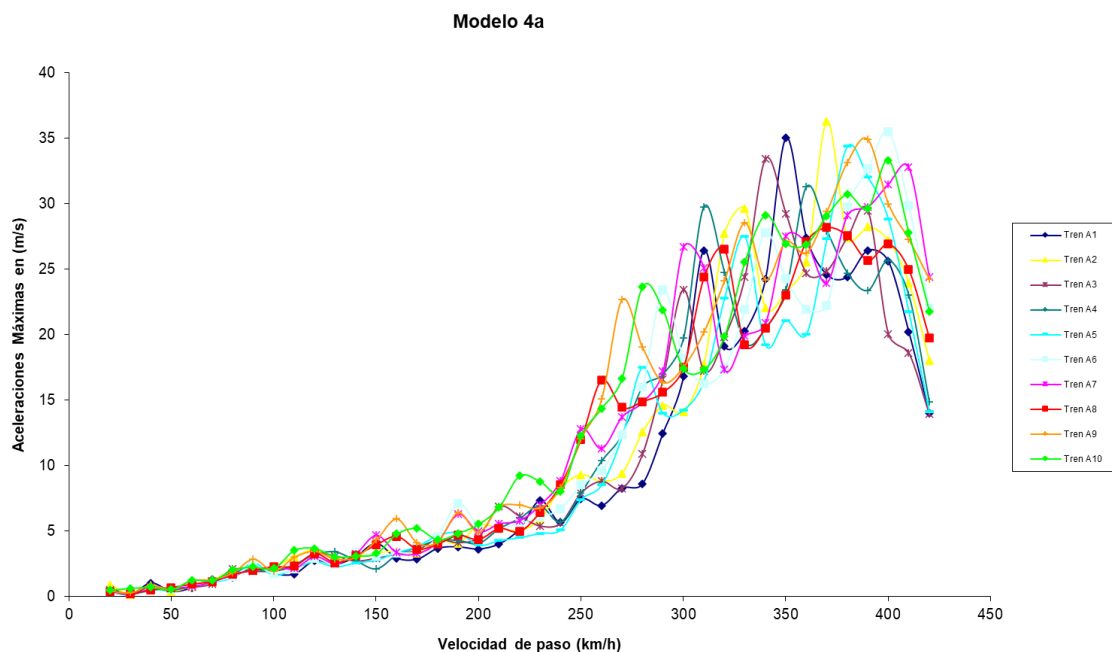


Figura 136. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes verticales

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 300 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de  $36.30 \text{ m/s}^2$ .

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.5 metros.

#### 4.3.14 MODELO 4b: Un arco centrado y tirantes en abanico

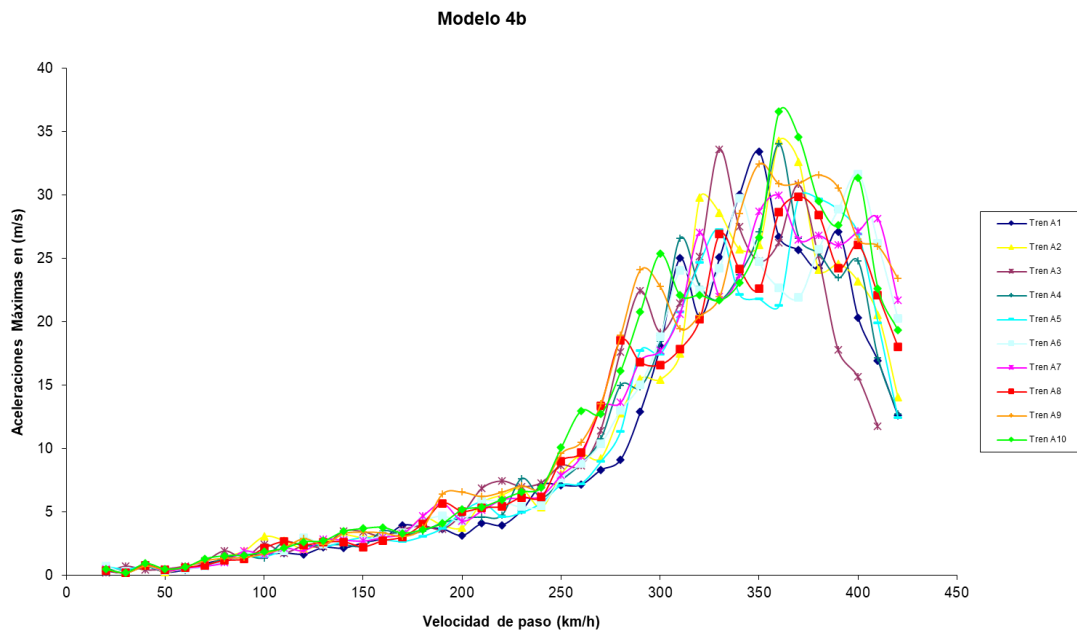


Figura 137. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes en abanico

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A10 a su paso a 360 km/h, cuyo valor es de  $36.58 \text{ m/s}^2$ .

El tren A10 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.3.15 MODELO 4c: Un arco centrado y tirantes en celosía

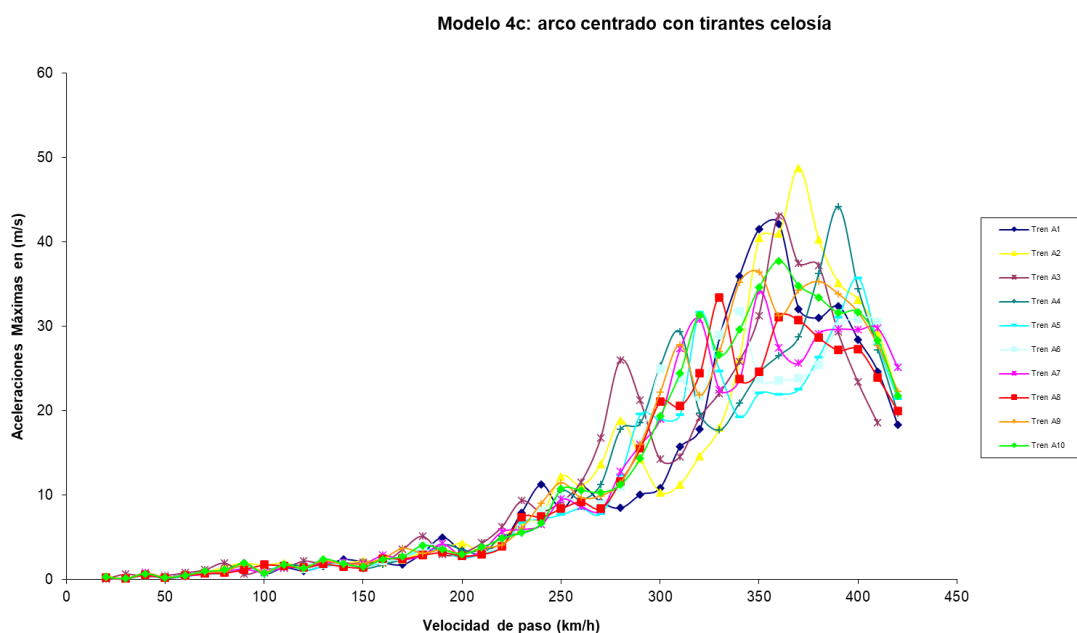


Figura 138. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes en celosía

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 370 km/h, cuyo valor es de 48.78 m/s<sup>2</sup>.

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.5 metros.

### 4.3.16 MODELO 4d: Un arco centrado y tirantes cruzados

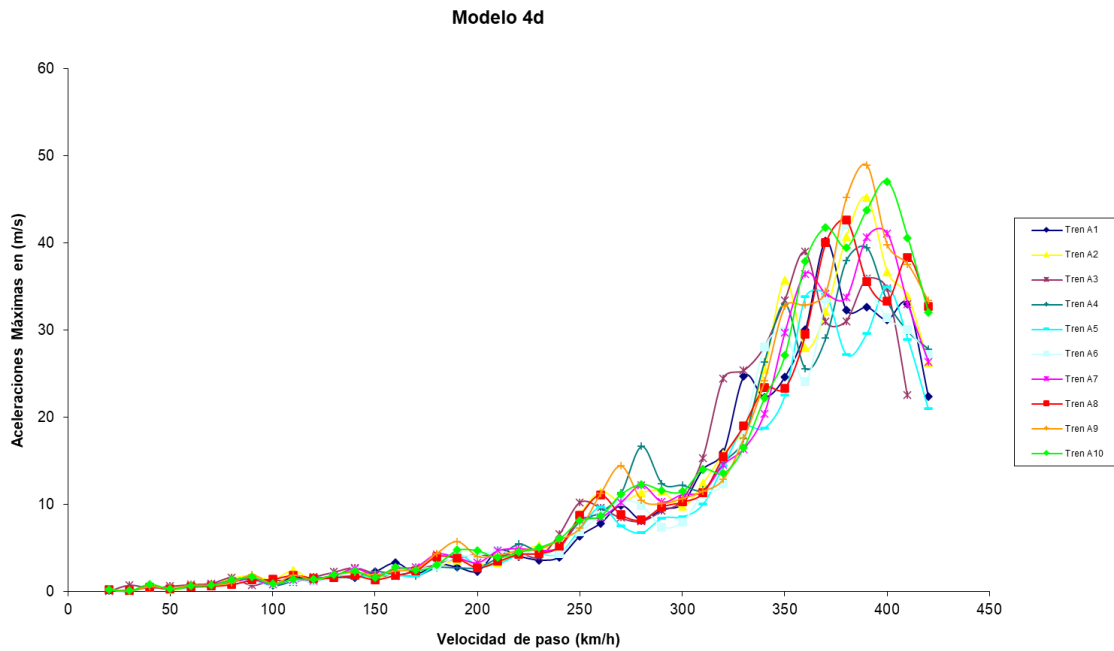


Figura 139. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado y tirantes cruzados

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A9 a su paso a 390 km/h, cuyo valor es de 48.95 m/s<sup>2</sup>.

El tren A9 en concreto esta formado por 11 vagones intermedios con una longitud de 26 metros y carga de 210 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

#### 4.3.17 MODELO 5a: Un solo arco centrado, tirantes verticales y tablero con sección en cajón

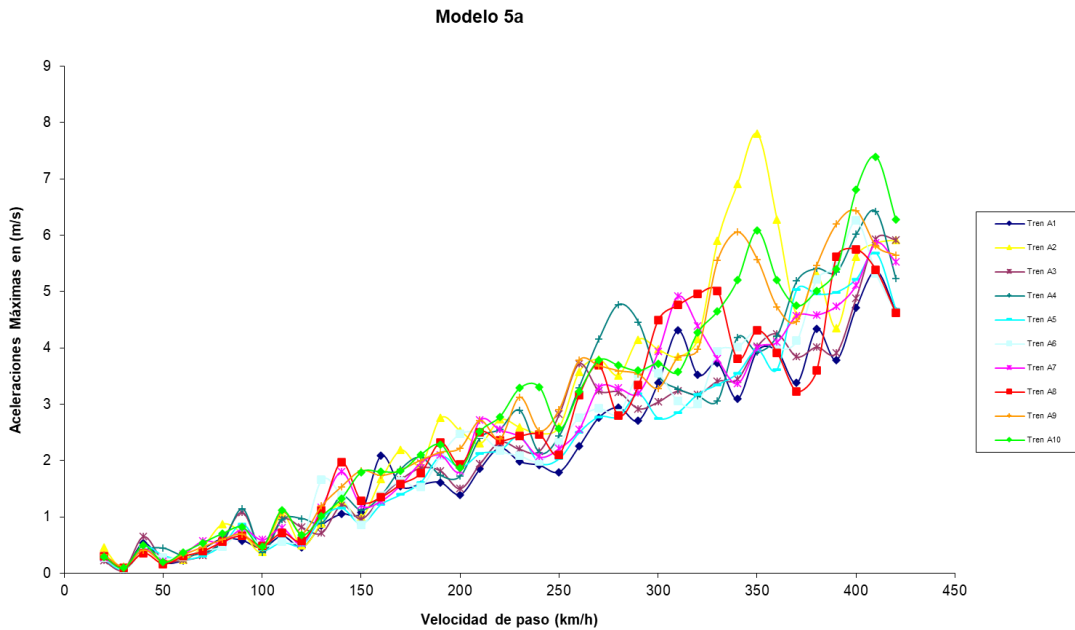


Figura 140. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes verticales

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 400 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 350 km/h, cuyo valor es de  $7.99 \text{ m/s}^2$ .

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.50 metros.

#### 4.3.18 MODELO 5b: Un solo arco centrado, tirantes en abanico y tablero con sección en cajón

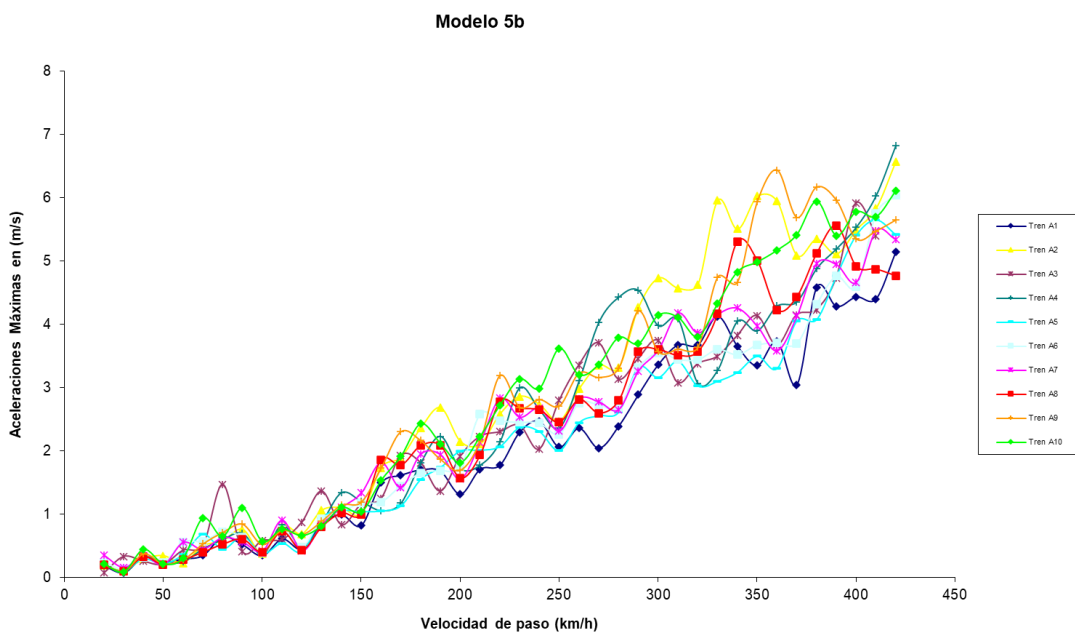


Figura 141. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes en abanico

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 400 y 420 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A4 a su paso a 420 km/h, cuyo valor es de 6.82 m/s<sup>2</sup>.

El tren A4 en concreto esta formado por 15 vagones intermedios con una longitud de 21 metros y carga de 190 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3 metros.

**4.3.19 MODELO 5c: Un solo arco centrado, tirantes en celosía y tablero con sección en cajón**

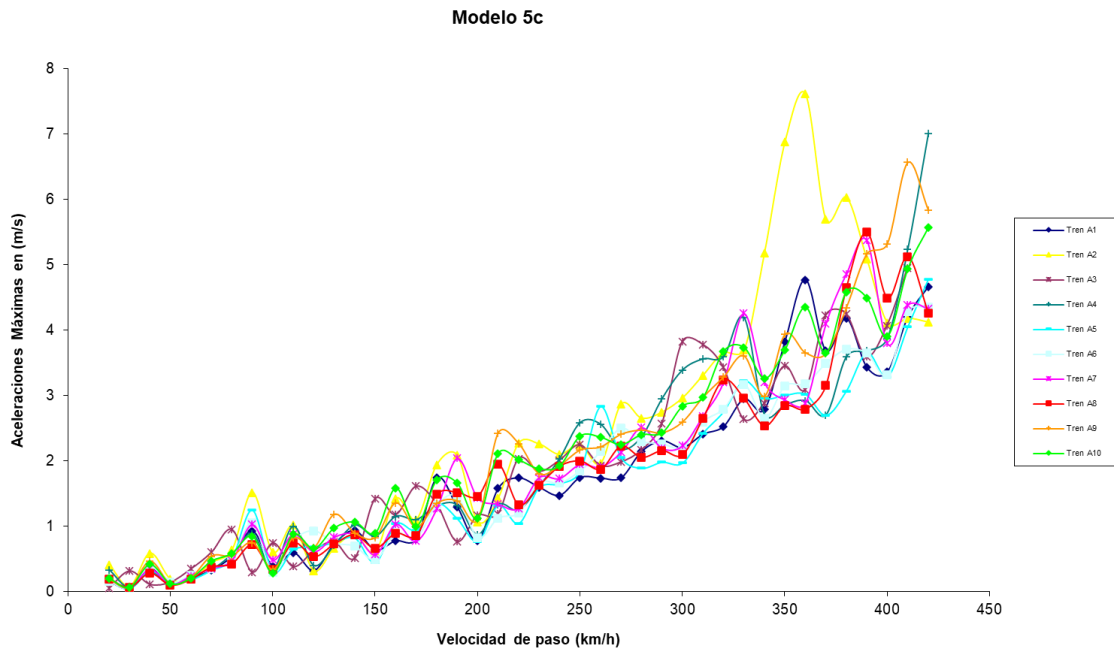


Figura 142. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes en celosía

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 420 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 360 km/h, cuyo valor es de 7.61 m/s<sup>2</sup>.

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.50 metros.



### 4.3.20 MODELO 5d: Un solo arco centrado, tirantes cruzados y tablero con sección en cajón

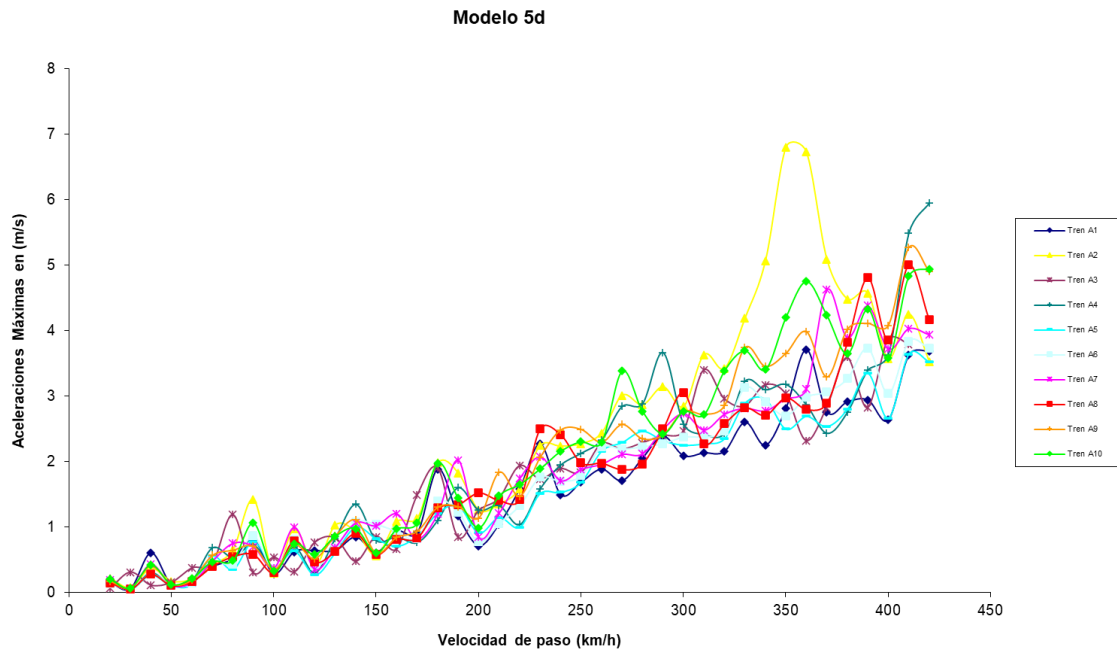


Figura 143. Resultados aceleraciones Modelo un arco centrado con tablero cajón y tirantes cruzados

En este modelo observamos que las mayores aceleraciones verticales se producen para velocidades en torno a 350 y 420 km/h, en concreto el mayor valor lo produce el modelo de tren A2 a su paso a 350 km/h, cuyo valor es de  $6.80 \text{ m/s}^2$ .

El tren A2 en concreto esta formado por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros y carga de 200 kN cada uno, con una separación entre ejes de las ruedas de 3.50 metros.

## 4.4. RESULTADOS: COEFICIENTE DE IMPACTO

El coeficiente estático representa la relación entre la sollicitación que provoca una misma carga de forma dinámica frente a la que solicitaría de forma estática, por ello mientras más nos alejemos del valor unidad, más repercusión tiene dicha carga y será mas importante su estudio y consideración como fuerza dinámica para obtener unos resultados consistentes.

### 4.4.1 Modelos 1: Dos arcos paralelos

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coefficiente de impacto $\phi$
1a	436.999	144.46	3.025
1b	226.233	85.945	2.632
1c	85.812	17.271	4.969
1d	59	13.524	4.363

Tabla 9. Resultados Coeficiente de impacto Modelo dos arcos paralelos

Para este primer modelo, dos arcos paralelos, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

#### 4.4.2 Modelos 2: Dos arcos cerrados

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coefficiente de impacto $\phi$
2a	452.421	148.798	3.041
2b	237.237	90.9	2.610
2c	94.919	18.434	5.149
2d	62.192	14.871	4.182

Tabla 10. Resultados Coeficiente de impacto Modelo dos arcos cerrados

Para este modelo, dos arcos cerrados, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

#### 4.4.3 Modelos 3: Dos arcos abiertos

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coefficiente de impacto $\phi$
3a	453.375	147.664	3.070
3b	235.142	91.275	2.576
3c	87.227	18.098	4.820
3d	60.744	14.522	4.183

Tabla 11. Resultados Coeficiente de impacto Modelo dos arcos abiertos

Para este modelo, dos arcos abiertos, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

#### 4.4.4 Modelos 4: Un arco centrado

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coefficiente de impacto $\phi$
4a	655.907	231.894	2.828
4b	402.488	165.891	2.426
4c	99.433	30.532	3.257
4d	96.111	30.06	3.197

Tabla 12. Resultados Coeficiente de impacto Modelo un arco centrado

Para este modelo, un arco centrado, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

#### 4.4.5 Modelos 5: Un arco centrado con tablero sección cajón

Modelo	Desplazamiento Máximo	Desplazamiento Estático	Coefficiente de Impacto $\phi$
5a	136.516	51.144	2.669
5b	134.032	65.642	2.042
5c	32.802	18.429	1.780
5d	25.724	18.132	1.419

Tabla 13. Resultados Coeficiente de impacto Modelo un arco centrado tablero con sección cajón

Para este último modelo, arco centrado con sección de tablero de tipo cajón, resulta lo contrario que en los casos anteriores, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores

de desplazamientos más bajos, y a su vez unos coeficientes de impacto menores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico).

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento bastante similar por lo general, para las diferentes disposiciones de tirantes dentro de un mismo modelo de arco, es decir, si agrupamos los modelos en función de la disposición de sus tirantes, por ejemplo: 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, obtendríamos valores casi idénticos del coeficiente de impacto.

Observamos que el modelo con el que obtenemos los valores más bajos corresponde al modelo 5, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que es donde obtenemos los resultados más desfavorables de los 5 modelos.

Esto quiere decir, que en el modelo 5 de arco centrado con sección del tablero de tipo cajón, no produce una gran diferencia la sollicitación dinámica y estática de una misma carga, como si ocurre para los 4 primeros modelos de arco.

Como tendencia general, en función de los valores de los coeficientes de impacto para los primeros cuatro tipos de modelos 1, 2, 3 y 4, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados), se observa una mayor sensibilidad en cuanto a la sollicitación que produce una carga dinámica frente a la misma carga de forma estática, ya que obtenemos una relación, coeficiente de impacto, mayor que para los casos de tirantes a y b.



# 5 ESTUDIO DE LOS RESULTADOS

En este capítulo vamos a recoger las diferentes afirmaciones que hemos obtenido de los resultados que se muestran en el capítulo anterior, relativo a todas las diferentes variables que hemos estudiado y los diferentes análisis que hemos realizado..

Se incluyen unas conclusiones a modo de resumen que engloben todos los resultados tanto cuantitativos como de análisis cualitativo que hemos obtenido, de forma que queden bien identificadas las ideas que estamos tratando con relación a como se comporta cada uno de los modelos.

## 5.1. MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES

### 5.1.1 En función de la tipología de los arcos

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 1a: Tirantes verticales	Modelo 1b: Tirantes en abanico	Modelo 1c: Tirantes en celosía	Modelo 1d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.89683e4	2.29799e4	2.29936e4	2.33074e4
1era frec. Natural	3.04 s	2.06 s	1.68 s	1.69 s
2nda frec. Natural	1.67 s	1.70 s	0.63 s	0.63 s
3era frec. natural	1.46 s	1.52 s	0.60 s	0.61 s

Tabla 14. Frecuencias naturales modelos de dos arcos paralelos

En primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 1a (tirantes verticales) y 1b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares, el primero y el tercero provocan desplazamiento vertical del tablero y el segundo no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero. También tal y como se observa en la tabla se dan para valores de periodo parecidos. Para los modelos 1c (tirantes en celosía) y 1d (tirantes cruzados) también se observa un comportamiento similar, ya que tenemos un primer modo que no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero, pero si que coinciden los modos 2 y 3 del modelo 1c y 1d respectivamente. A parte de los valores del periodo de las frecuencias naturales que son casi iguales.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 2a: Tirantes verticales	Modelo 2b: Tirantes en abanico	Modelo 2c: Tirantes en celosía	Modelo 2d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.28746e4	2.28851e4	2.28988e4	2.32117e4
1era frec. Natural	2.82 s	2.06 s	1.41 s	1.43 s
2nda frec. Natural	1.42 s	1.54 s	0.67 s	0.66 s
3era frec. natural	1.36 s	1.45 s	0.64 s	0.61 s

Tabla 15. Frecuencias naturales modelos de dos arcos cerrados

Tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 2a (tirantes verticales) y 2b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares aunque con un orden distinto, tenemos dos modos que provocan desplazamiento vertical del tablero y uno es la continuación del otro y otro modo de vibración no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero. También tal y como se observa en la tabla se dan para valores de periodo parecidos. Para los modelos 2c (tirantes en celosía) y 2d (tirantes

cruzados) también se observa un comportamiento similar, ya que tenemos un primer modo que no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero, un segundo modo similar que provoca el desplazamiento vertical del tablero, y un tercer modo diferente aunque si ampliasemos el rango de estudio, podemos comprobar que el siguiente modo de vibración que excita el paso del tren sobre la estructura coincide en ambos modelos con el mostrado para el modo 3 del modelo 2c.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 3a: Tirantes verticales	Modelo 3b: Tirantes en abanico	Modelo 3c: Tirantes en celosía	Modelo 3d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.30252e4	2.30357e4	2.30494e4	2.33444e4
1era frec. Natural	2.84 s	2.07 s	1.76 s	1.75 s
2nda frec. Natural	1.76 s	1.79 s	0.67 s	1.53 s
3era frec. natural	1.36 s	1.54 s	0.64 s	0.65 s

Tabla 16. Frecuencias naturales modelos de dos arcos abiertos

Tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 3a (tirantes verticales) y 3b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares, tenemos dos modos que provocan desplazamiento vertical del tablero y uno es la continuación del otro y otro modo de vibración no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero. También tal y como se observa en la tabla se dan para valores de periodo parecidos. Para los modelos 3c (tirantes en celosía) y 3d (tirantes cruzados) también se observa un comportamiento similar, ya que tenemos un primer modo que no viene excitado por la acción del tren sobre el tablero, un segundo modo similar que provoca el desplazamiento vertical del tablero, y un tercer modo diferente aunque si ampliasemos el rango de estudio, podemos comprobar que el siguiente modo de vibración que excita el paso del tren sobre la estructura coincide en ambos modelos con el mostrado para el modo 3 del modelo 3c.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 4a: Tirantes verticales	Modelo 4b: Tirantes en abanico	Modelo 4c: Tirantes en celosía	Modelo 4d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.19749e4	2.19671e4	2.20056e4	2.23258e4
1era frec. Natural	3.38 s	2.58 s	1.19 s	1.44 s
2nda frec. Natural	2.15 s	2.02 s	0.85 s	0.83 s
3era frec. natural	1.62 s	1.80 s	0.72 s	0.60 s

Tabla 17. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado

Tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 4a (tirantes verticales) y 4b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares aunque en distinto orden, tenemos dos modos que provocan desplazamiento vertical del tablero y uno es la continuación del otro y otro modo de vibración provoca la rotación del tablero a lo largo del eje longitudinal. Tal y como se observa en la tabla los valores de periodo que obtenemos no son tan parecido como para modelos anteriores. Para los modelos 4c (tirantes en celosía) y 4d (tirantes cruzados) se observa un comportamiento mas parejo, ya que tenemos un primer modo que excita la rotación del tablero alrededor del eje longitudinal del puente, y el segundo y tercer modo corresponden uno a la continuación del otro que provocan desplazamiento vertical del puente. Cuando me refiero a que son uno continuación del otro es en referencia a que en el segundo modo no tenemos ningun nodo o punto nulo de desplazamiento y para el tercero tenemos uno, para sollicitaciones de desplazamiento vertical del tablero. Se puede observar en la tabla que se dan para valores similares.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 5a: Tirantes verticales	Modelo 5b: Tirantes en abanico	Modelo 5c: Tirantes en celosía	Modelo 5d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.01198e4	2.01251e4	1.93820e4	1.93926e4
1era frec. Natural	1.58 s	1.61 s	1.59 s	1.59 s
2nda frec. Natural	1.50 s	1.43 s	0.78 s	0.79 s
3era frec. natural	1.15 s	0.70 s	0.68 s	0.77 s

Tabla 18. Frecuencias naturales modelos de un arco centrado con tablero sección en cajón

Tenemos en primer lugar un comportamiento parecido para los modelos 5a (tirantes verticales) y 5b (tirantes en abanico), donde los modos que se excitan para las tres primeras frecuencias son similares aunque en distinto orden. Un primer modo de vibración que no viene excitado por el paso del tren, y los siguientes dos modos de vibración que provocan el desplazamiento vertical del tablero, de forma que para el primer modelo se da primero la excitación de rotación sobre un eje perpendicular al eje longitudinal del tablero y después el desplazamiento vertical, siendo alrevés para el modelo 5b. Para los modelos 5c (tirantes en celosía) y 5d (tirantes cruzados) se observa un comportamiento mas parejo, ya que tenemos un primer modo que excita la rotación del tablero alrededor del eje longitudinal del puente, y el segundo y tercer modo corresponden uno a la continuación del otro que provocan desplazamiento vertical del puente. Cuando me refiero a que son uno continuación del otro es en referencia a que en el segundo modo no tenemos ningun nodo o punto nulo de desplazamiento y para el tercero tenemos uno. Se puede observar en la tabla que se dan para valores similares. Dado que estamos analizando los tres primeros modos, en el caso del modelo 5d, aparece como tercer modo vibración uno que no provoca desplazamiento del tablero, si seguimos avanzando encontraremos uno similar al tercer modo de vibración del modelo 5c.

### 5.1.2 En función de la disposición de los tirantes

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 1a: Tirantes verticales	Modelo 2a: Tirantes verticales	Modelo 3a: Tirantes verticales	Modelo 4a: Tirantes verticales	Modelo 5a: Tirantes verticales
Peso (kN)	2.89683e4	2.28746e4	2.30252e4	2.19749e4	2.01198e4
1era frec. Natural	3.04 s	2.82 s	2.84 s	3.38 s	1.58 s
2nda frec. Natural	1.67 s	1.42 s	1.76 s	2.15 s	1.50 s
3era frec. natural	1.46 s	1.36 s	1.36 s	1.62 s	1.15 s

Tabla 19. Frecuencias naturales modelos tirantes verticales

Observando en función de las disposiciones de tirantes, tenemos que para este primer modelo de tirantes verticales, se dan los mismos modos de vibración para los 4 primeros modelos de forma que se obtienen valores similares de las frecuencias naturales, en concreto el periodo es lo que estamos analizando. Observamos que para el modelo 5 se obtienen valores diferentes debido a que el cambio es la sección del tablero influye de forma significativa frente al cambio en la disposición de los tirantes.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 1b: Tirantes en abanico	Modelo 2b: Tirantes en abanico	Modelo 3b: Tirantes en abanico	Modelo 4b: Tirantes en abanico	Modelo 5b: Tirantes en abanico
Peso (kN)	2.29799e4	2.28851e4	2.30357e4	2.19671e4	2.01251e4
1era frec. Natural	2.06	2.06 s	2.07 s	2.58 s	1.61 s
2nda frec. Natural	1.70	1.54 s	1.79 s	2.02 s	1.43 s
3era frec. natural	1.52	1.45 s	1.54 s	1.80 s	0.70 s

Tabla 20. Frecuencias naturales modelos tirantes en abanico

Tenemos que para este segundo modelo de tirantes en abanico, coinciden el primer modo de vibración para los 4 primeros modelos, el segundo modo de vibración de los modelos 1b y 3b coincide con el tercero de los modelos 2b y 4b, así como el segundo modo de vibración de los modelos 2b y 4b coincide con el segundo



modo de vibración de los modelos 1b y 3b, junto con los valores de sus frecuencias naturales que varían un poco en el modelo 4, en concreto el periodo es lo que estamos analizando. Observamos que para el modelo 5 se obtienen valores diferentes debido a que el cambio es la sección del tablero influye de forma significativa frente al cambio en la disposición de los tirantes.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 1c: Tirantes en celosía	Modelo 2c: Tirantes en celosía	Modelo 3c: Tirantes en celosía	Modelo 4c: Tirantes en celosía	Modelo 5c: Tirantes en celosía
Peso (kN)	2.29936e4	2.28988e4	2.30494e4	2.20056e4	1.93820e4
1era frec. Natural	1.68	1.41 s	1.76 s	1.19 s	1.59 s
2nda frec. Natural	0.63	0.67 s	0.67 s	0.85 s	0.78 s
3era frec. natural	0.60	0.64 s	0.64 s	0.72 s	0.68 s

Tabla 21. Frecuencias naturales modelos tirantes en celosía

En este tercer modelo de tirantes en celosía, coinciden para los modos de vibración para todos ellos, de forma que el primero se corresponde a la rotación a lo largo del eje longitudinal del puente, y el segundo y el tercer modo provocan el desplazamiento vertical del tablero, que viene provocado por el paso del tren sobre la estructura.

Modelo (disposición de tirantes)	Modelo 1d: Tirantes cruzados	Modelo 2d: Tirantes cruzados	Modelo 3d: Tirantes cruzados	Modelo 4d: Tirantes cruzados	Modelo 5d: Tirantes cruzados
Peso (kN)	2.33074e4	2.32117e4	2.33444e4	2.23258e4	1.93926e4
1era frec. Natural	1.69	1.43 s	1.75 s	1.44 s	1.59 s
2nda frec. Natural	0.63	0.66 s	1.53 s	0.83 s	0.79 s
3era frec. natural	0.61	0.61 s	0.65 s	0.60 s	0.77 s

Tabla 22. Frecuencias naturales modelos de tirantes cruzados

Tenemos que para este cuarto modelo de tirantes cruzados, coinciden el primer modo de vibración para todos los modelos, que no corresponde a un modo que venga excitado por el paso del tren ya que no se produce desplazamiento del tablero. En cuanto al segundo y tercer modo se dan de forma general el desplazamiento vertical del tablero para el segundo modo y un tercer modo que no viene excitado por el paso del tren, a excepción del modelo 4d (un solo arco centrado con tirantes cruzados) que si que dicho tercer modo provoca desplazamiento vertical del tablero.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento similar para las disposiciones de tirantes verticales junto con la disposición en abanico. De modo que, para los 4 primeros modelos de diferentes tipologías de arco, coincide que para la disposición de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) se suele excitar primeramente la rotación sobre el eje Y, seguido de una frecuencia que no viene excitada por el paso del tren sobre la estructura y como tercer modo de vibración tenemos el desplazamiento vertical del tablero.

Para las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) tenemos un comportamiento parecido por parejas al igual que sucede para las otras dos disposiciones de tirantes. Se da una situación similar esta vez para los 5 primeros modelos, de forma que el primer modo de vibración no viene excitado por el paso del tren, no provoca desplazamiento del tablero, seguido del segundo modo de vibración que provoca el desplazamiento vertical de la estructura y un tercer modo de vibración que para el caso de los tirantes tipo c (tirantes en celosía) también viene excitado por el paso del tren y para el caso de los tirantes tipo d (tirantes cruzados) no viene excitado por el paso del mismo. Aclarar que en los modelos de tipo 1 (dos arcos paralelos) para los modos de vibración 2 y 3 tenemos un comportamiento diferente al resto que no sigue esta dinámica que acabamos de comentar.

Observamos que el modelo 5, para las disposiciones de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) tienen como primer modo de vibración, la excitación de rotación sobre el eje longitudinal del tablero, que afecta al arco y no viene provocado por el paso del tren sobre la estructura, distinto a lo que hemos observado en el resto de los modelos, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que son diferentes. Para los siguientes modos de vibración si que vienen excitados por el paso del tren ya que tenemos desplazamiento vertical del tablero.

En lo relativo a los valores de frecuencias naturales, sucede algo parecido ya que si que tenemos valores similares diferenciados por parejas. Para las disposiciones de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) se dan valores parejos para aquellos modos de vibración que coinciden dentro del mismo modelo de tipología de arco.

En el caso de las disposiciones de tirantes tipo c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) si que tenemos valores similares de forma general para los diferentes modelos en para aquellos modos de vibración que sean coincidentes.

Podemos confirmar que dentro de un mismo modelo, el cambio en la disposición de lo tirantes provoca un cambio mayor en los resultados, es decir, que influye más que el cambio en la tipología de arcos. Para modelos con misma tipología de arcos tenemos mayores coincidencias que para modelos con mismas disposiciones de tirantes.

## 5.2. DESPLAZAMIENTOS

Lo primero que vamos a hacer es comentar los resultados por modelos agrupándolos en función de la disposición de los arcos y posteriormente lo compararemos en función de la disposición de sus tirantes.

### 5.2.1 En función de la tipología de arcos

Modelo	Desplazamiento máximo mm	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
<b>1a</b>	436.999	A9	130
<b>1b</b>	226.233	A9	200
<b>1c</b>	85.812	A10	350
<b>1d</b>	59	A10	390

Tabla 23. Resultados Desplazamientos verticales Modelo dos arcos paralelos

Para los modelos de tipo 1, es decir, dos arcos paralelos, se observa claramente que los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 1a (tirantes verticales) y 1b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 para velocidades inferiores a los otros dos modelos, 130 y 200 km/h respectivamente. Estos resultados son distintos a los obtenidos por los modelos 1c (tirantes en celosía) y 1d (tirantes cruzados) cuyos valores de desplazamientos máximos verticales son más bajos y se resultan al paso del tren modelo A10 a velocidades más altas como son 350 y 390 km/h respectivamente. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1a y 1b tienen un comportamiento más parecido que para los modelos 1c y 1d, de forma análoga ocurre para estos dos últimos modelos.

Modelo	Desplazamiento máximo mm	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
<b>2a</b>	452.421	A9	110
<b>2b</b>	237.237	A9	200
<b>2c</b>	94.919	A10	340
<b>2d</b>	62.192	A10	380

Tabla 24. Resultados Desplazamientos verticales Modelo dos arcos cerrados

Para los modelos de tipo 2, es decir, dos arcos cerrados, se observa claramente que los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 2a (tirantes verticales) y 2b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 para velocidades inferiores a los otros dos modelos, 110 y 200 km/h respectivamente. Estos resultados son distintos a los obtenidos por los modelos 2c (tirantes en celosía) y 2d (tirantes cruzados) cuyos valores de desplazamientos máximos verticales son más bajos y se resultan al paso del tren modelo A10 a velocidades más altas como son 340 y 380 km/h respectivamente. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 2a y 2b tienen un comportamiento más parecido que para los modelos 2c y 2d, de forma análoga ocurre para estos dos últimos modelos.

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento máximo mm</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>3a</b>	453.375	A9	110
<b>3b</b>	235.142	A9	200
<b>3c</b>	87.227	A10	350
<b>3d</b>	60.744	A10	390

Tabla 25. Resultados Desplazamientos verticales Modelo dos arcos abiertos

Para los modelos de tipo 3, es decir, dos arcos abiertos, se observa claramente que los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 3a (tirantes verticales) y 3b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 para velocidades inferiores a los otros dos modelos, 110 y 200 km/h respectivamente. Estos resultados son distintos a los obtenidos por los modelos 3c (tirantes en celosía) y 3d (tirantes cruzados) cuyos valores de desplazamientos máximos verticales son más bajos y se resultan al paso del tren modelo A10 a velocidades más altas como son 350 y 380 km/h respectivamente. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 3a y 3b tienen un comportamiento más parecido que para los modelos 3c y 3d, de forma análoga ocurre para estos dos últimos modelos.

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento máximo mm</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>4a</b>	655.907	A9	120
<b>4b</b>	402.488	A9	160
<b>4c</b>	99.433	A9	340
<b>4d</b>	96.111	A9	390

Tabla 26. Resultados Desplazamientos verticales Modelo un arco centrado

Para los modelos de tipo 4, es decir, un arco centrado, se observa claramente que los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 4a (tirantes verticales) y 4b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 para velocidades inferiores a los otros dos modelos, 120 y 160 km/h respectivamente. Estos resultados son distintos a los obtenidos por los modelos 4c (tirantes en celosía) y 4d (tirantes cruzados) cuyos valores de desplazamientos máximos verticales son más bajos y se resultan al paso del tren modelo A9 a velocidades más altas como son 340 y 390 km/h respectivamente. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 4a y 4b tienen un comportamiento más parecido que para los modelos 4c y 4d, de forma análoga ocurre para estos dos últimos modelos.

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento máximo mm</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>5a</b>	136.516	A9	210
<b>5b</b>	134.032	A10	230
<b>5c</b>	32.802	A10	420
<b>5d</b>	25.724	A10	410

Tabla 27. Resultados Desplazamientos verticales Modelo un arco centrado tablero con sección cajón

Para los modelos de tipo 5, es decir, un arco centrado y sección del tablero en cajón, se observa claramente que los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 5a (tirantes verticales) y 5b (tirantes en abanico) donde obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 y el tren A10 respectivamente, para velocidades inferiores a los otros dos modelos, 210 y 230 km/h respectivamente. Estos resultados son distintos a los obtenidos por los modelos 5c (tirantes en celosía) y 5d (tirantes cruzados) cuyos valores de desplazamientos máximos verticales son más bajos y se resultan al paso del tren modelo A10 a velocidades más altas como son 420 y 410 km/h respectivamente. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 5a y 5b tienen un comportamiento más parecido que para los modelos 5c y 5d, de forma análoga ocurre para estos dos últimos modelos.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento similar que se repite por parejas, para las disposiciones de tirantes verticales junto con la disposición en abanico, así como para la disposición en celosía junto con los tirantes cruzados.

Observamos que el modelo con el que obtenemos los valores más bajos corresponde al modelo 5, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que es donde obtenemos los resultados más desfavorables de los 5 modelos.

Para los dos primeros modelos observamos que se producen las sollicitaciones más críticas para velocidades en torno a los 150 km/h, frente a los dos últimos modelos, donde las sollicitaciones máximas se dan para velocidades cercanas a los 400 km/h.

La tendencia también es bastante clara a que estos resultados vienen provocados por el paso de los trenes modelo A9 y A10 en todos los casos relativos a desplazamientos verticales.

## 5.2.2 En función de la disposición de los tirantes

Si ahora agrupamos los diferentes modelos en función de la disposición de sus tirantes, vamos a obtener otro punto de vista sobre el que comparar los resultados y ciertas conclusiones interesantes que se entienden de forma más sencilla ordenando los resultados de esta manera.

Modelo	Desplazamiento máximo mm	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1a	436.999	A9	130
2a	452.421	A9	110
3a	453.375	A9	110
4a	655.907	A9	120
5a	136.516	A9	210

Tabla 28. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes verticales

Para los modelos de tipo a, es decir, tirantes verticales, se observa claramente que el modelo que peor se comportan corresponden al modelo 4a (un arco centrado) seguido de los modelos 1a (dos arcos paralelos), 2a (dos arcos cerrados) y 3a (dos arcos abiertos) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5a (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4a es notoria y lo único que varía es el tablero. Todos los modelos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 para velocidades relativamente bajas, 110, 120, 130 km/h, excepto el modelo 5a que tiene lugar para el paso del tren modelo a 200 km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1a, 2a, 3a y 4a, tienen un

comportamiento bastante similar, frente al 5a, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Modelo	Desplazamiento máximo mm	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1b	226.233	A9	200
2b	237.237	A9	200
3b	235.142	A9	200
4b	402.488	A9	160
5b	134.032	A10	230

Tabla 29. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes en abanico

Para los modelos de tipo b, es decir, tirantes en abanico, se observa claramente que el modelo que peor se comportan corresponden al modelo 4b (un arco centrado) seguido de los modelos 1b (dos arcos paralelos), 2b (dos arcos cerrados) y 3b (dos arcos abiertos) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5b (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4b es notoria y lo único que varía es el tablero. Todos los modelos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 para velocidades en torno a los 200 km/h, excepto el modelo 5b que tiene lugar para el paso del tren modelo A10. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1b, 2b, 3b y 4b, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5b, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Modelo	Desplazamiento máximo mm	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1c	85.812	A10	350
2c	94.919	A10	340
3c	87.227	A10	350
4c	99.433	A9	340
5c	32.802	A10	420

Tabla 30. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes en celosía

Para los modelos de tipo c, es decir, tirantes en celosía, se observa claramente que el modelo que peor se comportan corresponden al modelo 4c (un arco centrado) seguido de los modelos 1c (dos arcos paralelos), 2c (dos arcos cerrados) y 3c (dos arcos abiertos) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5c (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4c es notoria y lo único que varía es el tablero. Todos los modelos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A10 para velocidades relativamente altas, 350 km/h, excepto el modelo 4c que tiene lugar para el paso del tren modelo A9. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1c, 2c, 3c y 4c, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5c, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Modelo	Desplazamiento máximo mm	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1d	59	A10	390
2d	62.192	A10	380
3d	60.744	A10	390
4d	96.111	A9	390
5d	25.724	A10	410

Tabla 31. Resultados Desplazamientos verticales Modelo tirantes cruzados

Para los modelos de tipo d, es decir, tirantes cruzados, se observa claramente que el modelo que peor se comportan corresponden al modelo 4d (un arco centrado) seguido de los modelos 1d (dos arcos paralelos), 2d (dos arcos cerrados) y 3d (dos arcos abiertos) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5d (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4a es notoria y lo único que varía es el tablero. Todos los modelos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A10 para velocidades relativamente altas, cerca de 400 km/h, excepto el modelo 4d que tiene lugar para el paso del tren modelo A9. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1d, 2d, 3d y 4d, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5d, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento similar que se repite en grupos, donde se aprecia que, dentro de cada grupo de disposición de tirantes, el modelo que peor se comporta de forma general corresponde al 4 (un arco centrado) y el resto de los modelos 1 (dos arcos paralelos), 2 (dos arcos abiertos), 3 (dos arcos cerrados), se comportan de forma bastante similar. Esto quiere decir que para los desplazamientos parece ser que influye más la disposición de los tirantes que las variaciones en la tipología de arcos, para las cargas dinámicas que estamos estudiando.

Observamos que el modelo con el que obtenemos los valores más bajos corresponde al modelo 5, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que es donde obtenemos los resultados más desfavorables de los 5 modelos.

Dentro de cada agrupamiento por disposición de arcos, observamos que se producen las sollicitaciones más críticas para velocidades bastante similares dentro del mismo grupo.

La tendencia también es bastante clara a que estos resultados vienen provocados por el paso de los trenes modelo A9 y A10 en todos los casos relativos a desplazamientos verticales.

## 5.3. ACELERACIONES

### 5.3.1 En función de la tipología de los arcos

Modelo	Aceleración vertical máxima (m/s <sup>2</sup> )	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
<b>1a</b>	38.86	A10	350
<b>1b</b>	49.25	A10	370
<b>1c</b>	55.94	A2	380
<b>1d</b>	90.48	A3	370

Tabla 32. Resultados Aceleraciones verticales Modelo dos arcos paralelos

Para los modelos de tipo 1, es decir, dos arcos paralelos, se observa claramente que el modelo que peor se comporta corresponde al modelo 1d (tirantes cruzados) frente a los otros tres modelos, que obtenemos unos valores menores de aceleraciones verticales. Se observa que para este modelo 1d, el tren modelo que provoca dicho valor es el A3, que es diferente del tren modelo que provoca el máximo valor para el modelo 1c (tirantes en celosía) y a su vez es distinto para los modelos 1a (tirantes verticales) y 1b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A10. Respecto a las velocidades de paso que provocan las sollicitaciones más desfavorables de nuestra estructura, obtenemos unos valores bastante similares para los cuatro modelos, en torno a los 350 y 380 km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los en general los

modelos tienen un comportamiento bastante análogo ya que los máximos valores se producen en un rango similar de velocidades.

<b>Modelo</b>	<b>Aceleración vertical máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>2a</b>	44.32	A10	370
<b>2b</b>	47.54	A10	370
<b>2c</b>	54.57	A2	380
<b>2d</b>	40.67	A3	360

Tabla 33. Resultados Aceleraciones verticales Modelo dos arcos cerrados

Para los modelos de tipo 2, es decir, dos arcos cerrados, se observa claramente que el modelo que peor se comporta corresponde al modelo 2c (tirantes en celosía) frente a los otros tres modelos, que obtenemos unos valores menores de aceleraciones verticales. Se observa que para este modelo 2c, el tren modelo que provoca dicho valor es el A2, que es diferente del tren modelo que provoca el máximo valor para el modelo 2d (tirantes cruzados) y a su vez es distinto para los modelos 2a (tirantes verticales) y 2b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A10. Respecto a las velocidades de paso que provocan las sollicitaciones más desfavorables de nuestra estructura, obtenemos unos valores bastante similares para los cuatro modelos, en torno a los 370 km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los en general los modelos tienen un comportamiento bastante análogo ya que los máximos valores se producen en un rango similar de velocidades.

<b>Modelo</b>	<b>Aceleración vertical máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>3a</b>	43.38	A9	360
<b>3b</b>	48.21	A10	370
<b>3c</b>	55.43	A2	380
<b>3d</b>	40.02	A7	380

Tabla 34. Resultados Aceleraciones verticales Modelo dos arcos abiertos

Para los modelos de tipo 3, es decir, dos arcos abiertos, se observa claramente que el modelo que peor se comporta corresponde al modelo 3c (tirantes en celosía) frente a los otros tres modelos, que obtenemos unos valores menores de aceleraciones verticales. Se observa que para este modelo 3c, el tren modelo que provoca dicho valor es el A2, que es diferente del tren modelo que provoca el máximo valor para el modelo 2d (tirantes cruzados) y a su vez es distinto para los modelos 2a (tirantes verticales) y 2b (tirantes en abanico) donde ambos obtienen su resultado más crítico al paso del tren A9 y A10 respectivamente. Respecto a las velocidades de paso que provocan las sollicitaciones más desfavorables de nuestra estructura, obtenemos unos valores bastante similares para los cuatro modelos, en torno a los 370 km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los en general los modelos tienen un comportamiento bastante análogo ya que los máximos valores se producen en un rango similar de velocidades.

<b>Modelo</b>	<b>Aceleración vertical máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>4a</b>	36.30	A2	370
<b>4b</b>	36.58	A10	360
<b>4c</b>	48.78	A2	370
<b>4d</b>	48.95	A9	390

Tabla 35. Resultados Aceleraciones verticales Modelo un arco centrado

Para los modelos de tipo 4, es decir, un arco centrado, se observa que los modelos que peor se comportan corresponden al modelo 4c (tirantes en celosía) y 4d (tirantes cruzados) frente a los otros dos modelos, que obtenemos unos valores menores de aceleraciones verticales. Se observa que para este modelo 4c, el tren modelo

que provoca dicho valor es el A2, que es diferente del tren modelo que provoca el máximo valor para el modelo 4d (tirantes cruzados) y a su vez es distinto para el modelo 2b (tirantes en abanico) donde obtiene su resultado más crítico al paso del tren A10. Respecto a las velocidades de paso que provocan las solicitaciones más desfavorables de nuestra estructura, obtenemos unos valores bastante similares para los cuatro modelos, en torno a los 370 km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los en general los modelos tienen un comportamiento bastante análogo ya que los máximos valores se producen en un rango similar de velocidades.

Modelo	Aceleración vertical máxima (m/s <sup>2</sup> )	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
5a	7.99	A2	350
5b	6.82	A4	420
5c	7.61	A2	360
5d	6.80	A2	350

Tabla 36. Resultados Aceleraciones verticales Modelo un arco centrado tablero sección cajón

Para los modelos de tipo 5, es decir, un arco centrado con sección del tablero en cajón se observa que los modelos que peor se comportan corresponden al modelo 5a (tirantes verticales) y 5c (tirantes en celosía) frente a los otros dos modelos, que obtenemos unos valores menores de aceleraciones verticales. Se observa que para este modelo 5b (tirantes en abanico), el tren modelo que provoca dicho valor es el A4, que es diferente del tren modelo que provoca el máximo valor para los modelos 5a, 5c y 5d (tirantes cruzados) donde obtiene su resultado más crítico al paso del tren A2. Respecto a las velocidades de paso que provocan las solicitaciones más desfavorables de nuestra estructura, obtenemos unos valores bastante similares para los cuatro modelos, en torno a los 360 km/h, excepto para el modelo 5b que tiene lugar para una velocidad de paso de 420 km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los en general los modelos tienen un comportamiento bastante análogo ya que los máximos valores se producen en un rango similar de velocidades.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento bastante similar por lo general, para las diferentes disposiciones de tirantes dentro de un mismo modelo de arco. También entre los diferentes modelos de arcos desde el tipo 1 al tipo 4 tenemos unos valores bastante similares.

Observamos que el modelo con el que obtenemos los valores más bajos corresponde al modelo 5, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que es donde obtenemos los resultados más desfavorables de los 5 modelos.

Para los diferentes modelos tenemos una gran variedad de trenes modelo que provocan la mayor sollicitación en la estructura donde los que más se repinten son el modelo de tren A10 y A2.

La tendencia también es bastante clara a que estos resultados vienen provocados por el paso de los trenes modelo a velocidades en torno a los 370 km/h para los diferentes modelos.

### 5.3.2 En función de la disposición de los tirantes

Si ahora agrupamos los diferentes modelos en función de la disposición de sus tirantes, vamos a obtener otro punto de vista sobre el que comparar los resultados y ciertas conclusiones interesantes que se entienden de forma más sencilla ordenando los resultados de esta manera.



Modelo	Aceleración vertical máxima (m/s <sup>2</sup> )	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1a	38.86	A10	350
2a	44.32	A10	370
3a	43.38	A9	360
4a	36.30	A2	370
5a	7.99	A2	350

Tabla 37. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes verticales

Para los modelos de tipo a, es decir, tirantes verticales, se observa una tendencia donde los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 2a (dos arcos cerrados) y 3a (dos arcos abiertos) seguido de los modelos 1a (dos arcos paralelos) y 4a (un arco centrado cerrados) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5a (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4a es notoria y lo único que varía es el tablero. Existe amplia variedad con relación al tren modelo con el que se obtienen su resultado más crítico (A2, A9, A10), para velocidades relativamente altas, en torno a 370km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1a, 2a, 3a y 4a, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5a, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Modelo	Aceleración vertical máxima (m/s <sup>2</sup> )	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1b	49.25	A10	370
2b	47.54	A10	370
3b	48.21	A10	370
4b	36.58	A10	360
5b	6.82	A4	420

Tabla 38. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes en abanico

Para los modelos de tipo b, es decir, tirantes en abanico, se observa una tendencia donde los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 1b (dos arcos en paralelo), 2b (dos arcos cerrados) y 3b (dos arcos abiertos) seguido del modelo 4b (un arco centrado cerrados) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5b (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4a es notoria y lo único que varía es el tablero. Existe poca variedad con relación al tren modelo con el que se obtienen su resultado más crítico, generalmente el A10, excepto para el modelo 5b, que corresponde al A4. Estos resultados se dan para velocidades relativamente altas, en torno a 370km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1b, 2b, 3b y 4b, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5b, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Modelo	Aceleración vertical máxima (m/s <sup>2</sup> )	Tren HSLM	Velocidad de paso (km/h)
1c	55.94	A2	380
2c	54.57	A2	380
3c	55.43	A2	380
4c	48.78	A2	370
5c	7.61	A2	360

Tabla 39. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes en celosía

Para los modelos de tipo c, es decir, tirantes en celosía, se observa una tendencia donde los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 1c (dos arcos en paralelo), 2c (dos arcos cerrados) y 3c (dos arcos abiertos) seguido del modelo 4c (un arco centrado cerrados) y finalmente el modelo que mejor se comporta para

esta disposición de tirantes, el 5c (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4a es notoria y lo único que varía es el tablero. Existe poca variedad con relación al tren modelo con el que se obtienen su resultado más crítico, en todos el A2. Estos resultados se dan para velocidades relativamente altas, en torno a 370km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1c, 2c, 3c y 4c, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5c, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

<b>Modelo</b>	<b>Aceleración vertical máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Tren HSLM</b>	<b>Velocidad de paso (km/h)</b>
<b>1d</b>	90.48	A3	370
<b>2d</b>	40.67	A3	360
<b>3d</b>	40.02	A7	380
<b>4d</b>	48.95	A9	390
<b>5d</b>	6.80	A2	350

Tabla 40. Resultados Aceleraciones verticales Modelo tirantes cruzados

Para los modelos de tipo d, es decir, tirantes cruzados, se observa claramente el peor resultado para el modelo 1d (dos arcos paralelos) seguido de una tendencia donde los modelos que peor se comportan corresponden a los modelos 2d (dos arcos cerrados) y 3d (dos arcos abiertos), 4b (un arco centrado cerrados) y finalmente el modelo que mejor se comporta para esta disposición de tirantes, el 5d (un arco centrado con tablero sección cajón) donde claramente se debe a la variación del tipo de tablero que resiste mejor los momentos torsores, ya que la diferencia con el modelo 4a es notoria y lo único que varía es el tablero. . Existe amplia variedad con relación al tren modelo con el que se obtienen su resultado más crítico (A2, A3, A7 y A9), para velocidades relativamente altas, en torno a 370km/h. En las figuras correspondientes que recogen los resultados del conjunto de los diez trenes modelo HSLM con su rango de velocidades, se aprecia claramente como los modelos 1d, 2d, 3d y 4d, tienen un comportamiento bastante similar, frente al 5d, que todavía guarda cierta similitud, pero si se aprecia un comportamiento algo diferente en la gráfica.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento bastante similar por lo general, para las diferentes disposiciones de arco donde obtenemos resultados bastante similares remarcando la disposición de tirantes de tipo 3 (en celosía) donde obtenemos valores mayores de aceleraciones, pero diferenciadas del resto.

Observamos que el modelo con el que obtenemos los valores más bajos corresponde al modelo 5, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que es donde obtenemos los resultados más desfavorables de los 5 modelos.

En cuanto al tren modelo que solicita estos máximos resultados, generalmente suele ser el mismo dentro de un grupo, aunque para los modelos de tirantes a y d si que se produce mayor variedad.

La tendencia también es bastante clara a que estos resultados vienen provocados por el paso de los trenes modelo a velocidades en torno a los 370 km/h para los diferentes modelos.

## 5.4. COEFICIENTE DE IMPACTO

### 5.4.1 En función de la tipología de los arcos

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coeficiente de impacto $\phi$
<b>1a</b>	436.999	144.46	<b>3.025</b>
<b>1b</b>	226.233	85.945	<b>2.632</b>
<b>1c</b>	85.812	17.271	<b>4.969</b>
<b>1d</b>	59	13.524	<b>4.363</b>

Tabla 41. Coeficientes de impacto en modelos de dos arcos paralelos

Para este primer modelo, dos arcos paralelos, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coeficiente de impacto $\phi$
<b>2a</b>	452.421	148.798	<b>3.041</b>
<b>2b</b>	237.237	90.9	<b>2.610</b>
<b>2c</b>	94.919	18.434	<b>5.149</b>
<b>2d</b>	62.192	14.871	<b>4.182</b>

Tabla 42. Coeficientes de impacto en modelos de dos arcos cerrados

Para este modelo, dos arcos cerrados, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coeficiente de impacto $\phi$
<b>3a</b>	453.375	147.664	<b>3.070</b>
<b>3b</b>	235.142	91.275	<b>2.576</b>
<b>3c</b>	87.227	18.098	<b>4.820</b>
<b>3d</b>	60.744	14.522	<b>4.183</b>

Tabla 43. Coeficientes de impacto en modelos de dos arcos abiertos

Para este modelo, dos arcos abiertos, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

Modelo	Desplazamiento máximo	Desplazamiento estático	Coeficiente de impacto $\phi$
<b>4a</b>	655.907	231.894	<b>2.828</b>
<b>4b</b>	402.488	165.891	<b>2.426</b>
<b>4c</b>	99.433	30.532	<b>3.257</b>
<b>4d</b>	96.111	30.06	<b>3.197</b>

Tabla 44. Coeficientes de impacto en modelos de un arco centrado

Para este modelo, un arco centrado, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, pero frente a ello unos coeficientes de impacto mayores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), indicativo de que su sollicitación dinámica es mayor en comparación con la estática.

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento Máximo</b>	<b>Desplazamiento Estático</b>	<b>Coficiente de Impacto <math>\phi</math></b>
<b>5a</b>	136.516	51.144	<b>2.669</b>
<b>5b</b>	134.032	65.642	<b>2.042</b>
<b>5c</b>	32.802	18.429	<b>1.780</b>
<b>5d</b>	25.724	18.132	<b>1.419</b>

Tabla 45. Coeficientes de impacto en modelos de un arco centrado con tablero sección en cajón

Para este último modelo, arco centrado con sección de tablero de tipo cajón, resulta lo contrario que en los casos anteriores, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) obtenemos los valores de desplazamientos más bajos, y a su vez unos coeficientes de impacto menores que para los modelos de tipo a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico).

#### 5.4.2 En función de la disposición de los tirantes

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento máximo</b>	<b>Desplazamiento estático</b>	<b>Coficiente de impacto <math>\phi</math></b>
<b>1a</b>	436.999	144.46	<b>3.025</b>
<b>2a</b>	452.421	148.798	<b>3.041</b>
<b>3a</b>	453.375	147.664	<b>3.070</b>
<b>4a</b>	655.907	231.894	<b>2.828</b>
<b>5a</b>	136.516	51.144	<b>2.669</b>

Tabla 46. Coeficientes de impacto en modelos tirantes verticales

En este primer modelo que tiene en común la disposición de tirantes de forma vertical, se observan valores similares para los 5 modelos, todos ellos con valores en torno a 3, de forma que la respuesta dinámica es unas tres veces mayor que la que obtendríamos si hiciésemos un análisis estático, donde obtenemos los valores más bajos para la tipología de un solo arco centrado.

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento máximo</b>	<b>Desplazamiento estático</b>	<b>Coficiente de impacto <math>\phi</math></b>
<b>1b</b>	226.233	85.945	<b>2.632</b>
<b>2b</b>	237.237	90.9	<b>2.610</b>
<b>3b</b>	235.142	91.275	<b>2.576</b>
<b>4b</b>	402.488	165.891	<b>2.426</b>
<b>5b</b>	134.032	65.642	<b>2.042</b>

Tabla 47. Coeficientes de impacto en modelos de tirantes en abanico

En este segundo modelo, que corresponde a la disposición de tirantes en abanico, se observan valores similares para los 5 modelos, en torno a un valor de 2.5, a excepción del modelo 5b que corresponde a un solo arco centrado con sección del tablero de tipo cajón.

<b>Modelo</b>	<b>Desplazamiento máximo</b>	<b>Desplazamiento estático</b>	<b>Coficiente de impacto <math>\phi</math></b>
<b>1c</b>	85.812	17.271	<b>4.969</b>
<b>2c</b>	94.919	18.434	<b>5.149</b>
<b>3c</b>	87.227	18.098	<b>4.820</b>
<b>4c</b>	99.433	30.532	<b>3.257</b>
<b>5c</b>	32.802	18.429	<b>1.780</b>

Tabla 48. Coeficientes de impacto en modelos de tirantes en celosía

En este tercer modelo que tiene en común la disposición de tirantes en celosía, se observan valores similares para los 3 primeros modelos, todos ellos con valores en torno a 5, de forma que la respuesta dinámica es unas cinco veces mayor que la que obtendríamos si hiciésemos un análisis estático. A destacar la diferencia que obtenemos de estos primeros modelos en comparación con el último, el 5c (un solo arco centrado con sección del tablero de tipo cajón) que obtenemos un valor de 1.7 de forma que no hay tanta diferencia de la respuesta que obtenemos de forma dinámica y estática en comparación con los otros modelos.

Modelo	Desplazamiento Máximo	Desplazamiento Estático	Coficiente de Impacto $\phi$
<b>1d</b>	59	13.524	<b>4.363</b>
<b>2d</b>	62.192	14.871	<b>4.182</b>
<b>3d</b>	60.744	14.522	<b>4.183</b>
<b>4d</b>	96.111	30.06	<b>3.197</b>
<b>5d</b>	25.724	18.132	<b>1.419</b>

Tabla 49. Coeficientes de impacto en modelos de tirantes cruzados

En este cuarto modelo que tiene en común la disposición de tirantes de tipo cruzado, se observan valores similares para los 3 primeros modelos, todos ellos con valores en torno a 4, de forma que la respuesta dinámica es unas cuatro veces mayor que la que obtendríamos si hiciésemos un análisis estático. A destacar la diferencia que obtenemos de estos primeros modelos en comparación con el último, el 5d (un solo arco centrado con sección del tablero de tipo cajón) que obtenemos un valor de 1.4 de forma que no hay tanta diferencia de la respuesta que obtenemos de forma dinámica y estática en comparación con los otros modelos.

Visto esto, podemos enunciar las siguientes afirmaciones:

Tenemos un comportamiento bastante similar por lo general, para las diferentes disposiciones de tirantes dentro de un mismo modelo de arco, es decir, si agrupamos los modelos en función de la disposición de sus tirantes, por ejemplo: 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, obtendríamos valores casi idénticos del coeficiente de impacto.

Observamos que el modelo con el que obtenemos los valores más bajos corresponde al modelo 5, pero esto se debe exclusivamente a la sección del tablero con forma de viga cajón, ya que, para el mismo modelo, pero con diferente sección transversal del tablero, el modelo 4, podemos observar que es donde obtenemos los resultados más desfavorables de los 5 modelos.

Esto quiere decir, que en el modelo 5 de arco centrado con sección del tablero de tipo cajón, no produce una gran diferencia la sollicitación dinámica y estática de una misma carga, como si ocurre para los 4 primeros modelos de arco.

Como tendencia general, en función de los valores de los coeficientes de impacto para los primeros cuatro tipos de modelos 1, 2, 3 y 4, en las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados), se observa una mayor sensibilidad en cuanto a la sollicitación que produce una carga dinámica frente a la misma carga de forma estática, ya que obtenemos una relación, coeficiente de impacto, mayor que para los casos de tirantes a y b.

# 6 CONCLUSIONES Y ASPECTOS FUTUROS A DESARROLLAR

---

En este capítulo vamos a comentar las conclusiones que hemos obtenido del estudio de los diferentes modelos junto con varias opciones relacionadas con diferentes aspectos del trabajo para posibles desarrollos futuros, tanto para completar o ampliar en el presente proyecto, como nuevos caminos a desarrollar.

Cabe mencionar, la inestimable ayuda del tutor, guiándome en este trabajo, aportando tanto ideas como soluciones.

## 6.1. CONCLUSIONES

Se da por completado el estudio que nos habíamos propuesto en el capítulo 2 de esta memoria. Hemos desarrollado los diferentes modelos numéricos, tanto con su geometría, materiales, cargas y análisis dinámico, en la herramienta informática Midas Civil 3D, y hemos obtenido los diferentes resultados que hemos utilizado para su estudio y comparación como pueden ser los modos de vibración y frecuencias naturales, desplazamientos y aceleraciones verticales, coeficiente de impacto.

Haciendo referencia a todo lo que se ha expuesto en capítulos anteriores de esta memoria, se puede llegar a las siguientes conclusiones.

- En el ámbito de las frecuencias naturales y modos de vibración:

Tenemos un comportamiento similar que se repite por parejas, para las disposiciones de tirantes verticales junto con la disposición en abanico, así como para la disposición en celosía junto con los tirantes cruzados. De modo que, para los 4 primeros modelos de diferentes tipologías de arco, coincide que para la disposición de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) se suele excitar primeramente la rotación sobre el eje Y, frente a los modelos de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados) tenemos un modo de vibración que no viene excitado por el paso del tren sobre la estructura.

Esto se intercambia para el segundo modo de vibración de cada modelo, que para aquellos con disposición de tirantes a y b, generalmente no viene provocado por el paso del tren sobre el puente, frente a los modeos c y d que excitaría la rotación sobre el eje Y, lo que conlleva desplazamiento vertical del tablero..

Observamos que el modelo 5 (un solo arco centrado con sección del tablero en cajón), tiene un comportamiento similar para las diferentes disposiciones de tirantes, donde tenemos un primer modo de vibración que no viene excitado por el paso del tren sobre la estructura, frente al segundo y tercer modo de vibración que si provoca el desplazamiento vertical del tablero.

Podemos confirmar que dentro de un mismo modelo, el cambio en la disposición de los tirantes provoca un cambio mayor en los resultados, es decir, que influye más que el cambio en la tipología de arcos. Para modelos con misma tipología de arcos tenemos mayores coincidencias que para modelos con mismas disposiciones de tirantes.

- En lo relativo a los desplazamientos, podemos concluir que más que la disposición de los arcos, influye bastante más la disposición de los tirantes, donde hemos obtenido peores valores para los modelos de tipo a (tirantes verticales), seguido de los modelos b (tirantes en abanico) y un escalón por encima los modelos c (tirantes en celosía) y d (tirantez cruzados) con los que hemos obtenido mejores valores que para los 2 primeros.

También influye el tablero, ya que para los modelos de tipo 5 (un arco centrado con tablero sección en cajón) obtenemos mucho mejores valores que para los de tipo 4 (un arco centrado), cuya única diferencia es el tablero.

El tren modelo que genera estas solicitudes más desfavorables suele ser bien el tren A9 o el A10 y las velocidades para las que se dan estos valores, dependen de que pareja de modelos, para las disposiciones de tirantes a y b se dan en torno a los 100-200 km/h y para las disposiciones de tirantes c y d se dan en torno a los 340-400 km/h.

- En cuanto a las aceleraciones verticales, si que parece influir algo más la combinación entre las diferentes disposiciones tanto de arcos como de tirantes, aunque se puede apreciar unos valores bastante parecidos por lo general.

Si destaca el modelo 5 (un arco centrado con tablero sección cajón) como modelo con mejor comportamiento ya que refleja los valores más bajos.

Se puede apreciar ciertos parecidos entre los modelos 1 (dos arcos paralelos) y los modelos 4 (un arco centrado) donde se obtienen valores más bajos para las dos primeras disposiciones de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico), y peores valores para las disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados).

Lo mismo ocurre para los modelos 2 (dos arcos cerrados) y los modelos 3 (dos arcos abiertos) donde obtenemos valores más altos para las 3 primeras disposiciones de tirantes, y el valor más bajo para las de tipo d (tirantes cruzados).

En cuanto a los trenes modelo que genera estas solicitudes, hay gran variedad de ellos, no como para el caso de los desplazamientos, donde podemos apreciar una clara tendencia, en este caso destacan el A10 y el A2, así como muchos otros que aparecen, A3, A7, A9, etc.

Donde si parece haber una tendencia bastante clara, es en la velocidad de paso que solicita estos valores, que se encuentra para la mayoría de casos en torno a los 350-400 km/h.

- Con respecto al coeficiente de impacto, observamos una tendencia distinta para los 4 primeros modelos de arcos y para los modelos de tipo 5 (un arco centrado con tablero sección en cajón).

Para los primeros 4 modelos, se observa que las disposiciones de tirantes a (tirantes verticales) y b (tirantes en abanico) presentan una diferencia menor en cuanto al comportamiento de una misma carga de forma estática frente a su comportamiento de forma dinámica, dado que se obtienen valores más bajos. Esto quiere decir, que para los modelos con disposiciones de tirantes c (tirantes en celosía) y d (tirantes cruzados), se tiene un valor del coeficiente de impacto mayor, y por tanto que cobra más importancia su estudio dinámico ya que la solicitud de la carga de forma dinámica es más significativa en comparación con su solicitud de forma estática.

En el último modelo, tipo 5, se observa la tendencia contraria, se dan valores de coeficiente de impacto mayores para las disposiciones de tirantes de tipo a y b que para las c y d. De hecho, para estas dos últimas disposiciones de tirantes se dan valores en torno a 1.5-1.7, que sería el coeficiente de mayoración por el que multiplicar la sollicitación de carga estática para tener en cuenta sus efectos dinámicos.

Estos valores que se dan para el modelo de arco tipo 5, son menores que para los anteriores modelos, por lo que podemos entender que tiene un comportamiento mejor, ya que no influyen tanto la acción dinámica de la estructura. En el resto de modelos, los modelos de tipo 4 (un arco centrado) son aquellos que menos amplificación de carga producen los efectos dinámicos, aunque son de un orden algo mayor, en torno a 3.

## 6.2. ASPECTOS FUTUROS A DESARROLLAR

- Una de las opciones más triviales para continuar con este trabajo es incluir otros modelos de puente, bien sean dentro de la misma tipología de tipo arco, incluyendo otra otra geometría de arcos o nuevas disposiciones de tirantes.

En la misma línea también podemos tener en cuenta la variación de las secciones de los elementos que conforman la estructura, o incluso el material.

Hasta ahora las opciones que hemos comentado son siempre manteniendo el mismo tablero, excepto para el último modelo, en esa misma línea, se podría mantener los mismos modelos descritos en el presente trabajo e introducir un tablero diferente. Con ello se abre un abanico bastante amplio de posibilidades, como puede ser la geometría, sus elementos, sus materiales, etc.

- Otra opción sería adoptar otra tipología de puente diferente a la usada en el presente trabajo, puente arco con tablero inferior, manteniendo la idea o el objeto de estudio. Es decir, analizar los desplazamiento y aceleraciones verticales, que obtenemos a raíz del análisis dinámico de la estructura, así como el coeficiente de pandeo o los diferentes modos de vibración, pero con otra tipología de estructura y otros modelos.
- Incluir la interacción suelo-estructura. Ocurre que, si incluimos solamente el tablero aislado para el desplazamiento y las aceleraciones verticales, infravaloramos la respuesta de la estructura.

Es conveniente analizar modelos que incluyan tanto los estribos como el terreno circundante, sobre todo cuando el terreno es relativamente rígido.

- Hacer una comparativa económica de para cada modelo, teniendo en cuenta la cantidad y el precio del material que se usa para cada uno de ellos con el fin de tener una idea cuantitativa de su rendimiento.

También influye bastante en el precio el proceso constructivo por lo que sería preciso valorar el alcance del presupuesto a definir, con el objetivo de que sea útil dicha comparativa.





# REFERENCIAS

---

- [1] J. Manterola, Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción, Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2006.
- [2] E. Hamilton, The Pictorial Encyclopedia of Railways, Hamlyn Publishing Group.
- [3] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril>. [Último acceso: 20 Abril 2021].
- [4] C. E. d. N. CEN, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Cargas de tráfico en puentes., 2004.
- [5] J. Domínguez, Dinámica de Puentes de Ferrocarril para Alta Velocidad: Métodos de Cálculo y Estudio de la Resonancia, 2001.
- [6] R. Clough y J. Penzien, Dynamics of Structures, McGraw-Hill, 1975.
- [7] J. Domínguez, Vibraciones Mecánicas, Universidad de Sevilla, Escuela de Ingenieros Industriales, Departamento de publicaciones, 1980.
- [8] European Rail Research Institute;, Ponts-Rails pour vitesses > 200 km/h; Rapport final. ERRI D214/RP 9, 1999.
- [9] L. Frýba, A rough assessment of railway bridges for high speed trains. Engineering Structures, 2001, pp. 548-556.
- [10] A. Martínez, Tesis Doctoral. Influencia de la interacción suelo-estructura en el análisis dinámico de puentes sometidos al paso de trenes de alta velocidad, Universidad de Sevilla, 2017.
- [11] A. Martínez de la Concha, H. Cifuentes y F. Medina, «A Finite Element Methodology to Study Soil-Structure Interaction in High Speed Railway Bridges,» *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol. 13, March 2018.
- [12] M. Inc, *Midas Civil 3D 18*, New York: MidasSoft Inc, 2018.
- [13] Ministerio de Fomento, Gobierno de España, Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF), 2010.
- [14] E. Pérez, Trabajo de Fín de Master. Estudio dinámico de puentes de ferrocarril de tipo arco con tablero superior, Universidad de Sevilla, 2021.
- [15] P. Galvín, Tesis Doctoral. Análisis numérico experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía., Universidad de Sevilla, 2007.

