

Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

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

Autor: Ernesto Pérez Gonzalo

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **ESTUDIO DINÁMICO DE PUENTES DE FERROCARRIL DE TIPO ARCO CON TABLERO SUPERIOR**

Autor:

Ernesto Pérez Gonzalo

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

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 SUPERIOR

Autor: Ernesto Pérez Gonzalo

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo Fin de Máster 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 amigos*  
*A mis maestros*





# AGRADECIMIENTOS

---

El último paso de un largo camino, no puede empezar de otra forma que no sea, agradeciendo el gran apoyo que me han dado mis familiares y amigos, los cuales han sido los pilares que me han sustentado y a la vez levantado en los momentos difíciles para conseguir mi meta. Entre todas estas personas, el pilar principal, ha sido mi pareja, la cual ha vivido, trabajo a trabajo, examen a examen, en fin, paso a paso, el duro trabajo diario que he realizado, el cual ha sido más llevadero, teniéndole a mi lado. Como en este momento no acordarme de mi madre la que me vio nacer y me ha visto crecer, cuidándome mejor que nadie y marcándome siempre el buen camino y mi abuelo esa persona increíble con la que he compartido momentos que son indescriptibles, sabio y gran consejero y mis tíos apoyo indispensable en mi camino que me han ayudado siempre, cuando he necesitado ayuda sin tener que pedírsela. Mis amigos, esa familia que eliges, que están siempre ahí, los que ayudan a definir tu camino, en definitiva, parte indispensable del camino de la vida. Mis compañeros de estudio, con los que he sufrido sin decaer este duro camino que elegimos, con los que he vivido grandísimos momentos dentro y fuera de la universidad.

También agradecer a todos aquellos profesores, sus conocimientos y aportaciones, las cuales me han hecho alcanzar mi meta y como no, destacar a mi tutor, por su duro trabajo y la dedicación de su tiempo a mi trabajo para enseñarme sus conocimientos y explicarme cuantas dudas fueran necesaria, para dar este último paso.

GRACIAS



El presente trabajo, tiene como fin, el análisis del efecto que provocan las cargas dinámicas, producidas por el tránsito del ferrocarril, sobre un puente de tipo arco con tablero superior.

Para el análisis, se han modelizado varios puentes arcos, con diferente luz de arco, 300 metros, 200 metros y 100 metros y diferente relación flecha/luz,  $1/5$ ,  $1/7.07$ ,  $1/10$  y  $1/15$  y se han hecho circular 10 tipos de trenes diferentes HSLM, sobre los tableros de dichos modelos.

Las secciones de los tableros al igual que la separación de las pilas, han sido definidas atendiendo a varios criterios.

Los modelos han sido construidos con el software MIDAS mediante elementos barra.



# ABSTRACT

---

The purpose of this work is to analyze the effect caused by dynamic loads, produced by railway traffic, on an arch-type bridge with an upper deck.

For the analysis, several arch bridges have been modeled, with different arch span, 300 meters, 200 meters and 100 meters and different arrow / span ratio,  $1/5$ ,  $1 / 7.07$ ,  $1/10$  and  $1/15$  and have been circulated 10 different types of HSLM trains, on the boards of these models.

The sections of the boards, as well as the separation of the piles, have been defined according to several criteria.

The models have been built with MIDAS software using bar elements.



|   |       |
|---|-------|
| Agradecimientos.....                              | ix    |
| Resumen .....                                     | xi    |
| Abstract.....                                     | xiii  |
| Índice .....                                      | xv    |
| Índice de tablas .....                            | xviii |
| Índice de figuras .....                           | xx    |
| 1. Introducción.....                              | 27    |
| 1.1. Historia de los Puentes Arcos.....           | 27    |
| 1.2. Tipologías de puentes arcos.....             | 29    |
| 1.3. La resonancia y la alta velocidad.....       | 31    |
| 2. Objetivo del estudio.....                      | 32    |
| 3. Modelo de estudio.....                         | 33    |
| 3.1. Constantes elásticas del material .....      | 33    |
| 3.2. Construcción del tablero .....               | 35    |
| 3.3. Construcción de pilas.....                   | 39    |
| 3.4. Construcción del arco .....                  | 44    |
| 3.5. Aparatos de apoyo tipo POT (Neoprenos) ..... | 47    |
| 3.6. Condiciones de contorno .....                | 48    |
| 3.7. Modelos.....                                 | 52    |
| 3.8. Definición de las cargas.....                | 55    |
| 4. Resultados .....                               | 59    |
| 4.1. Modelo Arco de 300m de luz .....             | 60    |
| 4.1.1. Modelo relación flecha-luz 1/5.....        | 60    |
| 4.1.2. Modelo relación flecha-luz 1/7.07 .....    | 70    |
| 4.1.3. Modelo relación flecha-luz 1/10 .....      | 80    |
| 4.1.4. Modelo relación flecha-luz 1/15 .....      | 90    |
| 4.2. Modelo Arco de 200m de luz .....             | 100   |
| 4.2.1. Modelo relación flecha-luz 1/7.07 .....    | 100   |

|                                    |  |     |
|------------------------------------|--|-----|
| 4.3.                               | Modelo Arco de 100m de luz .....               | 110 |
| 4.3.1.                             | Modelo relación flecha-luz 1/7.07 .....        | 110 |
| 4.4.                               | Comparativa y análisis de los resultados ..... | 120 |
| 4.4.1                              | Modelo arco luz 300m.....                      | 121 |
| 4.4.2                              | Modelo arco luz 200m.....                      | 129 |
| 4.4.3                              | Modelo arco luz 100m.....                      | 131 |
| 5.                                 | Conclusiones finales .....                     | 134 |
| 6.                                 | Estudios futuros .....                         | 142 |
| 7.                                 | Referencias .....                              | 143 |
| ANEXO I: GRAFICAS DE MÁXIMOS ..... |  | 145 |





# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1 – Modelos objeto de estudio .....  | 33  |
| Tabla 2 - Longitudes de las pilas .....  | 43  |
| Tabla 3 - Secciones arco de luz 300m.....  | 44  |
| Tabla 4 - Secciones arco de luz 200m.....  | 46  |
| Tabla 5 - Secciones arco de luz 100m.....  | 46  |
| Tabla 6 – Características de cada tren HSLM .....  | 56  |
| Tabla 7 - Resultados de los modelos.....   | 133 |
| Tabla 8 – Desplazamientos verticales máximos.....  | 134 |
| Tabla 9 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/5 .....     | 135 |
| Tabla 10 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/7.07 ..... | 135 |
| Tabla 11 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/10 .....   | 136 |
| Tabla 12 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/15 .....   | 136 |
| Tabla 13 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/5 .....      | 137 |
| Tabla 14 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/7.07 .....   | 137 |
| Tabla 15 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/10 .....     | 138 |
| Tabla 16 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/15 .....     | 138 |
| Tabla 17 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 200m .....                   | 139 |
| Tabla 18 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 200m .....                     | 139 |
| Tabla 19 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 100m .....                   | 140 |
| Tabla 20 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 100m .....                     | 140 |



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Puente Romano de Alcántara. Iberdrola <sup>2</sup> .....                              | 27 |
| Figura 1.2 – Puente arco Chaotianmen sobre el río Yangtse. Emilio M. Arevalo <sup>4</sup> .....    | 28 |
| Figura 1.3 - Puente New George. Fuente: Megaconstrucciones.net <sup>6</sup> .....                  | 29 |
| Figura 3.1 – Características elásticas del material .....  | 34 |
| Figura 3.2 – Sección tablero para luz de arco de 300m .....  | 35 |
| Figura 3.3 – Sección tablero para luz de arco de 300m en apoyos sobre pilas y estribos.....        | 35 |
| Figura 3.4 – Introducción de datos de sección del tablero en MIDAS .....                           | 36 |
| Figura 3.5 - Introducción de datos de sección del tablero sobre pilas y estribos en MIDAS.....     | 36 |
| Figura 3.6 - Tablero de 462m de longitud para puente arco de 300m de luz .....                     | 37 |
| Figura 3.7 - Tablero de 462m de longitud para puente arco de 300m de luz .....                     | 37 |
| Figura 3.8 - Tablero de 462m de longitud para puente arco de 300m de luz .....                     | 37 |
| Figura 3.9 - Tablero de 334m de longitud para puente arco de 200m de luz .....                     | 38 |
| Figura 3.10 - Tablero de 169m de longitud para puente arco de 100m de luz.....                     | 38 |
| Figura 3.11 – Cabeza pilas .....   | 39 |
| Figura 3.12 - Cuerpo pilas.....  | 40 |
| Figura 3.13 – Pie pilas.....   | 41 |
| Figura 3.14 – Modelización de las pilas en MIDAS para el arco de 300m de luz y f/l de 1/7.07 ..... | 43 |
| Figura 3.15 – Sección para arco de 300m de luz y relación f/l de 1/7.07 .....                      | 44 |
| Figura 3.16 – Sección importada en SPC.....  | 45 |
| Figura 3.17 – Sección importada en MIDAS.....  | 45 |
| Figura 3.18 - Arco de 300m de luz con relación f/L de 1/7.07.....                                  | 46 |
| Figura 3.19 - Elastick link pila-tablero .....   | 47 |
| Figura 3.20 - Elastick Link pila-tablero.....  | 47 |
| Figura 3.21 – Condición de contorno 1 .....  | 48 |
| Figura 3.22 – Elastick link tablero-estribo inicial .....  | 48 |
| Figura 3.23 – Elastick link tablero-estribo final .....  | 49 |
| Figura 3.24 – Condiciones de contorno estribo inicial .....  | 49 |
| Figura 3.25 – Condiciones de contorno estribo final .....  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.26 - Condiciones de contorno de las pilas.....                                   | 50 |
| Figura 3.27 - Condiciones de contorno del arco.....                                       | 51 |
| Figura 3.28 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/5.....               | 52 |
| Figura 3.29 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/7.07.....            | 52 |
| Figura 3.30 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/10.....              | 53 |
| Figura 3.31 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/15.....              | 53 |
| Figura 3.32 - Modelo arco con luz de 200m y relación flecha/luz de 1/7.07.....            | 54 |
| Figura 3.33 - Modelo arco con luz de 100m y relación flecha/luz de 1/7.07.....            | 54 |
| Figura 3.34 - Distribución de cargas muertas a lo largo del tablero.....                  | 55 |
| Figura 3.35 – Trenes de carga. Fuente: Normativa EN 1991-2:2003 <sup>11</sup> .....       | 56 |
| Figura 3.36 - Eje de paso tren de cargas HSLM.....  | 57 |
| Figura 4.1 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 60 |
| Figura 4.2 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 60 |
| Figura 4.3 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 61 |
| Figura 4.4 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 61 |
| Figura 4.5 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 62 |
| Figura 4.6 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 62 |
| Figura 4.7 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 63 |
| Figura 4.8 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 63 |
| Figura 4.9 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 64 |
| Figura 4.10 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/5..... | 64 |
| Figura 4.11 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 65 |
| Figura 4.12 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 65 |
| Figura 4.13 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 66 |
| Figura 4.14 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 66 |
| Figura 4.15 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 67 |
| Figura 4.16 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 67 |
| Figura 4.17 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 68 |
| Figura 4.18 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 68 |
| Figura 4.19 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....    | 69 |
| Figura 4.20 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/5.....   | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.21 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 70 |
| Figura 4.22 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 70 |
| Figura 4.23 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 71 |
| Figura 4.24 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 71 |
| Figura 4.25 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 72 |
| Figura 4.26 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 72 |
| Figura 4.27 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 73 |
| Figura 4.28 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 73 |
| Figura 4.29 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....  | 74 |
| Figura 4.30 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 ..... | 74 |
| Figura 4.31 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 75 |
| Figura 4.32 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 75 |
| Figura 4.33 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 76 |
| Figura 4.34 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 76 |
| Figura 4.35 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 77 |
| Figura 4.36 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 77 |
| Figura 4.37 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 78 |
| Figura 4.38 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 78 |
| Figura 4.39 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....    | 79 |
| Figura 4.40 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07 .....   | 79 |
| Figura 4.41 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 80 |
| Figura 4.42 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 80 |
| Figura 4.43 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 81 |
| Figura 4.44 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 81 |
| Figura 4.45 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 82 |
| Figura 4.46 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 82 |
| Figura 4.47 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 83 |
| Figura 4.48 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 83 |
| Figura 4.49 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....    | 84 |
| Figura 4.50 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/10 .....   | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.51 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 85  |
| Figura 4.52 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 85  |
| Figura 4.53 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 86  |
| Figura 4.54 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 86  |
| Figura 4.55 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 87  |
| Figura 4.56 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 87  |
| Figura 4.57 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 88  |
| Figura 4.58 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 88  |
| Figura 4.59 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....     | 89  |
| Figura 4.60 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/10.....    | 89  |
| Figura 4.61 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 90  |
| Figura 4.62 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 90  |
| Figura 4.63 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 91  |
| Figura 4.64 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 91  |
| Figura 4.65 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 92  |
| Figura 4.66 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 92  |
| Figura 4.67 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 93  |
| Figura 4.68 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 93  |
| Figura 4.69 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....   | 94  |
| Figura 4.70 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....  | 94  |
| Figura 4.71 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 95  |
| Figura 4.72 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 95  |
| Figura 4.73 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 96  |
| Figura 4.74 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 96  |
| Figura 4.75 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 97  |
| Figura 4.76 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 97  |
| Figura 4.77 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 98  |
| Figura 4.78 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 98  |
| Figura 4.79 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....     | 99  |
| Figura 4.80 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/15.....    | 99  |
| Figura 4.81 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07..... | 100 |
| Figura 4.82 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07..... | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.83 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 101 |
| Figura 4.84 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 101 |
| Figura 4.85 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 102 |
| Figura 4.86 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 102 |
| Figura 4.87 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 103 |
| Figura 4.88 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 103 |
| Figura 4.89 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 104 |
| Figura 4.90 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....  | 104 |
| Figura 4.91 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 105 |
| Figura 4.92 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 105 |
| Figura 4.93 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 106 |
| Figura 4.94 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 106 |
| Figura 4.95 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 107 |
| Figura 4.96 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 107 |
| Figura 4.97 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 108 |
| Figura 4.98 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 108 |
| Figura 4.99 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....     | 109 |
| Figura 4.100 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07 .....   | 109 |
| Figura 4.101 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 110 |
| Figura 4.102 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 110 |
| Figura 4.103 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 111 |
| Figura 4.104 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 111 |
| Figura 4.105 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 112 |
| Figura 4.106 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 112 |
| Figura 4.107 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 113 |
| Figura 4.108 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 113 |
| Figura 4.109 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 114 |
| Figura 4.110 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 ..... | 114 |
| Figura 4.111 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....    | 115 |
| Figura 4.112 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....    | 115 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.113 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 116 |
| Figura 4.114 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 116 |
| Figura 4.115 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 117 |
| Figura 4.116 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 117 |
| Figura 4.117 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 118 |
| Figura 4.118 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 118 |
| Figura 4.119 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 .....  | 119 |
| Figura 4.120 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07 ..... | 119 |
| Figura 4.121 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación f/l 1/5.....                      | 121 |
| Figura 4.122 – Aceleraciones máximas luz 300m y relación f/l 1/5.....                        | 121 |
| Figura 4.123 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación f/l 1/7.07 .....                  | 123 |
| Figura 4.124 - Aceleraciones máximas luz 300m y relación f/l 1/7.07 .....                    | 123 |
| Figura 4.125 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación f/l 1/10.....                     | 125 |
| Figura 4.126 - Aceleraciones máximas luz 300m y relación f/l 1/10 .....                      | 125 |
| Figura 4.127 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación f/l 1/15.....                     | 127 |
| Figura 4.128 - Aceleraciones máximas luz 300m y relación f/l 1/15 .....                      | 127 |
| Figura 4.129 – Comparación trenes A2 para luz de 300m.....                                   | 128 |
| Figura 4.130 – Desplazamientos máximos luz 200m y relación f/l 1/7.07 .....                  | 129 |
| Figura 4.131 - Aceleraciones máximas luz 200m y relación f/l 1/7.07 .....                    | 129 |
| Figura 4.132 Desplazamientos luz 300m vs luz 200m (1/7).....                                 | 130 |
| Figura 4.133 – Desplazamientos máximos luz 100m y relación f/l 1/7.07 .....                  | 131 |
| Figura 4.134 - Aceleraciones máximas luz 100m y relación f/l 1/7.07 .....                    | 131 |
| Figura 6.0.1 – Máximos desplazamientos arco de 100m de luz y relación f/l de 1/7.07 .....    | 145 |
| Figura 6.0.2 – Máximos desplazamientos arco de 200m de luz y relación f/l de 1/7.07 .....    | 145 |
| Figura 6.0.3 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación f/l de 1/5.....        | 146 |
| Figura 6.0.4 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación f/l de 1/7.07 .....    | 146 |
| Figura 6.0.5 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación f/l de 1/10.....       | 147 |
| Figura 6.0.6 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación f/l de 1/15.....       | 147 |
| Figura 6.0.7 – Máximas aceleraciones arco de 100m de luz y relación f/l de 1/7.07.....       | 148 |
| Figura 6.0.8 – Máximas aceleraciones arco de 200m de luz y relación f/l de 1/7.07.....       | 148 |
| Figura 6.0.9 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/5.....          | 149 |
| Figura 6.0.10 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/7.07.....      | 149 |

Figura 6.0.11 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/10..... 150

Figura 6.0.12 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/15..... 150

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Historia de los Puentes Arcos

El puente, es aquel elemento utilizado en la construcción y más concretamente en la obra civil, para salvar un obstáculo, dicho obstáculo puede ser de origen natural como un río, un valle o cualquier otro accidente geográfico o dicho obstáculo puede ser de origen artificial, como una carretera, una vía de ferrocarril o incluso una edificación.

El puente arco, el cual es objeto de estudio del presente trabajo, está compuesto estructuralmente por: el arco que es el elemento resistente y cuya forma estará determinada como el antifunicular de la carga del puente, el tablero el cual tiene un papel secundario respecto al arco y los pilares los cuales soportan al tablero y apoyan sobre el arco y/o sobre el terreno. El arco, de esta tipología de puente, tiene su apoyo en los extremos de la luz que se quiere salvar, para transmitir las cargas a dichos apoyos. La esbeltez, es decir, la relación flecha-luz del arco es elevada, por lo que los esfuerzos horizontales son considerablemente mucho mayores a los esfuerzos verticales a los que son sometidos los apoyos.

El arco tiene su origen en la época romana (*Javier Manterola 1*), hoy en día existen conservados perfectamente puentes de esta época, como es el puente Romano de Alcántara, situado en la localidad extremeña de Alcántara. Dicho puente, se encuentra aguas abajo de la presa de dicha localidad, Esta majestuosa estructura data del siglo II y salva el río Tajo. Dicho puente tiene un tablero de 194 metros y tiene una altura de 58 metros, consta de 6 arcos, el mayor de ellos tiene 28.8 metros de luz y 5 pilares de diferentes alturas, de los cuales solo dos de ellos se cimentan bajo el agua.



*Figura 1.1 - Puente Romano de Alcántara. Iberdrola 2*

A lo largo del siglo XX, las estructuras ferroviarias en el mundo y sobre todo en España, han experimentado un desarrollo, que ha permitido reducir los tiempos de transporte y con ello se ha visto aumentado el uso de las líneas de ferrocarril frente a otros medios de transporte como el avión.

La primera línea de alta velocidad en el mundo data del año 1964, construida en Japón para unir las ciudades de Tokio y Osaka. En Europa los inicios de las líneas de alta velocidad son en 1977, para unir Florencia con Roma. La primera línea de alta velocidad en España se inauguró en el año 1992, uniendo Sevilla y Madrid.

Hoy en día existen en España 13 líneas de tren de alta velocidad (AVE), con una longitud de 3.402 km. (según datos de ADIF<sup>3</sup>) convirtiéndose así en el país de Europa con más km de alta velocidad y el segundo del mundo después de China. Esto hace a España, estar a la vanguardia en este medio de transporte y la construcción de las infraestructuras que se requieren para este medio.

Cabe destacar, el viaducto que se ha construido recientemente, para el paso del AVE sobre el río Almonte en Extremadura, el cual tiene una luz de 384m y una longitud total del tablero de 996m.

En la actualidad, el puente arco de mayor longitud, es el Chaotianmen situado en Chongqing (China), con una luz de 552 metros y una longitud de su tablero de 932 metros.



**Figura 1.2 – Puente arco Chaotianmen sobre el río Yangtse. Emilio M. Arevalo <sup>4</sup>**

## 1.2. Tipologías de puentes arcos

Los puentes, se pueden clasificar (Javier Manterola <sup>1</sup>) atendiendo a:

- I. El material utilizado.
- II. La luz entre vanos.
- III. El servicio que presta.
- IV. Los mecanismos de transmisión de las cargas a la infraestructura.
- V. Sus condiciones estáticas.
- VI. La ubicación del tablero.

Atendiendo a esta última clasificación, se va hacer una clasificación de los puentes tipo arco, la cual viene marcada por la posición del arco respecto al tablero:

- Puente arco con tablero superior. Las cargas se trasmiten del tablero al arco a través de los pilares.



*Figura 1.3 - Puente New George. Fuente: Megaconstrucciones.net <sup>6</sup>*

- Puente arco con tablero intermedio. Las cargas se transmiten del tablero al arco a través de los pilares y los tirantes.



*Figura 1.3 - Puente de la Vicaria. Fuente: Escapada Rural <sup>7</sup>*

- Puente arco con tablero inferior. Las cargas se transmiten del tablero al arco a través de los tirantes.



*Figura 1.4 - Puente Lusitania. Fuente: Turismomerida <sup>8</sup>*

Como se puede ver en las imágenes anteriores, en el caso del arco de tablero superior, se transmiten las cargas del tablero al arco a través de las pilas, sin embargo, en los otros dos casos se disponen cables atirantados desde el arco al tablero para poder sustentar las cargas de este.

### 1.3. La resonancia y la alta velocidad

La alta velocidad de circulación de los trenes sobre las infraestructuras, hace que estas tengan que soportar las acciones producidas del tráfico rodado sobre ellas, y por tanto dotar a estas de la suficiente capacidad portante.

Las deformaciones y tensiones inducidas en el puente, están provocadas por el tráfico rodado en sentido desfavorable, por varias razones (Antonio Martínez de la Concha <sup>9)</sup>:

- La rápida entrada en carga, debido a la velocidad del tráfico rodado asociado a los efectos de inercia de la estructura, puede aumentar 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.

- El paso de sucesivas cargas equidistantes, puede crear resonancia y amplificar de forma excesiva la respuesta de la estructura. Este efecto se produce cuando la frecuencia de excitación dinámica debida a las cargas o algún múltiplo de la misma, coincide con alguna frecuencia propia de la estructura, ocasionando un acoplamiento entre excitación y respuesta.
- Considerando la distribución espacial de los ejes de un tren, se pueden obtener uno o más espaciamientos característicos de las cargas. Ello puede producir resonancia cuando el tren circule a velocidades próximas a las críticas, para las que alguna frecuencia significativa de la estructura o de alguno de sus elementos, sea múltiplo de la frecuencia de aplicación de las cargas. Este efecto se observa en puentes de luces cortas.

Un ejemplo de estos efectos se produjo poco después de la puesta en servicio de la línea de alta velocidad Paris – Lyon, donde la Société National de Chemains de Fer (SNCF) detectó comportamientos anómalos, tal como se recoge en (ERRI D214 RP9 2000). En las revisiones ordinarias de mantenimiento se comprobaba que parte del balasto había sido proyectado fuera del tablero en puentes isostáticos con luces comprendidas entre 14 y 20 m, y debido a ello era necesario aumentar la frecuencia de las operaciones de mantenimiento, con el consiguiente incremento de costes.

## 2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

---

El objetivo del presente estudio, es la comprensión del comportamiento de los puentes al paso de los trenes de alta velocidad, para ello se va a realizar un análisis del efecto dinámico que produce el tráfico ferroviario, debido al movimiento de las cargas verticales de los trenes transmitidas por las ruedas al puente y en particular la variación del punto de aplicación de estas cargas a lo largo del tiempo, a diferentes velocidades, que origina una excitación dinámica de la estructura.

Para ello, se hará rodar el ferrocarril sobre varios puentes tipo arco con tablero superior, diferenciados por la luz de su arco, 300 metros, 200 metros y 100 metros y su relación flecha/luz, 1/5, 1/7.07, 1/10 y 1/15, con 10 composiciones diferentes de trenes de cargas HSLM que son los propuestos por la Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF-07 <sup>10</sup>) y el Eurocódigo 1 (EN 1991-2:2003 <sup>11</sup>) y con velocidades comprendidas entre los 20km/h y los 420 km/h, obteniendo para cada una de estas combinaciones:

- El desplazamiento vertical máximo del tablero, producido por el paso del tren.
- La aceleración vertical máxima, producida al paso del tren sobre el puente.

Se analizará y se comparará, las variaciones de estos valores, para los diferentes modelos.

Se comprobará, si estos valores obtenidos cumplen con la normativa vigente de puentes de ferrocarril, como son la IAPF-07 <sup>10</sup> y el Eurocódigo 1 (EN 1991-2:2003 <sup>11</sup>).



# 3. MODELO DE ESTUDIO

Para el presente estudio, se van a analizar 6 modelos diferentes, con la utilización del software MIDAS, mediante elementos barra.

Estos modelos estarán diferenciados por la luz del arco y la relación flecha/luz.

| LUZ ARCO | RELACION FLECHA/LUZ |        |      |      |
|----------|---------------------|--------|------|------|
| 300m     | 1/5                 | 1/7.07 | 1/10 | 1/15 |
| 200m     |                     | 1/7.07 |      |      |
| 100m     |                     | 1/7.07 |      |      |

*Tabla 1 – Modelos objeto de estudio*

## 3.1. Constantes elásticas del material

Para el presente estudio, se ha utilizado un hormigón de alta resistencia HP-60, el cual tendrá las siguientes características.

- Módulo de Young:  $3,4694 \cdot 10^7$  KN/m<sup>2</sup>

El módulo de Young o módulo de deformación, se obtiene según la normativa EHE-08:

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{F_{cm}}$$

Donde:

$$F_{cm} = F_{ck} + 8$$

En este caso se utiliza un hormigón HP-60, el cual tiene una resistencia a compresión, 60N/mm<sup>2</sup>, por tanto:

$$F_{cm} = 60 + 8 = 68 \text{ N/mm}^2$$

Se obtiene así:

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{68} = 3,4694 \cdot 10^7 \text{ KN/m}^2$$

- Coeficiente de Poisson: 0.2

Este valor se toma para deformaciones elásticas bajo tensiones normales de utilización.

- Peso específico: 25KN/m<sup>3</sup>

Densidad del hormigón

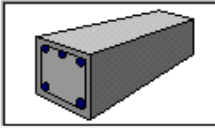
Material Data

General

Material ID: 1 Name: HP-60

Elasticity Data

Type of Design: Concrete



Type of Material:  Isotropic  Orthotropic

Steel

Standard: [Dropdown] DB: [Dropdown]

Concrete

Standard: None Code: [Dropdown] DB: [Dropdown]

Steel

Modulus of Elasticity: 0.0000e+000 kN/m<sup>2</sup>

Poisson's Ratio: 0

Thermal Coefficient: 0.0000e+000 1/[F]

Weight Density: 0 kN/m<sup>3</sup>

Use Mass Density: 0 kN/m<sup>3</sup>/g

Concrete

Modulus of Elasticity: 3.4694e+007 kN/m<sup>2</sup>

Poisson's Ratio: 0.2

Thermal Coefficient: 0.0000e+000 1/[F]

Weight Density: 25 kN/m<sup>3</sup>

Use Mass Density: 0 kN/m<sup>3</sup>/g

Plasticity Data

Plastic Material Name: NONE

Inelastic Material Properties for Fiber Model

Concrete: None Rebar: None

Thermal Transfer

Specific Heat: 0 Btu/kN\*[F]

Heat Conduction: 0 Btu/m\*hr\*[F]

Damping Ratio: 0.05

*Figura 3.1 – Características elásticas del material*

### 3.2. Construcción del tablero

Las longitudes de los tableros serán de:

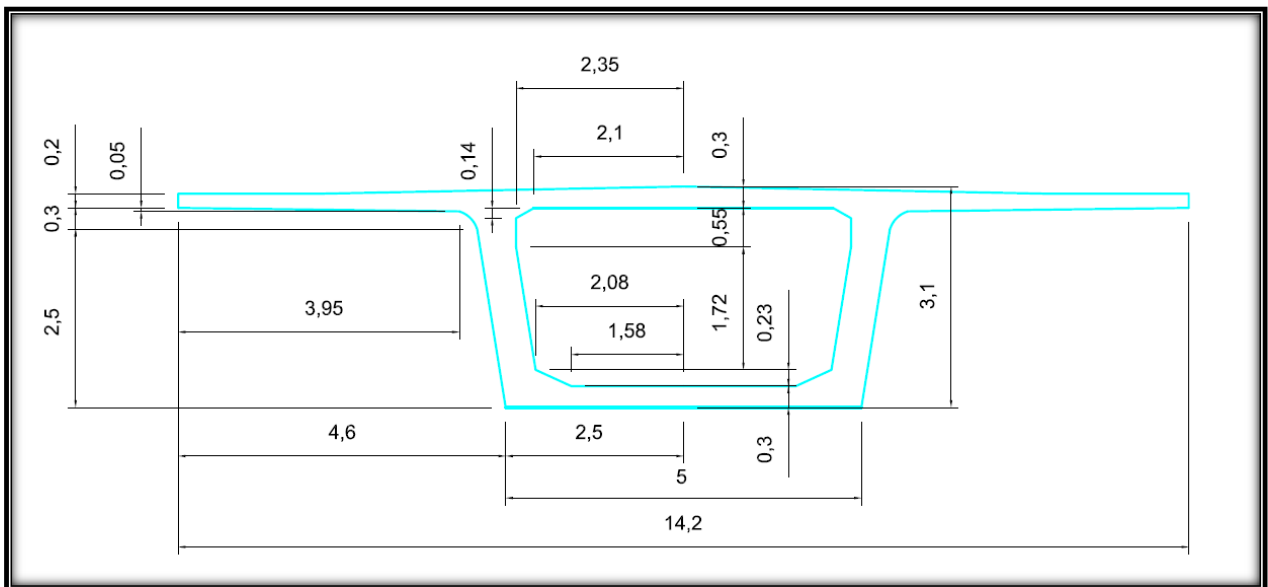
**462m** para el puente de luz de arco de **300m**.

**334m** para el puente de luz de arco de **200m**.

**169m** para el puente de luz de arco de **100m**.

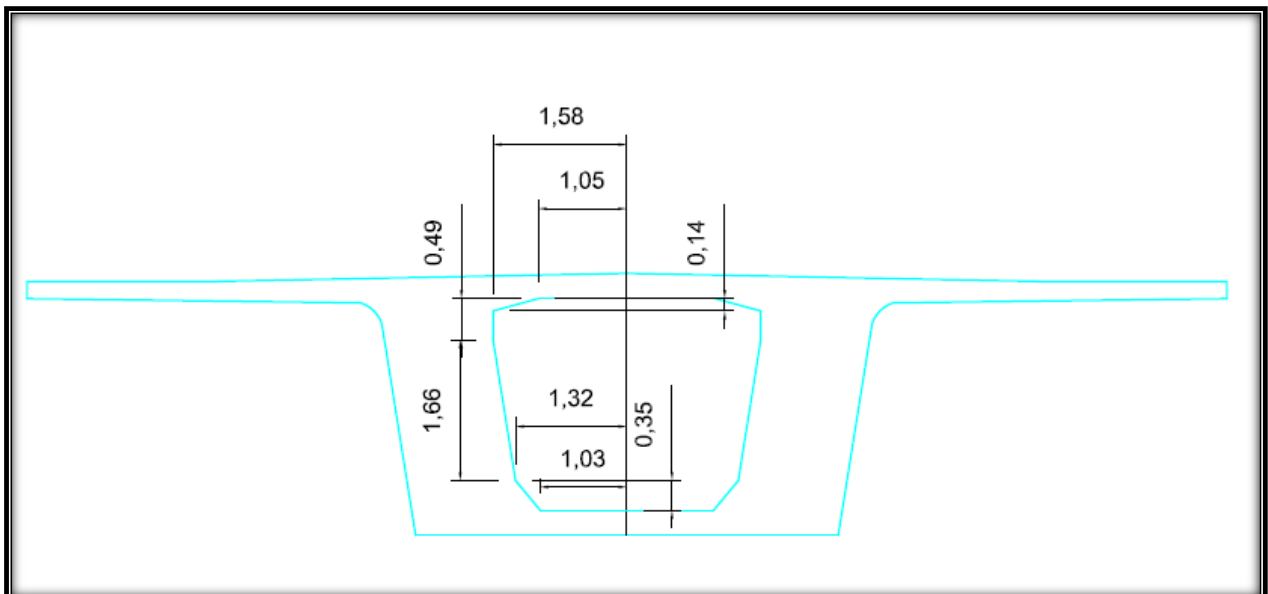
Las secciones de los tableros, tipo cajón, de los diferentes modelos vendrán definidos de la siguiente forma:

- Tablero para arco con una luz de **300m** y las 4 relaciones flecha/luz.



*Figura 3.2 – Sección tablero para luz de arco de 300m*

El área hueca del alma, será reducida, en los apoyos del tablero sobre las pilas y los estribos.



*Figura 3.3 – Sección tablero para luz de arco de 300m en apoyos sobre pilas y estribos*

Las medidas de esta sección, son introducidas en el programa MIDAS, de la siguiente forma.

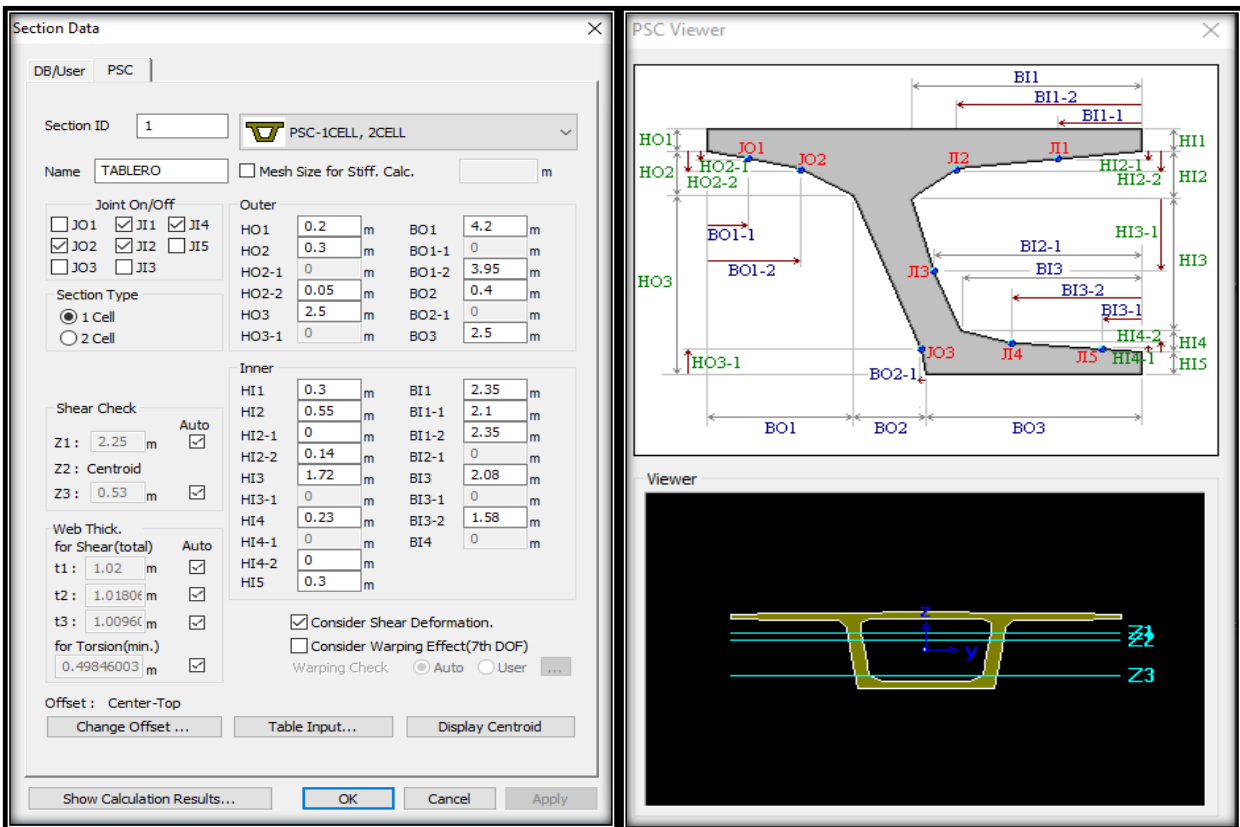


Figura 3.4 – Introducción de datos de sección del tablero en MIDAS

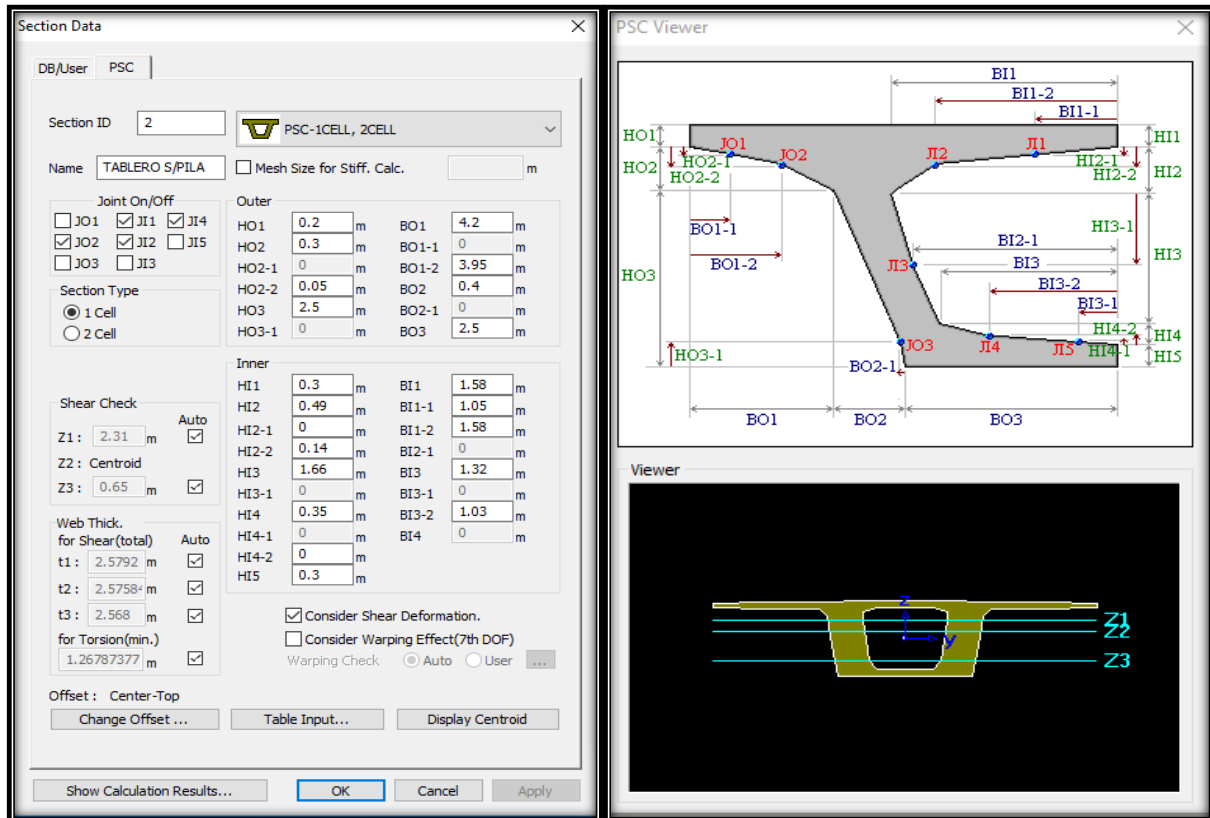
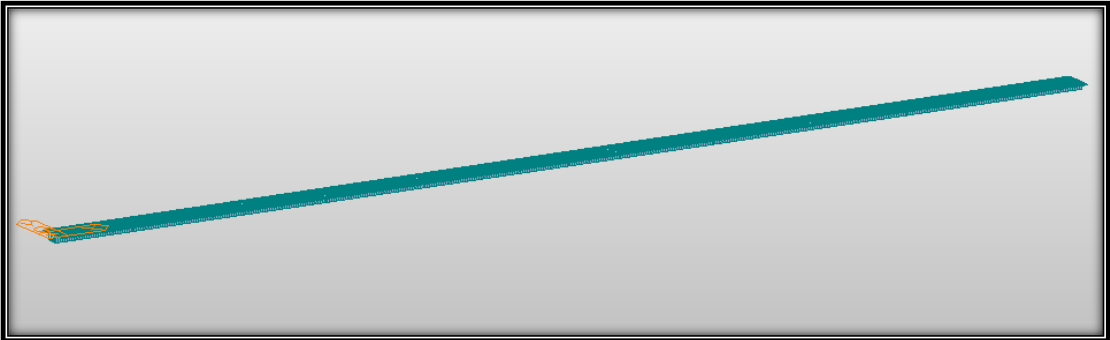
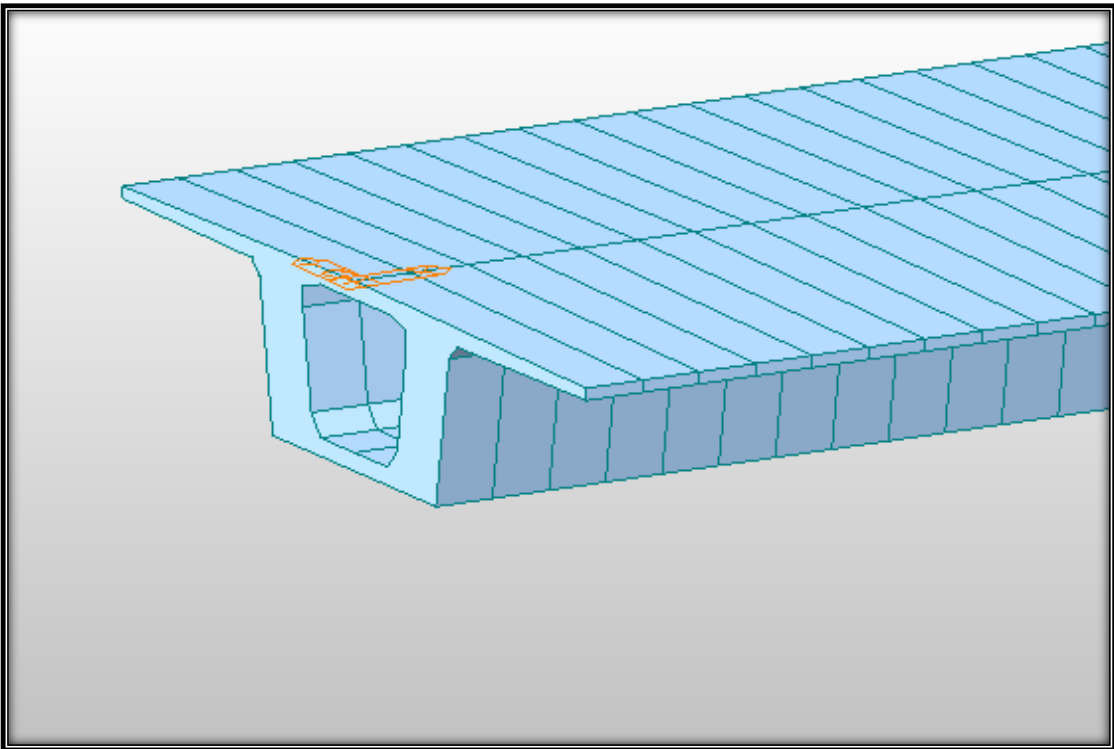


Figura 3.5 - Introducción de datos de sección del tablero sobre pilas y estribos en MIDAS

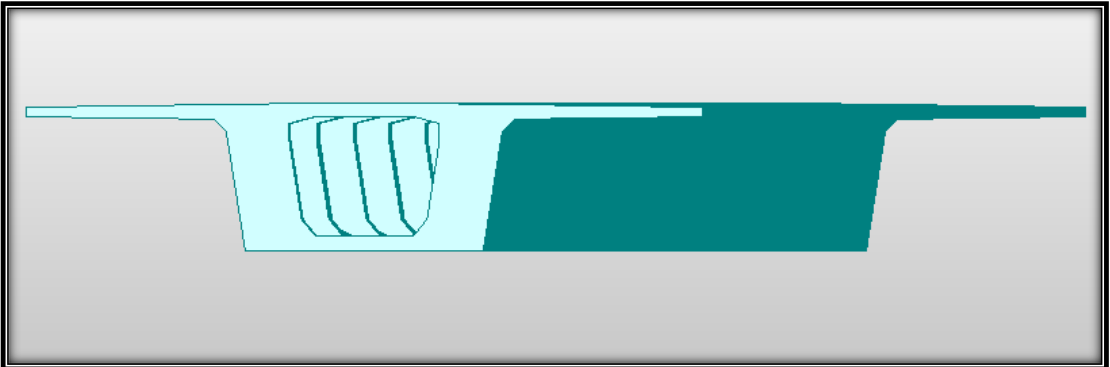
A continuación, se muestran varias imágenes de la modelización de dicho tablero, mediante elementos barras, en el software MIDAS.



*Figura 3.6 - Tablero de 462m de longitud para puente arco de 300m de luz*



*Figura 3.7 - Tablero de 462m de longitud para puente arco de 300m de luz*

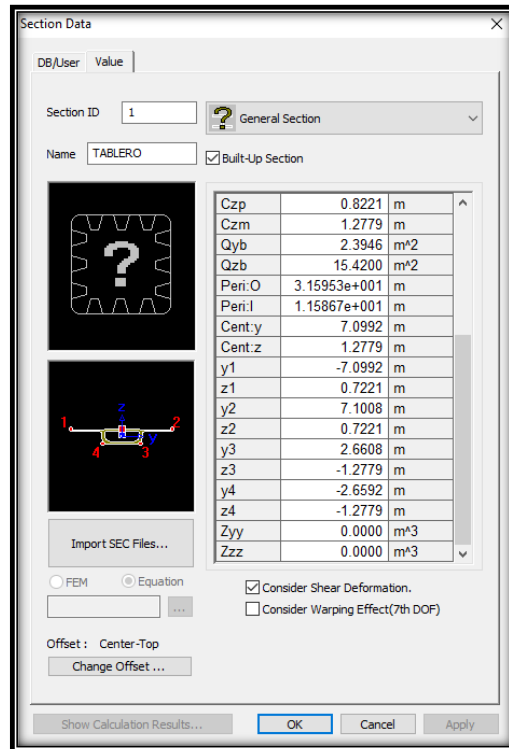


*Figura 3.8 - Tablero de 462m de longitud para puente arco de 300m de luz*

Para la creación de los tableros de luz de 200m y 100m, se mantienen el número de pilas sobre los arcos, por lo que, al disminuir la distancia entre las pilas, disminuye proporcionalmente el canto de los tableros, como se mostrará a continuación.

- Tablero para arco con una luz de **200m** y relación flecha/luz de **1/7.07**

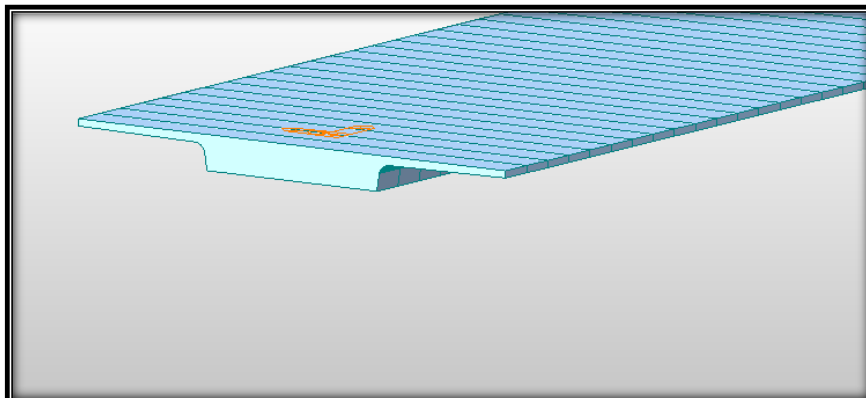
Esta sección, será similar a la de 300m, pero en este caso, la altura en su eje vertical central de 3.10m, pasará a ser de 2.10m, y de igual forma, el área hueca del alma, será reducida, en los apoyos del tablero sobre las pilas y los estribos.



*Figura 3.9 - Tablero de 334m de longitud para puente arco de 200m de luz*

- Tablero para arco con una luz de **100m** y relación flecha/luz de **1/7.07**

Esta sección, será similar a la de 300m, pero en este caso, en vez de ser la altura en su eje vertical central de 3.10m, pasará a ser de 1.10m, y además dichas secciones irán macizadas en toda la longitud del tablero.



*Figura 3.10 - Tablero de 169m de longitud para puente arco de 100m de luz*

### 3.3. Construcción de pilas

Las pilas estarán compuestas por 3 secciones diferenciadas, que serán la cabeza, el cuerpo, y el pie. Las dimensiones de estas secciones serán las definidas a continuación:

- Cabeza de las pilas. Será la parte superior de la pila, la cual, a través de los neoprenos, estará en contacto con el tablero.

Section Data

DB/User

Section ID: 3

Solid Octagon

Name: CABEZA PILAS

User (selected)

DB

AISC10(US)

Sect. Name

Built-Up Section (checked)

Get Data from Single Angle

DB Name: AISC10(US)

Sect. Name

|   |     |   |
|---|-----|---|
| H | 2.6 | m |
| B | 5.2 | m |
| a | 0.5 | m |
| b | 0.5 | m |

Consider Shear Deformation. (checked)

Consider Warping Effect(7th DOF) (unchecked)

Offset: Center-Center

Change Offset ...

Show Calculation Results... OK Cancel Apply

Figura 3.11 – Cabeza pilas

- El cuerpo de la pila. Esta es la parte de la pila que hace de unión entre la cabeza y el pie de las pilas.

Section Data

DB/User

Section ID: 5

Solid Octagon

Name: INTERMEDIO PILAS

User  DB

AISC10(US)

Sect. Name: [Empty]

Built-Up Section

Get Data from Single Angle

DB Name: AISC10(US)

Sect. Name: [Empty]

|   |     |   |
|---|-----|---|
| H | 2.6 | m |
| B | 3.2 | m |
| a | 0.5 | m |
| b | 0.5 | m |

Consider Shear Deformation.

Consider Warping Effect(7th DOF)

Offset: Center-Center

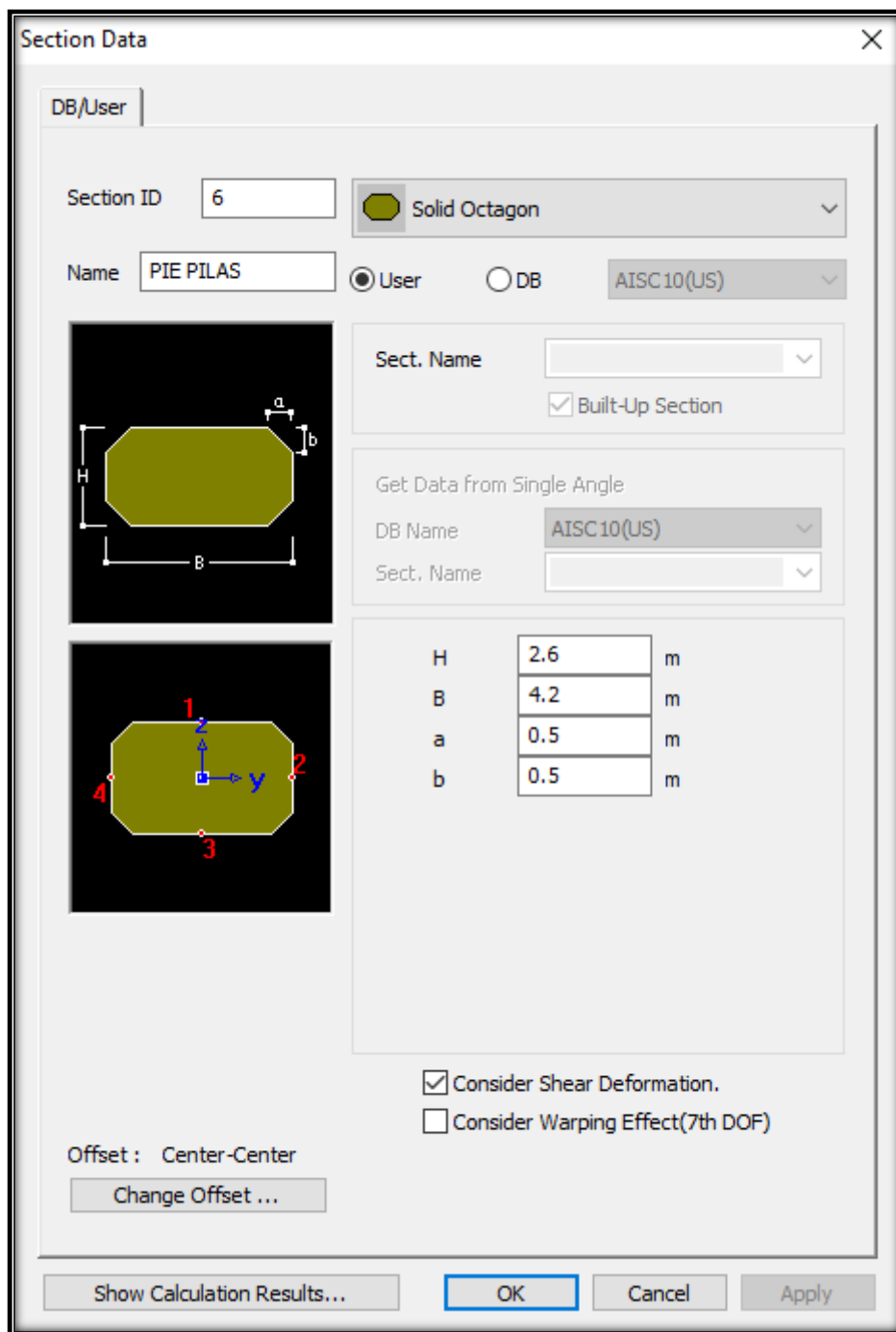
Change Offset ...

Show Calculation Results... OK Cancel Apply

Figura 3.12 - Cuerpo pilas



- Pie de la pila. Esta parte de la pila, es la que estará en contacto con el arco del puente o el terreno.



*Figura 3.13 – Pie pilas*

Todos los modelos estarán compuestos por 10 pilas. La longitud de las pilas, será variable, en función de la longitud del arco y la relación flecha/luz. A continuación, se muestra una tabla, con las longitudes de las diferentes pilas y los diferentes modelos objeto de este estudio.

|         | LUZ<br>ARCO | 300m   |        |        |        | 200m   | 100m   |
|---------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Nº PILA | F/L         | 1/5    | 1/7.07 | 1/10   | 1/15   | 1/7.07 | 1/7.07 |
| PILA 1  | Cabeza      | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  |
|         | Cuerpo      | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 15.00m | 7.00m  |
|         | Pie         | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 5.00m  | 3.00m  |
| PILA 2  | Cabeza      | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  |
|         | Cuerpo      | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 15.00m | 7.00m  |
|         | Pie         | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 5.00m  | 3.00m  |
| PILA 3  | Cabeza      | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  |
|         | Cuerpo      | 10.00m | 10.00m | 10.00m | 5.51m  | 5.00m  | 2.00m  |
|         | Pie         | 16.54m | 7.32m  | 0.77m  | -      | 4.89m  | 0.96m  |
| PILA 4  | Cabeza      | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 3.79m  | 4.00m  | 2.00m  |
|         | Cuerpo      | 6.36m  | 3.03m  | 0.68m  | -      | 1.70m  | 0.87m  |
|         | Pie         | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| PILA 5  | Cabeza      | 1.27m  | 0.89m  | 0.63m  | 0.42m  | 0.60m  | 0.32m  |
|         | Cuerpo      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
|         | Pie         | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| PILA 6  | Cabeza      | 1.27m  | 0.89m  | 0.63m  | 0.42m  | 0.60m  | 0.32m  |
|         | Cuerpo      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
|         | Pie         | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| PILA 7  | Cabeza      | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 3.79m  | 4.00m  | 2.00m  |
|         | Cuerpo      | 6.36m  | 3.03m  | 0.68m  | -      | 1.70m  | 0.87m  |

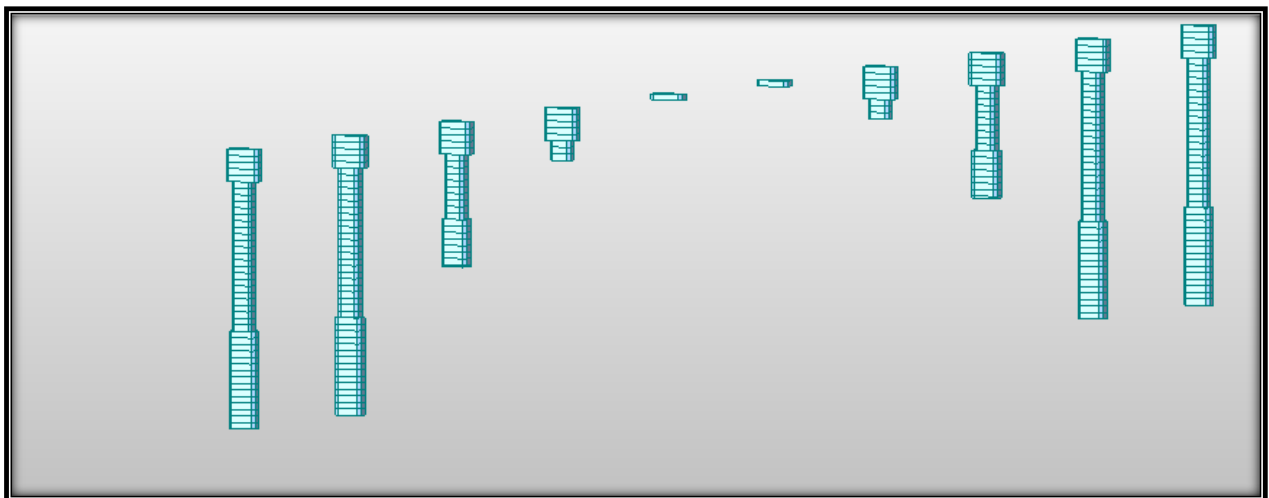
|                |               |        |        |        |        |        |       |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                | <b>Pie</b>    | -      | -      | -      | -      | -      | -     |
| <b>PILA 8</b>  | <b>Cabeza</b> | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m |
|                | <b>Cuerpo</b> | 10.00m | 10.00m | 10.00m | 5.51m  | 5.00m  | 2.00m |
|                | <b>Pie</b>    | 16.54m | 7.32m  | 0.77m  | -      | 4.89m  | 0.96m |
| <b>PILA 9</b>  | <b>Cabeza</b> | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m |
|                | <b>Cuerpo</b> | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 15.00m | 7.00m |
|                | <b>Pie</b>    | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 5.00m  | 3.00m |
| <b>PILA 10</b> | <b>Cabeza</b> | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m  | 5.00m |
|                | <b>Cuerpo</b> | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 23.00m | 15.00m | 7.00m |
|                | <b>Pie</b>    | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 15.00m | 5.00m  | 3.00m |

**Tabla 2 - Longitudes de las pilas**

La separación de las pilas será:

- 43.50 metros, para el arco de 300m.
- 30.00 metros, para el arco de 200m.
- 15.00 metros, para el arco de 100m.

En la siguiente figura, se muestra la modelización de dichas pilas en el programa MIDAS, para el modelo arco de 300m y la relación flecha/luz de 1/7.07.



**Figura 3.14 – Modelización de las pilas en MIDAS para el arco de 300m de luz y f/l de 1/7.07**

### 3.4. Construcción del arco

Para la construcción de los arcos, se van a ajustar las secciones de este de forma que, el axil les produzca las mismas tensiones a los diferentes arcos y manteniendo las rigideces a flexión en el plano y a torsión, todo ello con el ánimo de poder comparar los resultados.

- Para el puente arco de luz 300m y las diferentes relaciones  $f/L$ , las secciones de los arcos serán las siguientes:

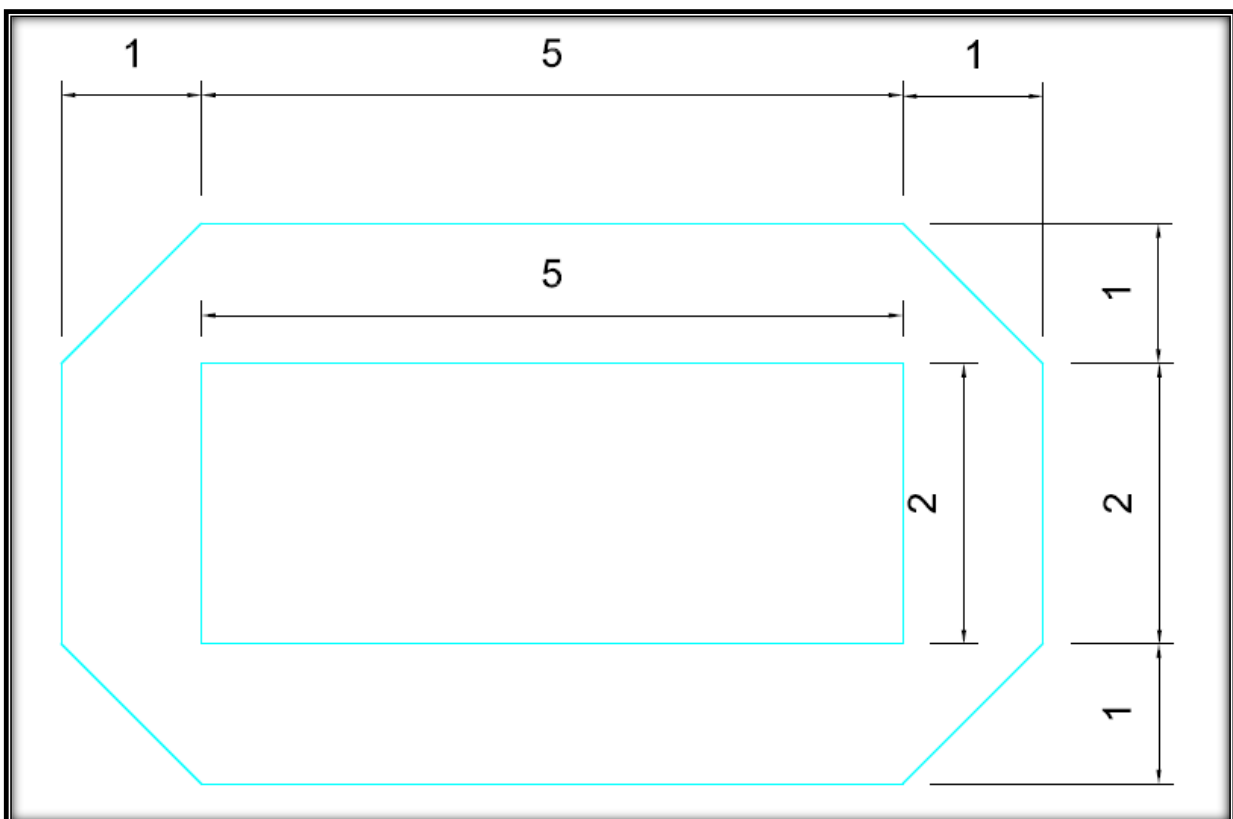
| Caso | $f/L$  | L   | f      | H    | B     | tw   | tf   | Area   | $\sigma_{xx}/P$ | b     | h    | $I_{xx}$ | $I_{zz}$   | $I_{yy}$ |
|------|--------|-----|--------|------|-------|------|------|--------|-----------------|-------|------|----------|------------|----------|
| 1    | 1/7,07 | 300 | 42.464 | 4.00 | 7.00  | 1.00 | 1.00 | 16.000 | 16.56           | 5.00  | 2.00 | 28.57143 | 93.50000   | 34.000   |
| 2    | 1/5    | 300 | 60.000 | 4.86 | 5.10  | 1.00 | 0.50 | 11.324 | 16.56           | 3.11  | 3.86 | 28.57143 | 44.23920   | 34.000   |
| 3    | 1/10   | 300 | 30.000 | 3.45 | 10.49 | 1.40 | 1.00 | 22.647 | 16.56           | 7.69  | 1.45 | 28.57143 | 277.08146  | 34.000   |
| 4    | 1/15   | 300 | 20.000 | 2.85 | 18.30 | 1.75 | 0.90 | 33.971 | 16.56           | 14.81 | 1.05 | 28.57143 | 1172.89173 | 34.000   |

**Tabla 3 - Secciones arco de luz 300m**

Como se puede observar en la anterior tabla, las tensiones normales a la sección  $\sigma_{xx}$  es la misma para todas las relaciones  $f/L$ , al igual que el momento de inercia a torsión  $I_{xx}$  y el momento de inercia longitudinal  $I_{yy}$ , no ocurre lo mismo con el momento de inercia transversal  $I_{zz}$ .

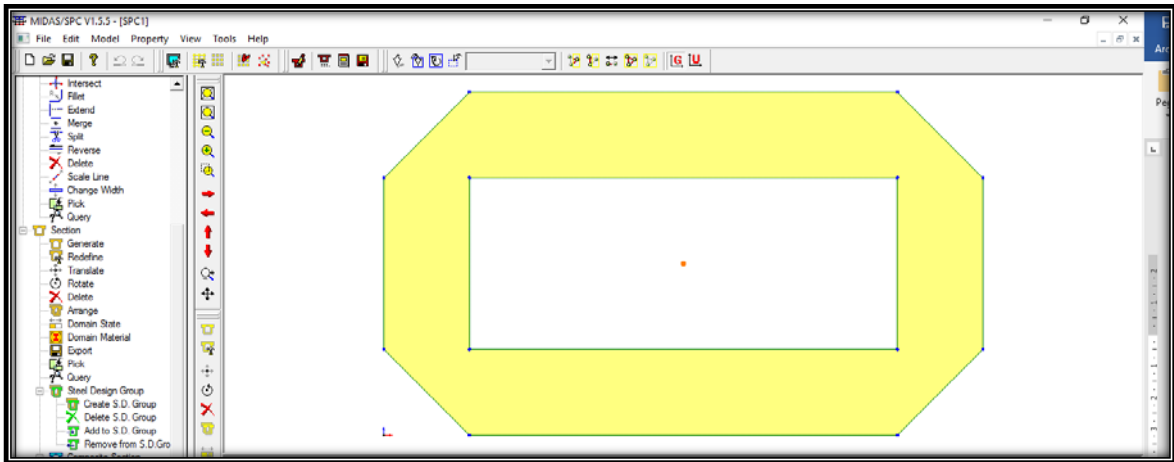
Para obtener las mencionadas secciones, se utiliza una hoja de cálculo EXCEL y mediante un proceso iterativo se obtienen las diferentes áreas de las secciones, para las relaciones  $f/L$  estudiadas.

A continuación, se muestra la sección creada mediante el software AUTOCAD.



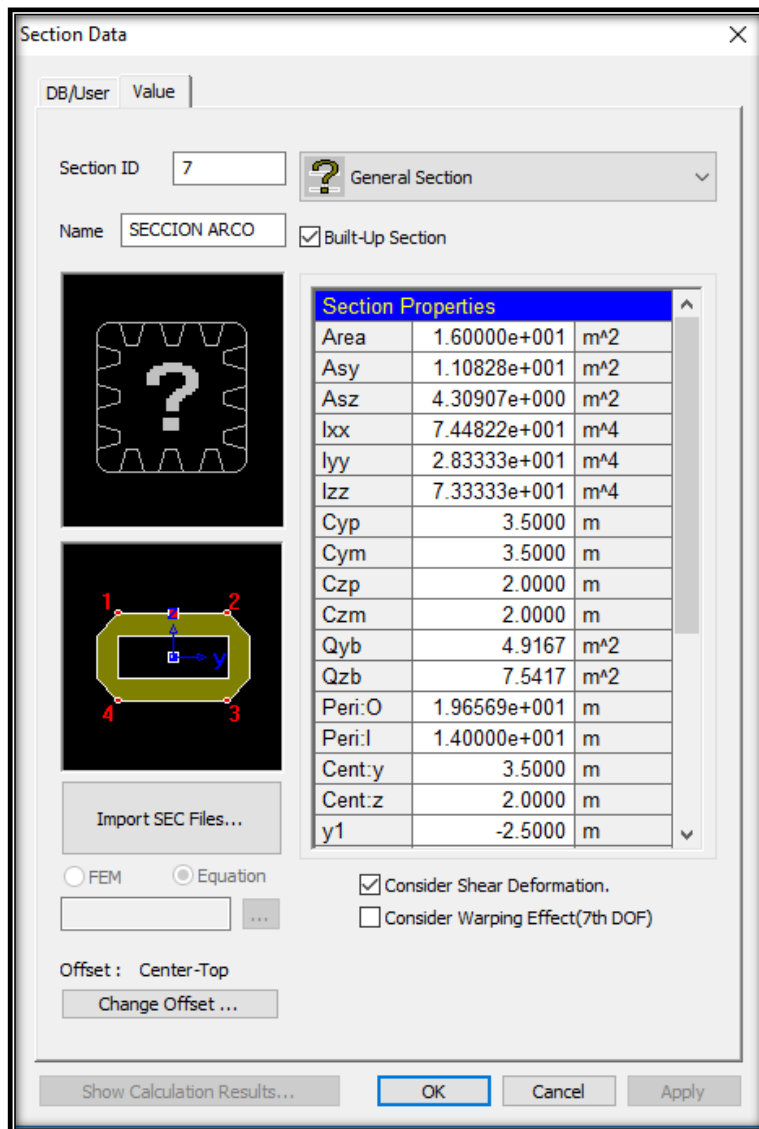
**Figura 3.15 – Sección para arco de 300m de luz y relación  $f/L$  de 1/7.07**

Se utilizará de apoyo el software SPC, para cambiar la extensión del archivo AUTOCAD donde se ha creado la sección, y más tarde poder importarlo desde MIDAS.



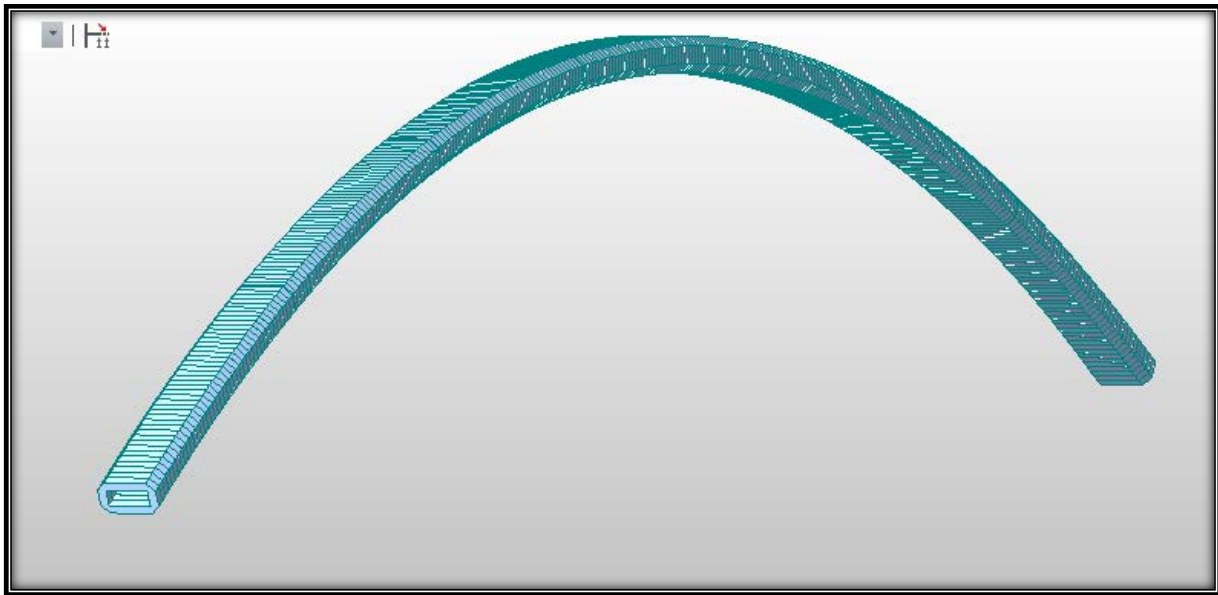
**Figura 3.16 – Sección importada en SPC**

Una vez creado el archivo con SPC, se procede a importarlo desde el software MIDAS.



**Figura 3.17 – Sección importada en MIDAS**

Finalmente se crea el arco con la luz y flecha deseados, en este caso que se muestra el arco con una luz de 300 metros y la relación flecha/luz de 1/7.07.



**Figura 3.18 - Arco de 300m de luz con relación f/L de 1/7.07**

Este proceso, se repetirá para cada uno de los modelos, objetos del presente estudio.

- Para el puente arco de luz 200m y la relación 1/7.07, las secciones de los arcos serán las siguientes:

| Caso | f/L    | L   | f      | H    | B    | tw   | tf   | Área   | $\sigma_{xx}/P$ | b    | h    | I <sub>xx</sub> | I <sub>zz</sub> | I <sub>yy</sub> |
|------|--------|-----|--------|------|------|------|------|--------|-----------------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1/7,07 | 200 | 28.309 | 3.98 | 6.08 | 1.29 | 0.28 | 10.667 | 16.56           | 3.50 | 3.42 | 19.04762        | 62.33333        | 20.347          |

**Tabla 4 - Secciones arco de luz 200m**

Para este modelo se mantendrá la tensión normal a la sección  $\sigma_{xx}$ , del modelo de luz de arco de 300 metros. El momento de inercia a torsión I<sub>xx</sub> y el momento de inercia transversal I<sub>zz</sub>. son 2/3 de los valores obtenidos para el puente con una luz de arco de 300 metros, esta relación se basa en la relación entre la luz de los arcos 200m/300m.

- Para el puente arco de luz 100m y la relación 1/7.07, las secciones de los arcos serán las siguientes:

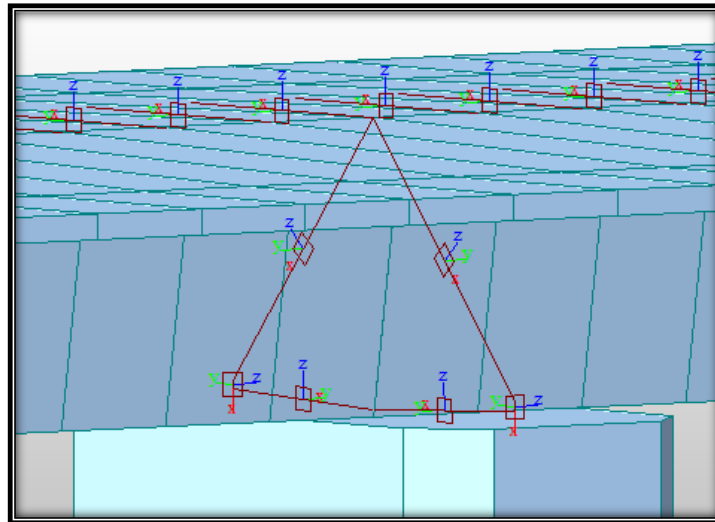
| Caso | f/L    | L   | f      | H    | B    | tw   | tf   | Área  | $\sigma_{xx}/P$ | b    | h    | I <sub>xx</sub> | I <sub>zz</sub> | I <sub>yy</sub> |
|------|--------|-----|--------|------|------|------|------|-------|-----------------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1/7,07 | 100 | 14.155 | 3.61 | 5.49 | 0.72 | 0.12 | 5.333 | 16.56           | 4.04 | 3.37 | 9.52381         | 31.16667        | 8.571           |

**Tabla 5 - Secciones arco de luz 100m**

Para este modelo se mantendrá la tensión normal a la sección  $\sigma_{xx}$  del modelo de luz de arco de 300 metros. El momento de inercia a torsión I<sub>xx</sub> y el momento de inercia transversal I<sub>zz</sub>. son 1/3 de los valores obtenidos para el puente con una luz de arco de 300 metros, esta relación se basa en la relación entre la luz de los arcos 100m/300m.

### 3.5. Aparatos de apoyo tipo POT (Neoprenos)

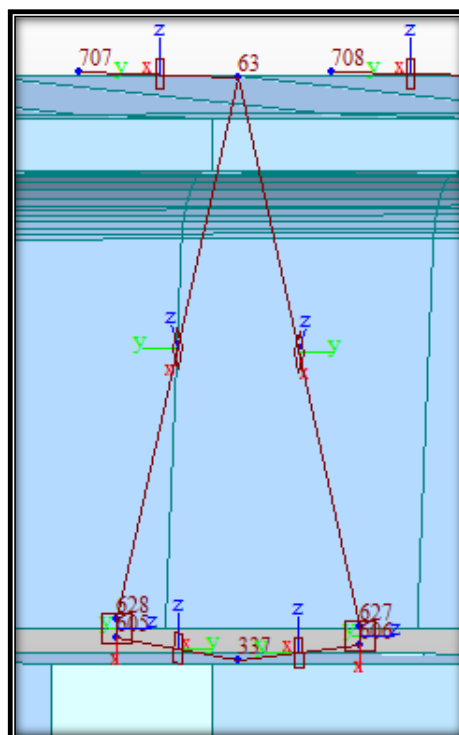
Se utilizarán los elementos Elastick link, a los que se les asignará unas rigideces, para modelizar la unión del tablero con las pilas, es decir, para representar los aparatos de apoyo o neoprenos (Rombach <sup>12</sup>).



**Figura 3.19 - Elastick link pila-tablero**

Las uniones de los nudos 63-628, 63-627, 337-605 y 337-606, se modeliza como una union solidorigido.

A las uniones 628-605 y 627-606, se les da un valor de:  $1 \cdot 10^6$  KN/m en la direccion X y de en  $1 \cdot 10^6$  KN/m el eje X e Y, respectivamente. Estos valores representan las rigideces de los neoprenos.



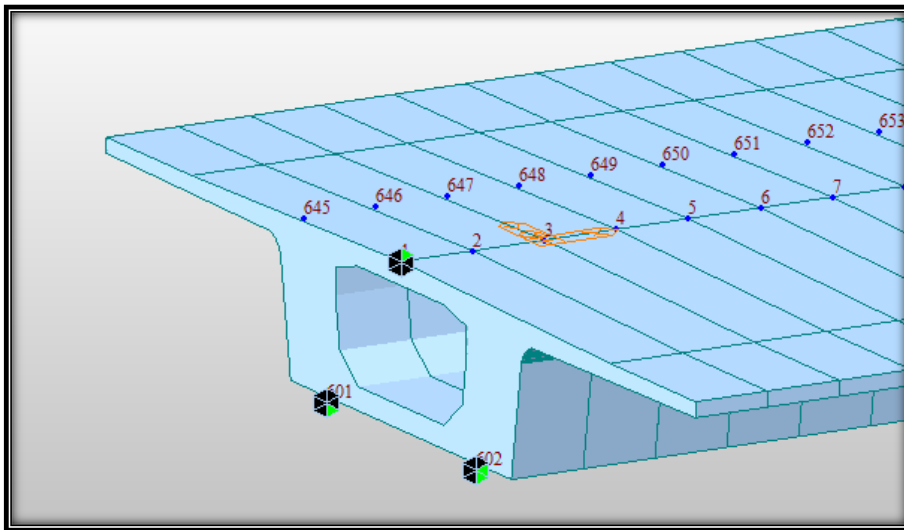
**Figura 3.20 - Elastick Link pila-tablero**

### 3.6. Condiciones de contorno

Para finalizar los modelos, a falta de definir las cargas y los trenes HSLM, hay que establecer las condiciones de contorno, las cuales serán las mismas para todos los modelos objeto de estudio.

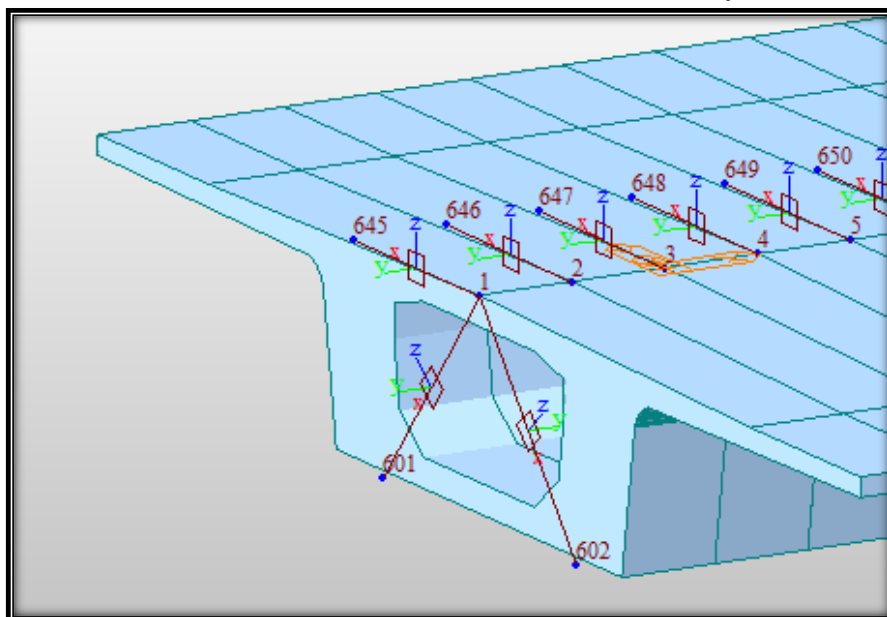
Se procede a definir las diferentes condiciones de contorno:

- Tablero: para que el puente no se comporte como un mecanismo, en el apartado anterior se han restringido los desplazamientos relativos entre el tablero y el arco. Si no se hubieran restringido dichos desplazamientos, habría que restringir los desplazamientos en el eje X (eje longitudinal del tablero) en el nudo 1.



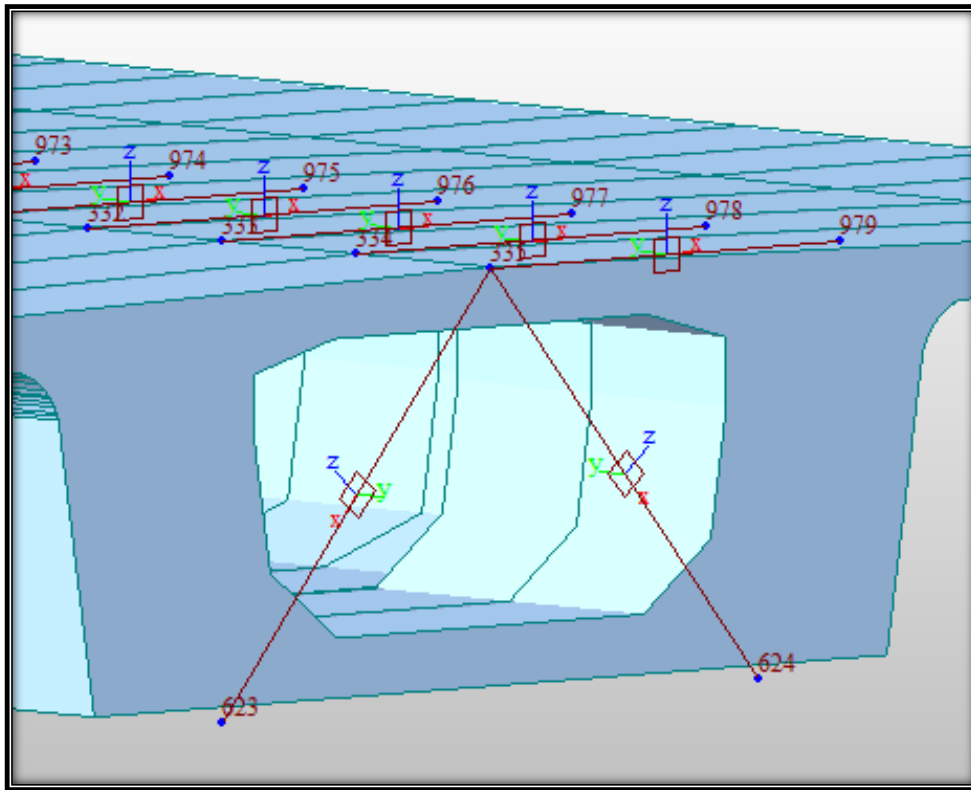
*Figura 3.21 – Condición de contorno 1*

- Tablero-estribos: se define la condición de solido-rígido, del tablero con los estribos, mediante elementos Elastick Link, entre los nudos: 1-601, 1-602, 335-623 y 335-624.



*Figura 3.22 – Elastick link tablero-estribo inicial*



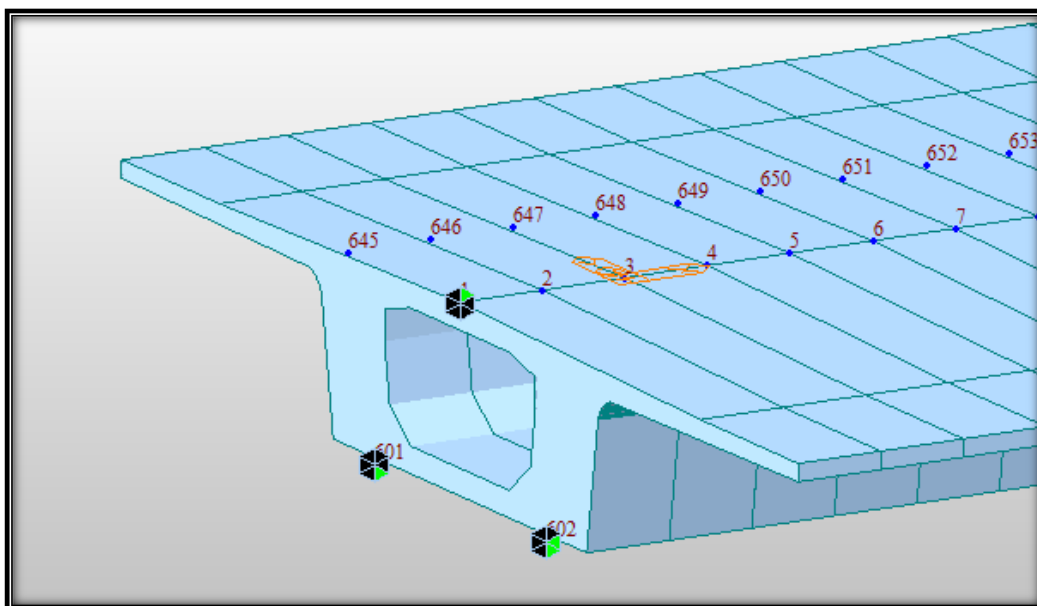


*Figura 3.23 – Elastic link tablero-estribo final*

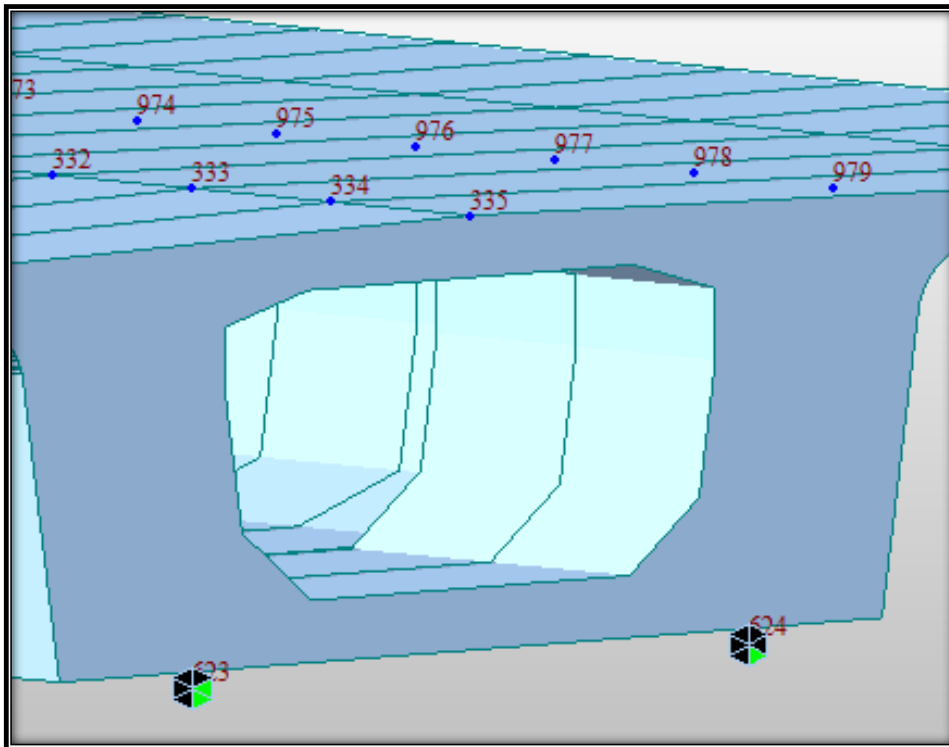
Se establece las condiciones de contorno de esos nudos inferiores:

En los nudos 602 y 623 se restringen los desplazamientos en el eje vertical al tablero Z y en el eje Y transversal al tablero, comportándose, así como un apoyo unidireccional.

En los nudos 601 y 624 se restringen los desplazamientos verticales sobre el eje Z, siendo así un apoyo multidireccional.

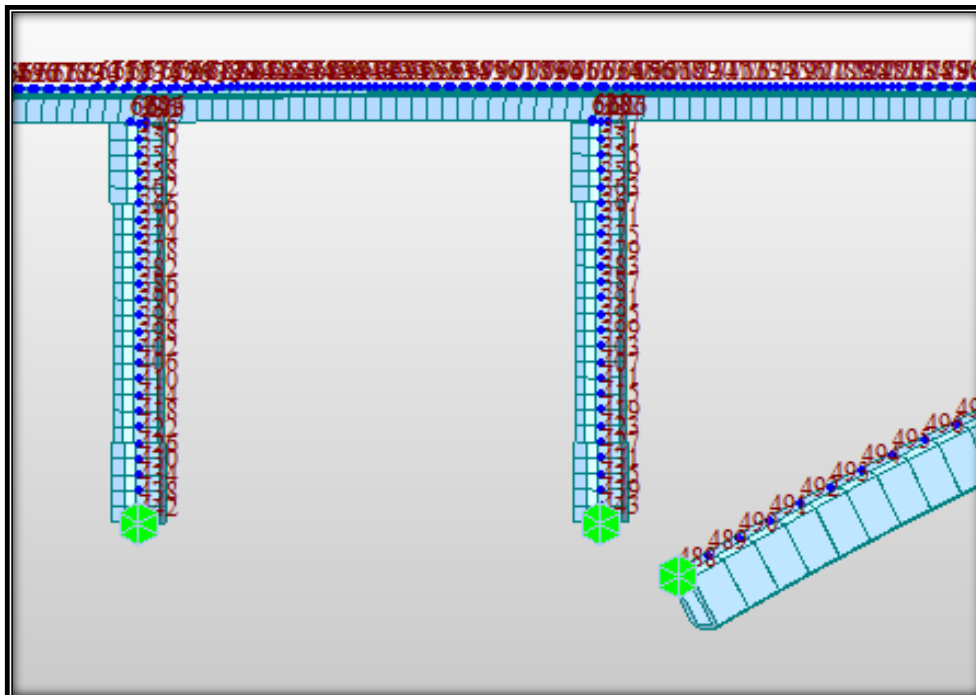


*Figura 3.24 – Condiciones de contorno estribo inicial*



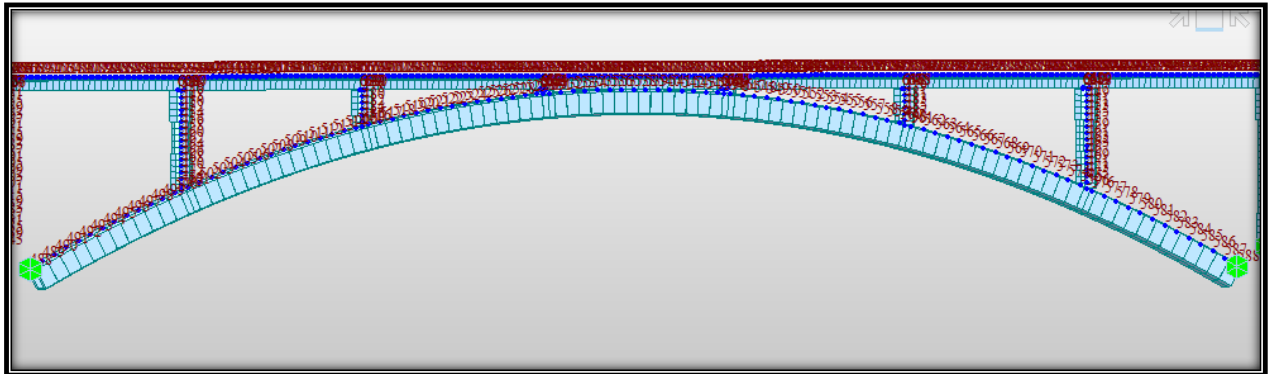
*Figura 3.25 – Condiciones de contorno estribo final*

- Pilas: la condición de contorno establecida, para las pilas 1,2,9,10 que son las que están en contacto con el terreno, son las restricciones de todos sus desplazamientos y giros, es decir, el empotramiento sobre el terreno del nudo que está en contacto con dicho terreno.



*Figura 3.26 - Condiciones de contorno de las pilas*

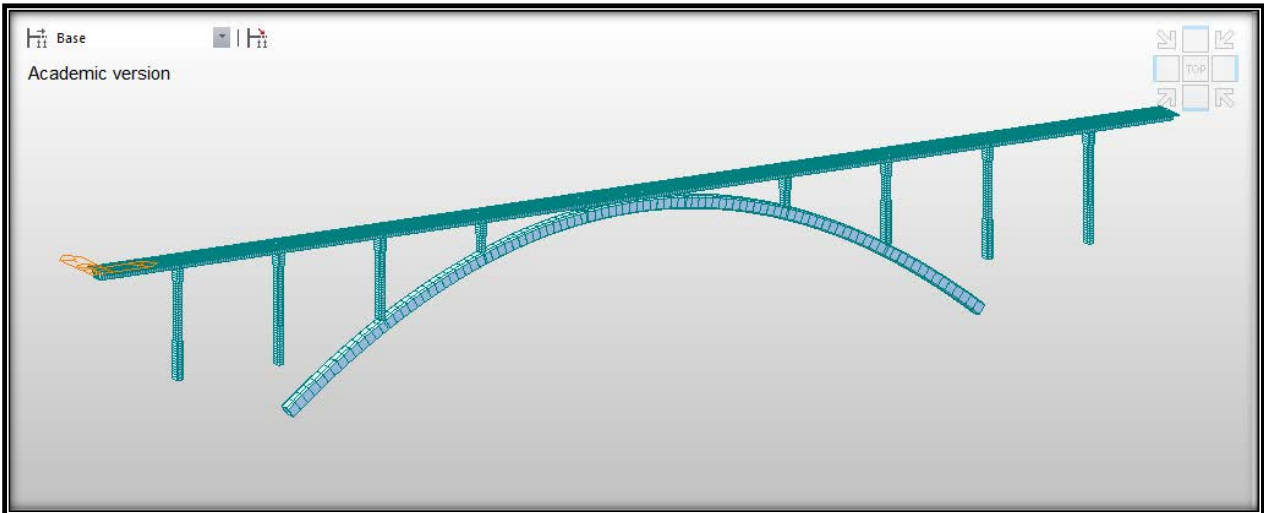
- Arco: de igual forma que para las pilas, la condición de contorno establecida para el arco, es el empotramiento de este sobre el terreno, restringiendo todos sus desplazamientos y giros en los nudos que están en contacto con el terreno.



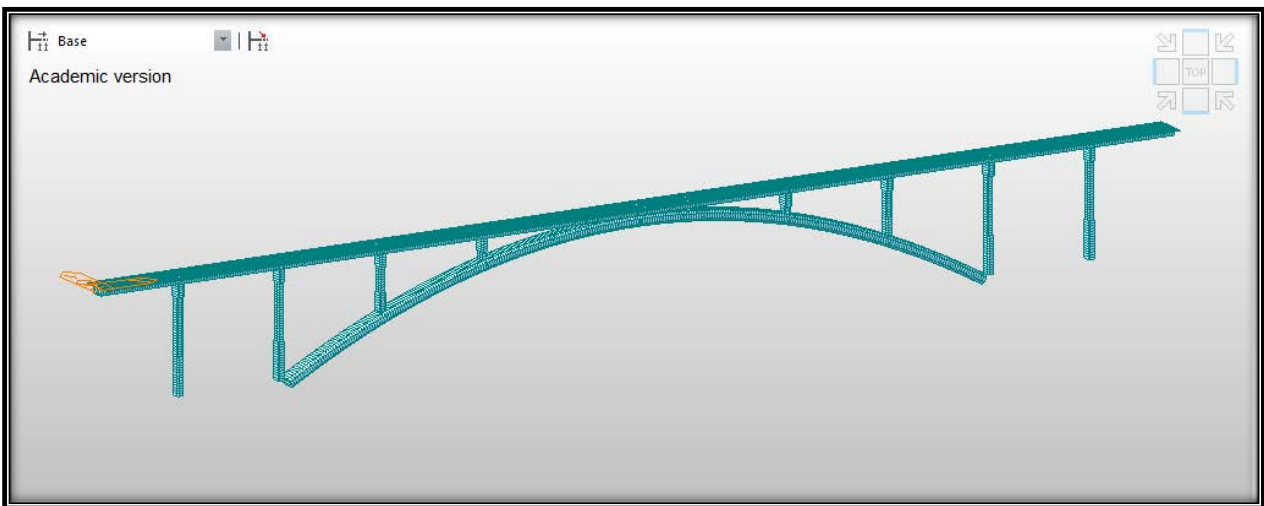
*Figura 3.27 - Condiciones de contorno del arco*

### 3.7. Modelos

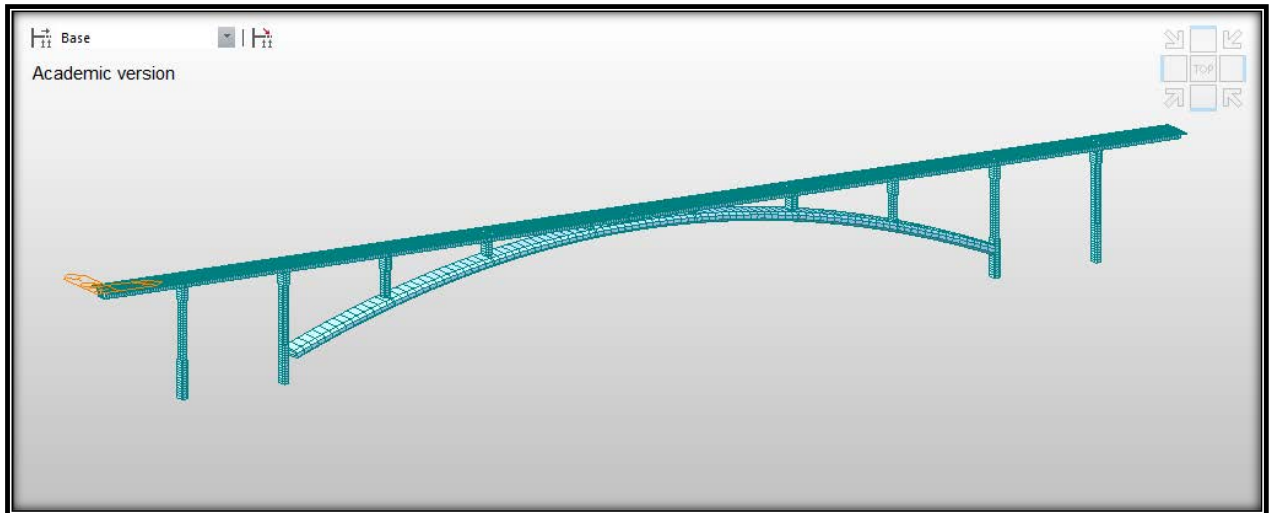
A continuación, se muestran los 6 modelos obtenidos, para el estudio dinámico el cual es el objetivo del presente trabajo fin de master.



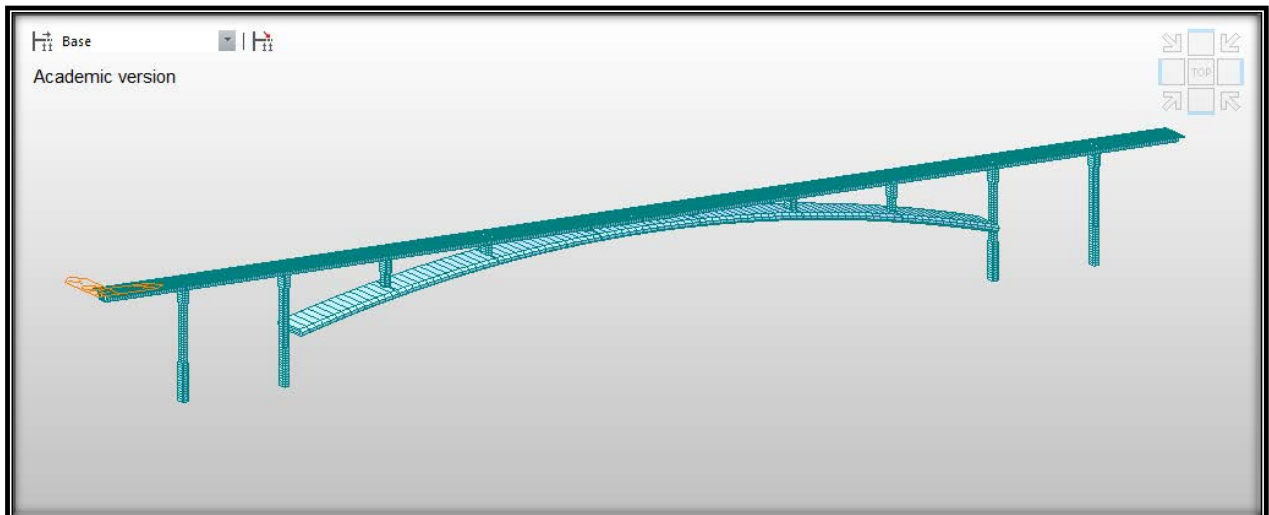
*Figura 3.28 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/5*



*Figura 3.29 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/7.07*



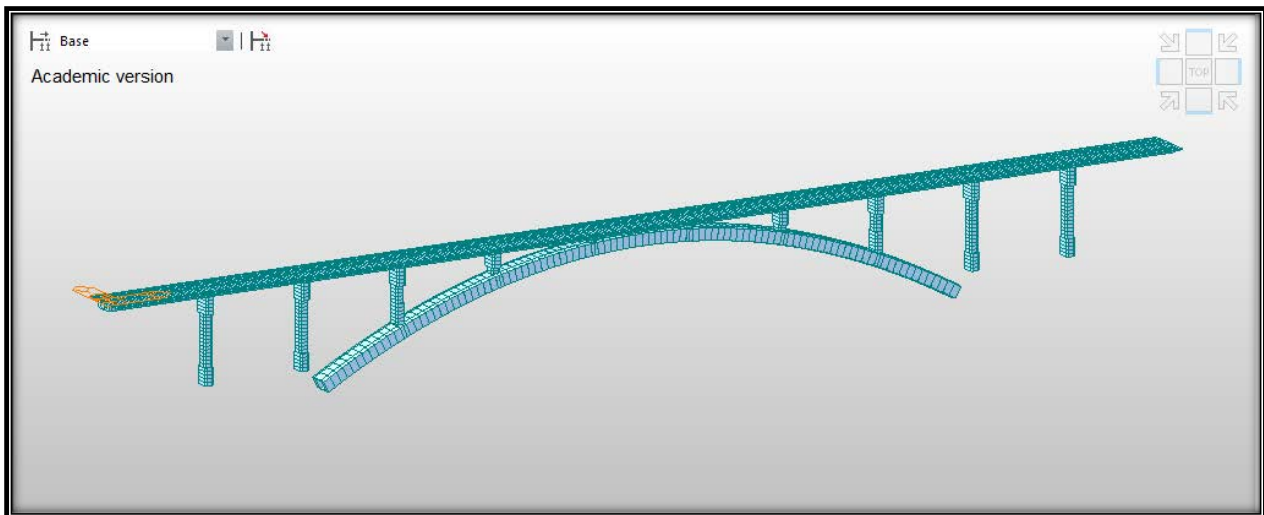
*Figura 3.30 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/10*



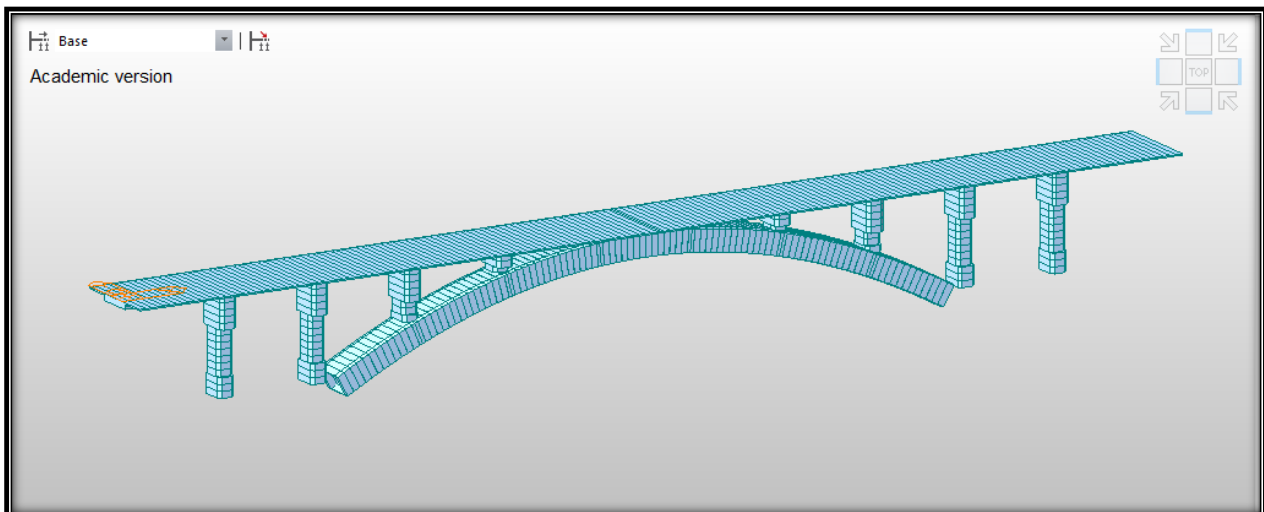
*Figura 3.31 - Modelo arco con luz de 300m y relación flecha/luz de 1/15*

Como se puede observar en estos 4 modelos, donde la luz del arco es de 300m, la variación que se da entre los modelos, es el cambio de sección del arco en función de la relación flecha/luz. El área de dicho arco, ira aumentando a medida que disminuye la relación flecha/luz. También variaran las alturas de las pilas que están en contacto con el arco.

A continuación, se muestran los modelos de arco con una luz de 200m y 100m y ambos modelos con una relación de flecha/luz de 1/7.07.



*Figura 3.32 - Modelo arco con luz de 200m y relación flecha/luz de 1/7.07*



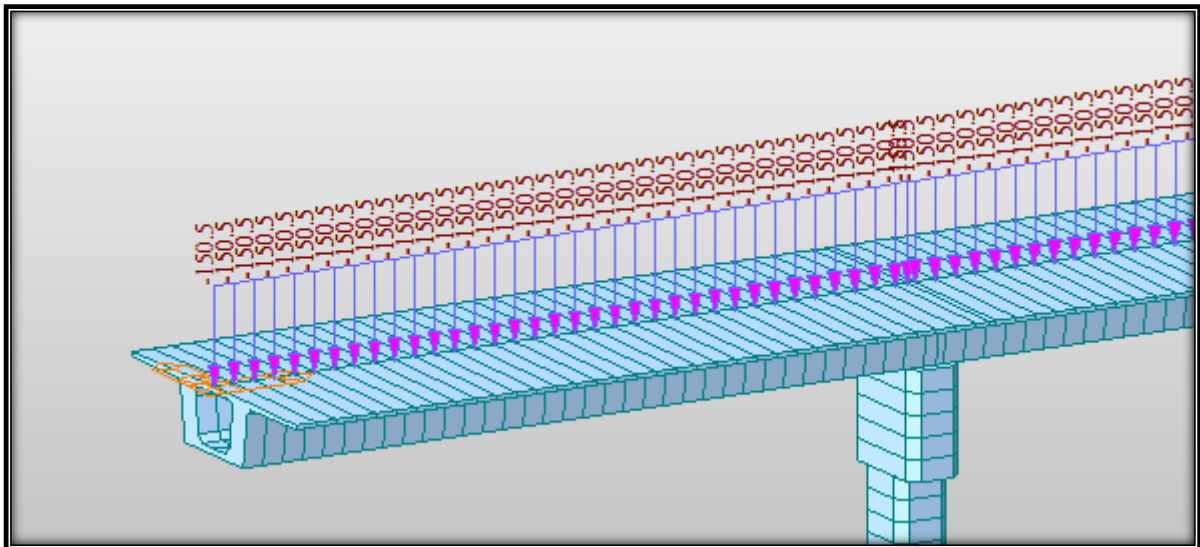
*Figura 3.33 - Modelo arco con luz de 100m y relación flecha/luz de 1/7.07*

### 3.8. Definición de las cargas

En el estudio, se está tratando el efecto dinámico del paso del ferrocarril sobre un puente tipo arco de tablero superior y en el modelo se incluyen las masas correspondientes a las siguientes acciones:

- El peso propio de la estructura, el cual queda definido por el peso específico del hormigón,  $25\text{KN/m}^3$ , y la definición de las secciones del tablero, los pilares y el arco.
- Las cargas muertas o permanentes, que en este caso son las siguientes:
  - Balasto:  $123.23\text{ KN/m}$
  - Traviesas:  $6.7\text{ KN/m}$
  - Carriles:  $1.18\text{ KN/m}$
  - Muretes guardabalasto:  $5\text{ KN/m}$
  - Canaletas:  $3.78\text{ KN/m}$
  - Impostas:  $9.59\text{ KN/m}$
  - Barandilla:  $1.02\text{ KN/m}$

La suma de estas cargas es de  $150,5\text{ KN/m}$  y se distribuyen a lo largo de todo el tablero del puente.



*Figura 3.34 - Distribución de cargas muertas a lo largo del tablero.*

- Sobrecargas de uso ferroviario. En este caso se ha utilizado el tren de cargas HSLM, con sus 10 posibles combinaciones, recogido en la normativa EN 1991-2:2003 <sup>11</sup> y también utilizada en la normativa española IAPF-07 <sup>10</sup>. Este tren dinámico, permite garantizar resultados envolventes de los efectos dinámicos producidos por los trenes de alta velocidad.

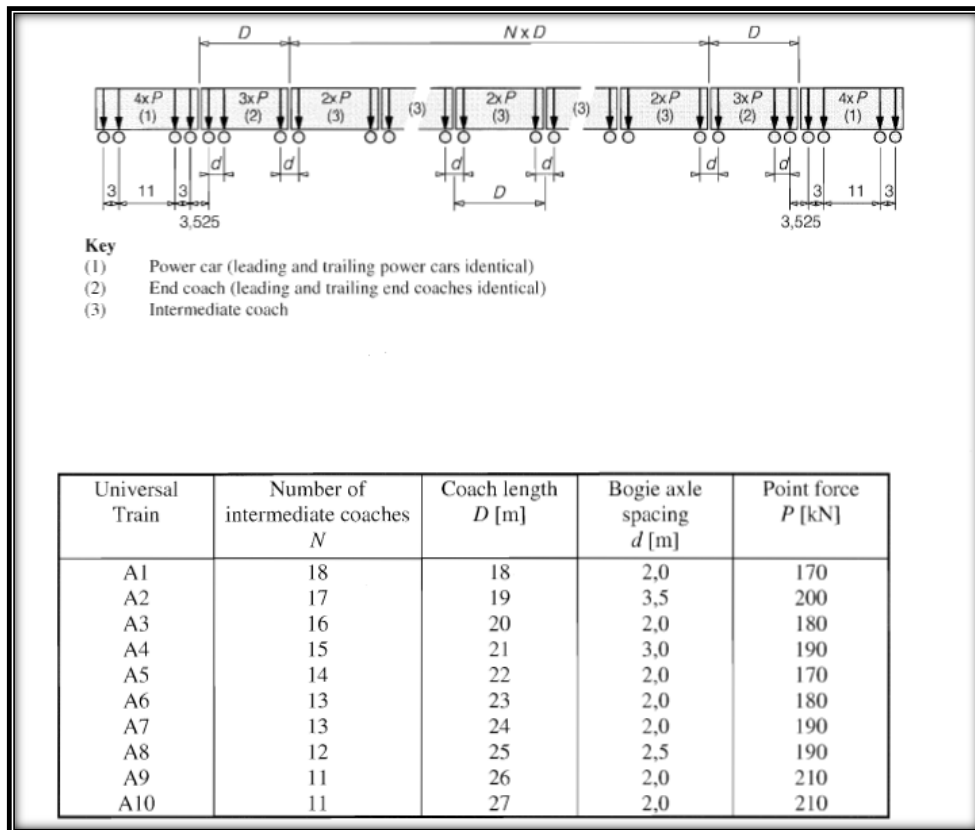


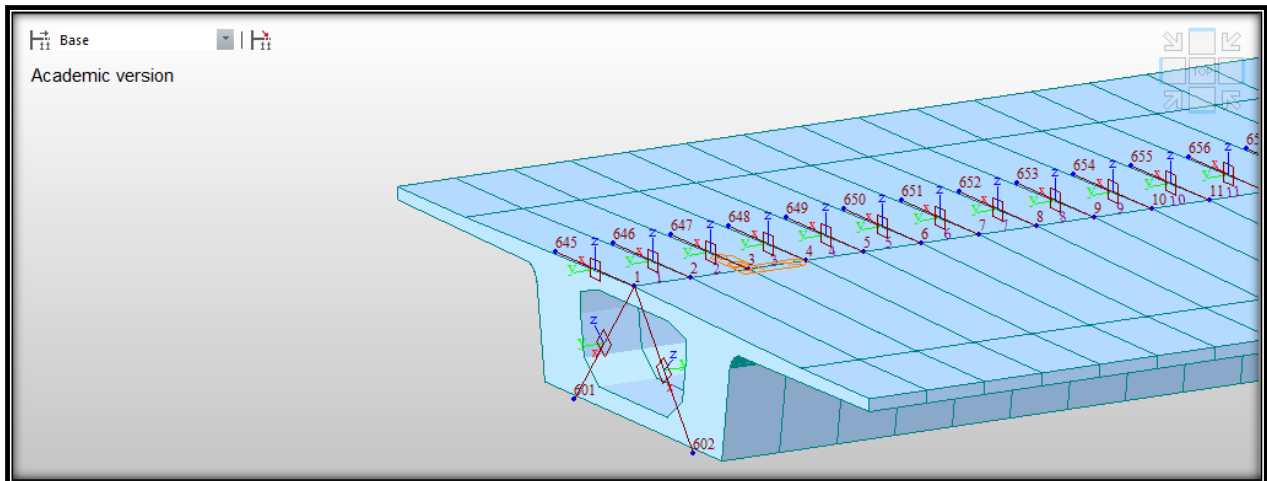
Figura 3.35 – Trenes de carga. Fuente: Normativa EN 1991-2:2003<sup>11</sup>

| TREN       | VAGONES (ud) | LONGITUD VAGON (m) | SEPARACION ENTRE EJES (m) | PESO VAGON (kn) | PESO TOTAL (kn) | LONGITUD TOTAL (m) |
|------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| A1         | 18           | 18                 | 2                         | 170             | 8500            | 397.525            |
| <b>A2</b>  | 17           | 19                 | <b>3.5</b>                | 200             | <b>9600</b>     | <b>398.525</b>     |
| A3         | 16           | 20                 | 2                         | 180             | 8280            | 397.525            |
| A4         | 15           | 21                 | 3                         | 190             | 8360            | 394.525            |
| A5         | 14           | 22                 | 2                         | 170             | 7140            | 389.525            |
| A6         | 13           | 23                 | 2                         | 180             | 7200            | 382.525            |
| A7         | 13           | 24                 | 2                         | 190             | 7600            | 397.525            |
| <b>A8</b>  | 12           | 25                 | 2.5                       | 190             | 7220            | 387.525            |
| A9         | 11           | 26                 | 2                         | 210             | 7560            | 375.525            |
| <b>A10</b> | 11           | <b>27</b>          | 2                         | <b>210</b>      | 7560            | 388.525            |

Tabla 6 – Características de cada tren HSLM



Para simular el paso de los trenes, sobre el tablero, habrá que definir una línea de puntos a 2.35m del eje del tablero, dicha distancia es establecida para hacer rodar el tren de cargas HSLM, por el eje central del carril. Además, para establecer la condición de solido-rígido entre el tablero y este eje, hay que definir, lo que ya se ha definido con anterioridad como Elastick Link.



*Figura 3.36 - Eje de paso tren de cargas HSLM*

La acción dinámica producida por el paso de los trenes, que se corresponde con el “High Speed Load Model” (HSLM), está compuesto por una serie de trenes ficticios. Esta es la acción recomendada por las normativas europeas para el diseño de las nuevas líneas de ferrocarril, y está incorporada en los distintos códigos EN 1991-2:2003 <sup>11</sup> e IAPF-07 <sup>10</sup>. Queda definido por la acción conjunta de una familia de 10 trenes articulados. Cada tren está formado por dos locomotoras y un cierto número de coches de pasajeros, con cargas iguales en todos los ejes según la figura 3.35. La familia se obtiene variando el número de coches, la distancia entre ejes de los bogies y las cargas por eje, según se indica en la figura 3.35. Se considera una velocidad de proyecto de 350 Km/h y en consecuencia se hace un barrido de velocidades de 20 a 420 km/h (1.2 veces la velocidad de proyecto) para cada una de esas composiciones.

Para simular las cargas del tráfico se usan los nudos que se encuentran bajo la vía, disponiendo sobre cada uno de ellos una carga proporcional a la que recibe de la traviesa. Para ello se supone que la traviesa reparte la carga que recibe del eje de forma uniforme al balasto. Este tipo de reparto de cargas es el que se usa habitualmente en las fases de proyecto de las estructuras y es el que propone IAPF-07 para el reparto local de cargas.

Con este criterio se calcula la carga que se debe disponer sobre cada nudo para conseguir que la suma total sea la unidad y sean proporcionales a la carga recibida. Por otro lado, se genera una función de carga temporal para cada tren y cada velocidad de cálculo, es decir, un total de 410 funciones de carga. Cada función de carga temporal se compone de una sucesión de rampas de subida de carga y rampas de bajada de carga que representan el reparto longitudinal de cada carga

móvil entre la sección de cálculo y sus colindantes. El intervalo de tiempo que transcurre desde que se inicia un triángulo de carga hasta el siguiente, y así su posible solapamiento, lo determina la distancia entre ejes de la composición y la velocidad de paso. Se genera un caso de carga con las cargas puntuales de cada sección y a ese caso de carga se le aplica cada función temporal de carga con un desfase respecto de la sección anterior, o un tiempo de llegada respecto de la sección inicial, que se evalúa de acuerdo con su posición en el viaducto y la velocidad de paso del tren. Así, cuando una carga móvil supera una determinada sección, comienza la rampa de subida correspondiente de la sección siguiente. Con todos los casos de carga de todas las secciones correspondientes a una misma función de carga, es decir, a un mismo paso de tren y una misma velocidad, se genera un análisis transitorio, del que se obtendrán las velocidades y aceleraciones de todos los puntos del tablero.

## 4. RESULTADOS

---

Llegado este punto del estudio, se procede a la obtención de los resultados de los diferentes modelos. Para ello se procesan los modelos en MIDAS, obteniendo los desplazamientos verticales máximos y las aceleraciones máximas, dichos datos se exportan a una hoja EXCEL para procesarlos y obtener así las gráficas, para obtener los datos de cada modelo, recordando que se procesan 6 modelos y 10 trenes de cargas para cada modelo.

Cabe destacar, que en las gráficas se muestran los máximos valores que se obtienen, es decir, para el modelo arco de 300 metros de luz y relación flecha/luz de 1/5, se muestran los máximos desplazamientos y aceleraciones. De entre los 462 puntos (la longitud del tablero de 462 metros), para cada velocidad desde los 20 km/h hasta los 420 km/h en intervalos de 10 km/h, se obtienen los desplazamientos verticales máximos y las aceleraciones máximas, que son los datos que interesan para el estudio.

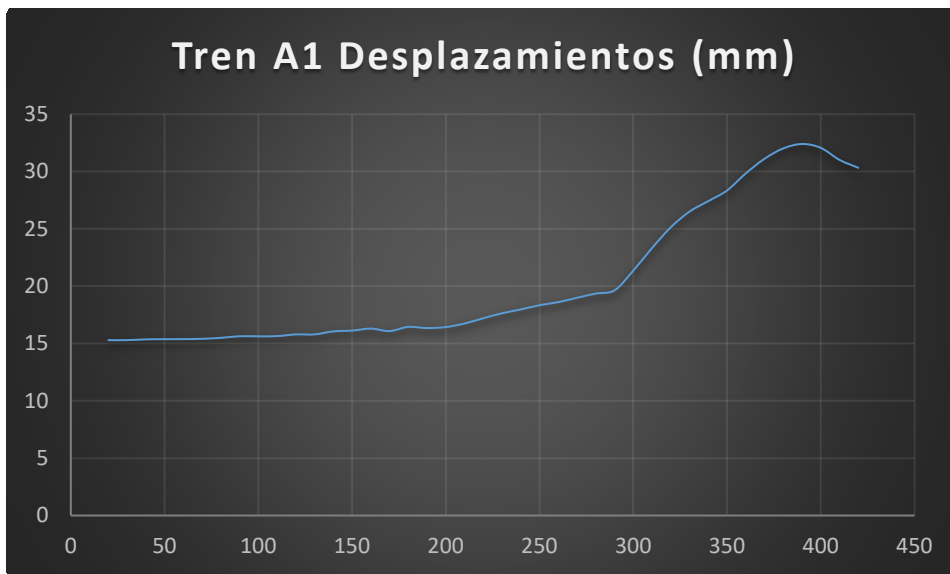
Todas las gráficas mostradas en los siguientes puntos 4.1, 4.2 y 4.3 serán comparadas y analizadas en el punto 4.4, para darle una mejor comprensión a los resultados obtenidos.

## 4.1. Modelo Arco de 300m de luz

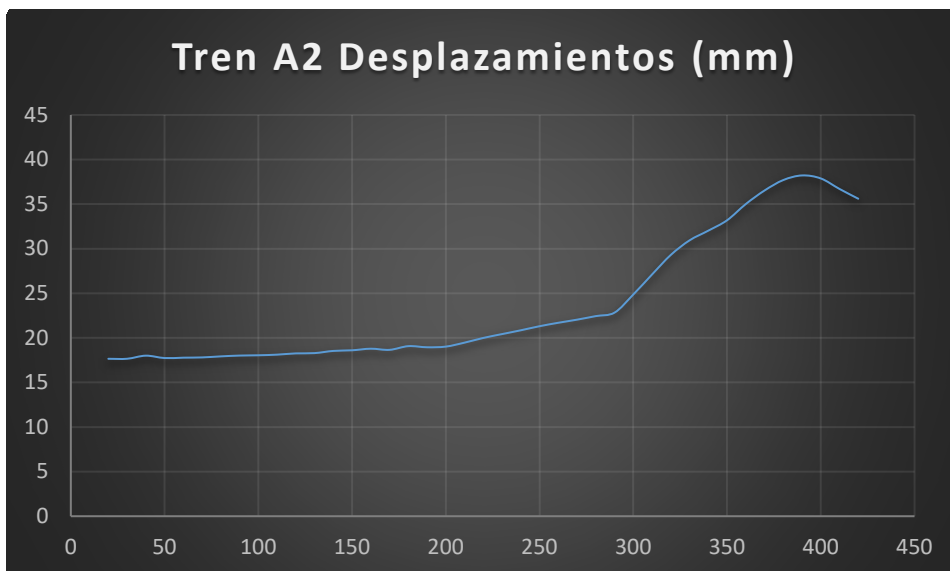
### 4.1.1. Modelo relación flecha-luz 1/5

- Desplazamientos verticales máximos

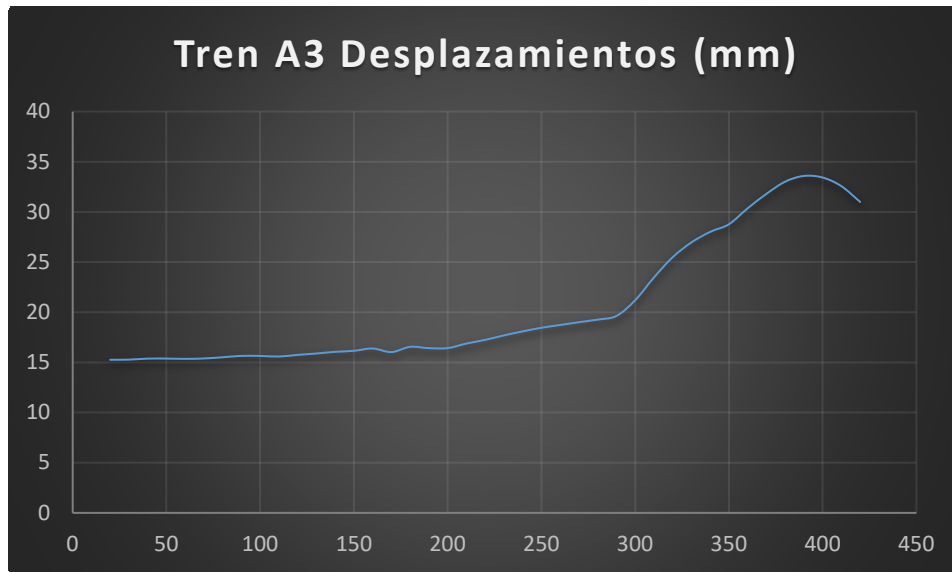
En las siguientes gráficas, se podrá ir observando: los desplazamientos en milímetros en el eje de ordenadas y en el eje de abscisas las velocidades de los pasos del tren en km/h.



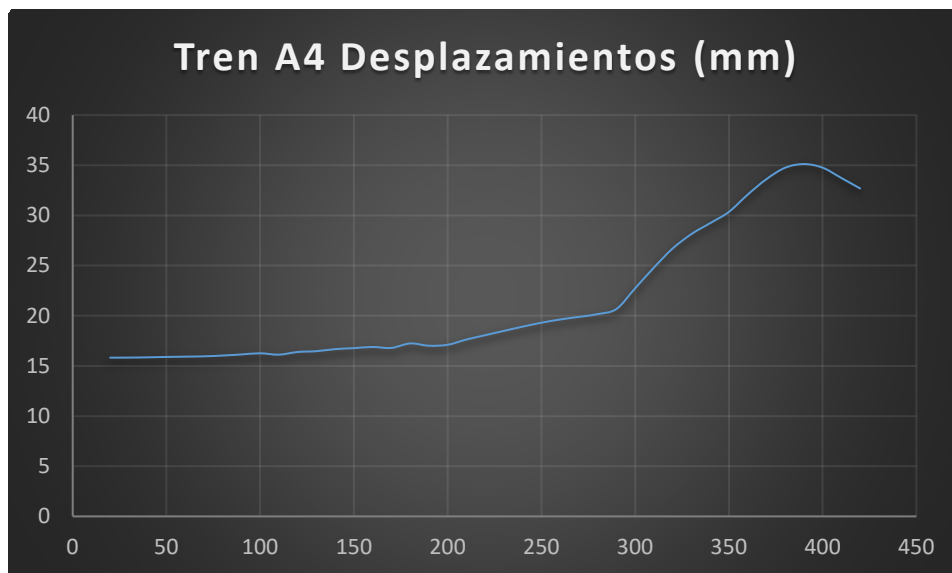
*Figura 4.1 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



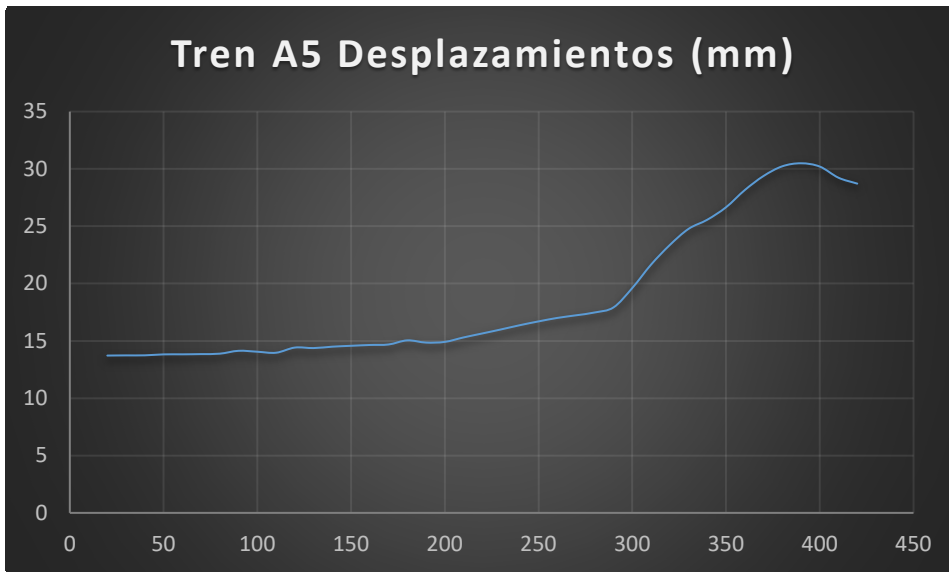
*Figura 4.2 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



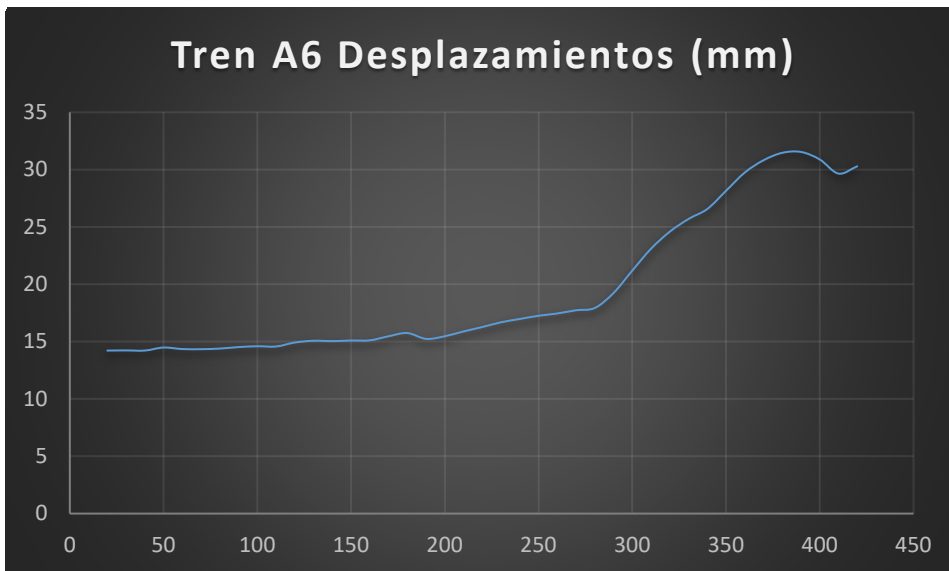
*Figura 4.3 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



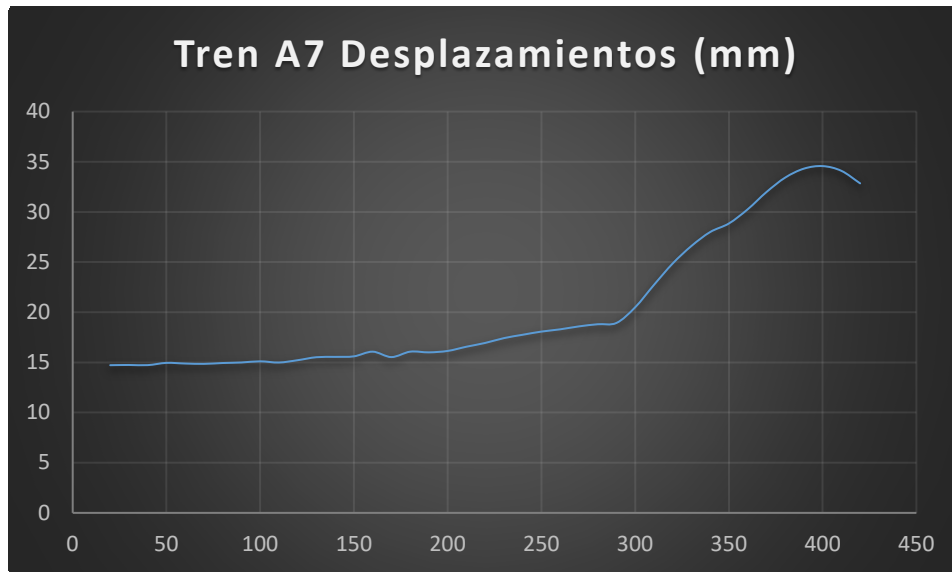
*Figura 4.4 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



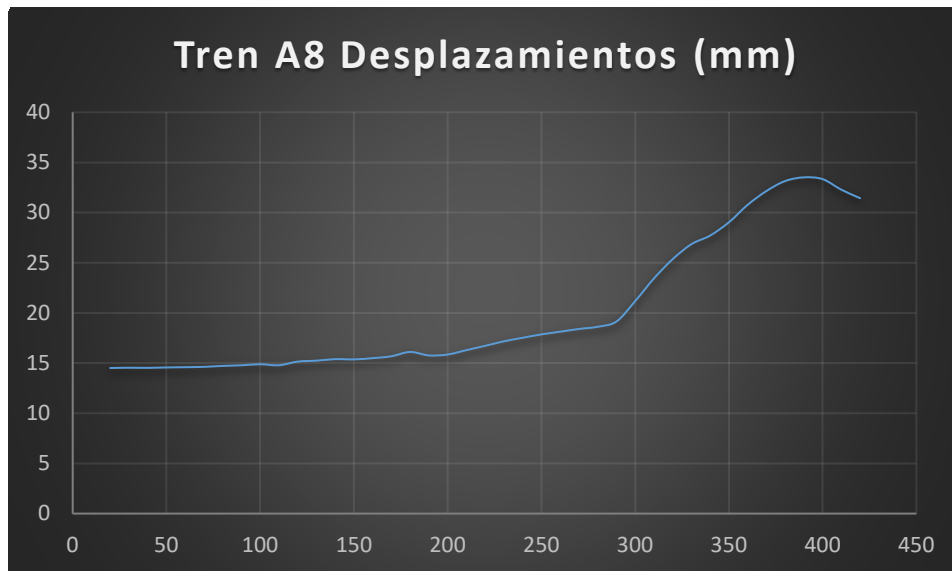
*Figura 4.5 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



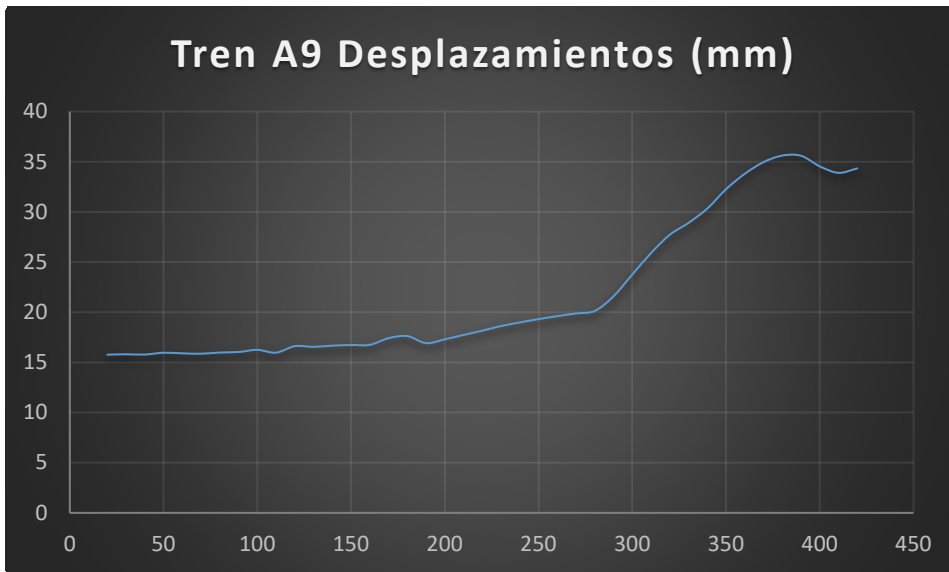
*Figura 4.6 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



*Figura 4.7 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



*Figura 4.8 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



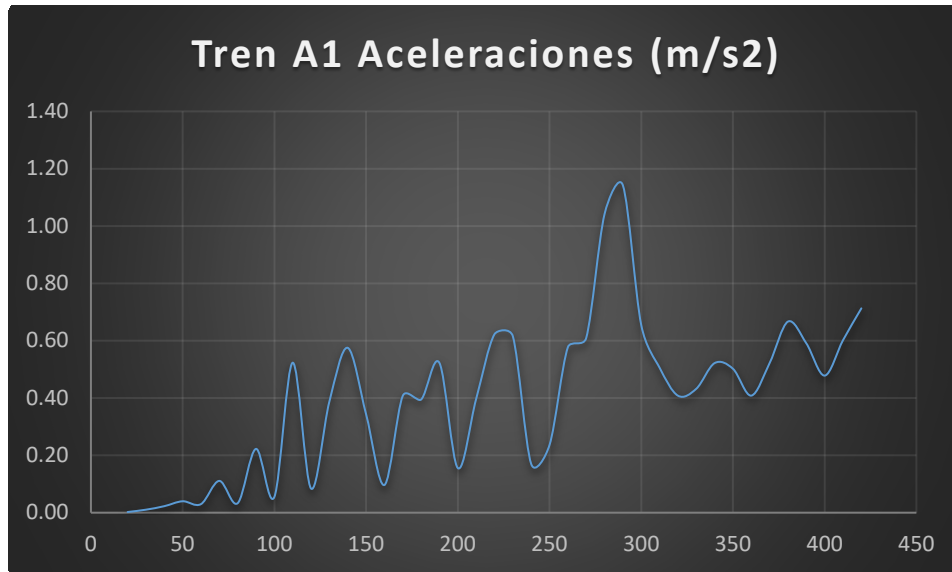
*Figura 4.9 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



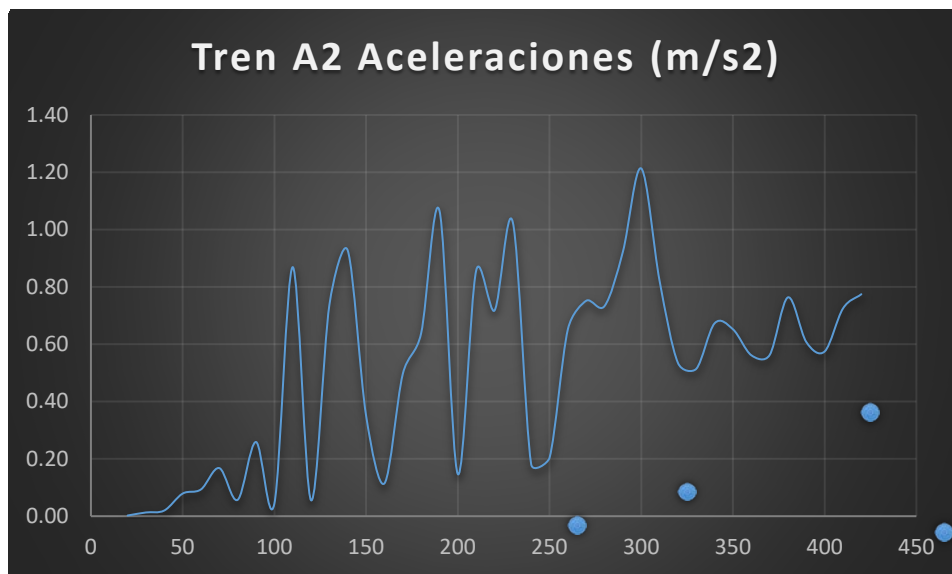
*Figura 4.10 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



➤ Aceleraciones máximas



*Figura 4.11 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



*Figura 4.12 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/5*

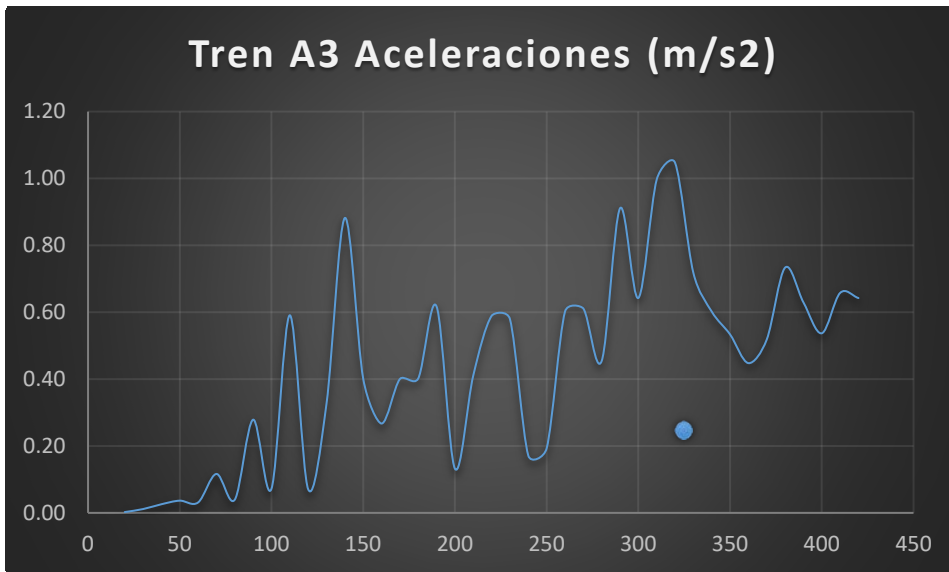


Figura 4.13 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/5

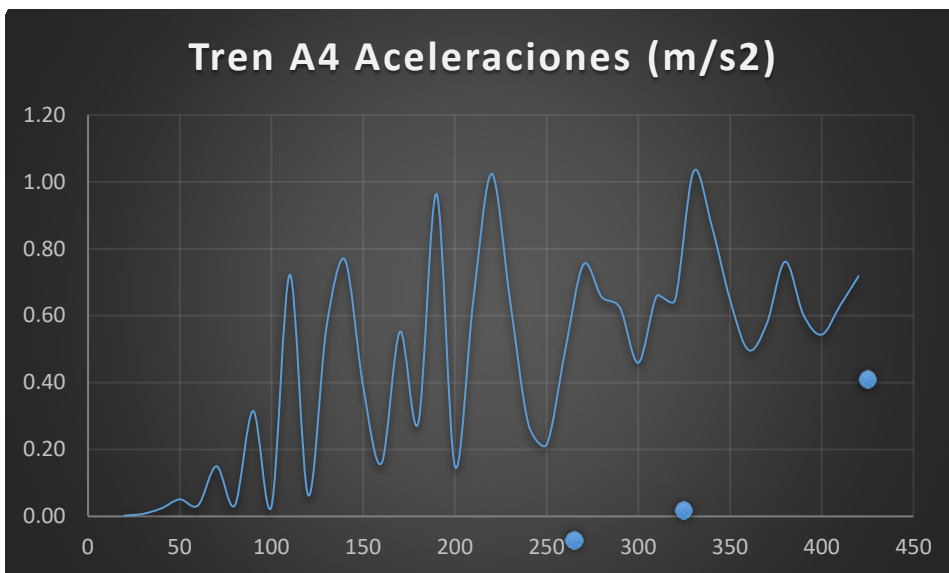
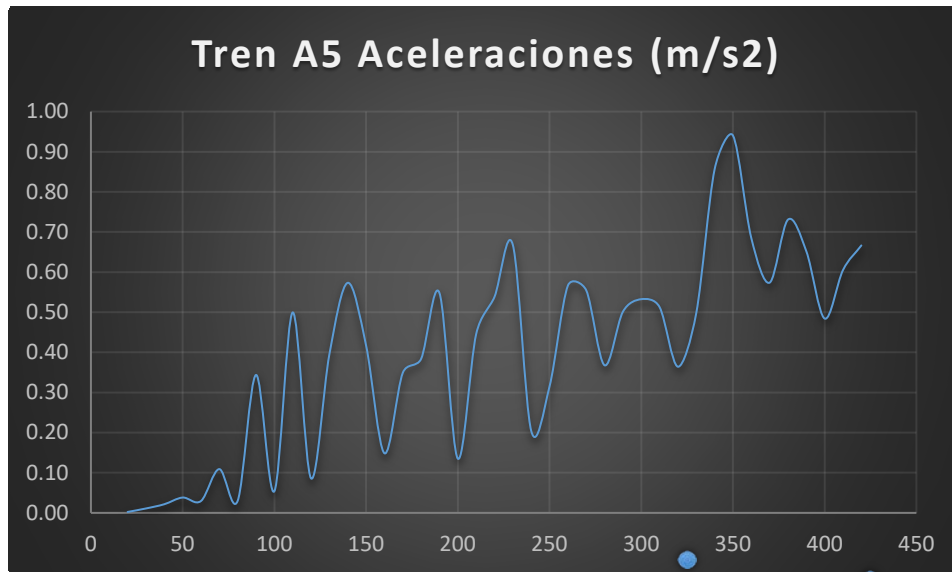
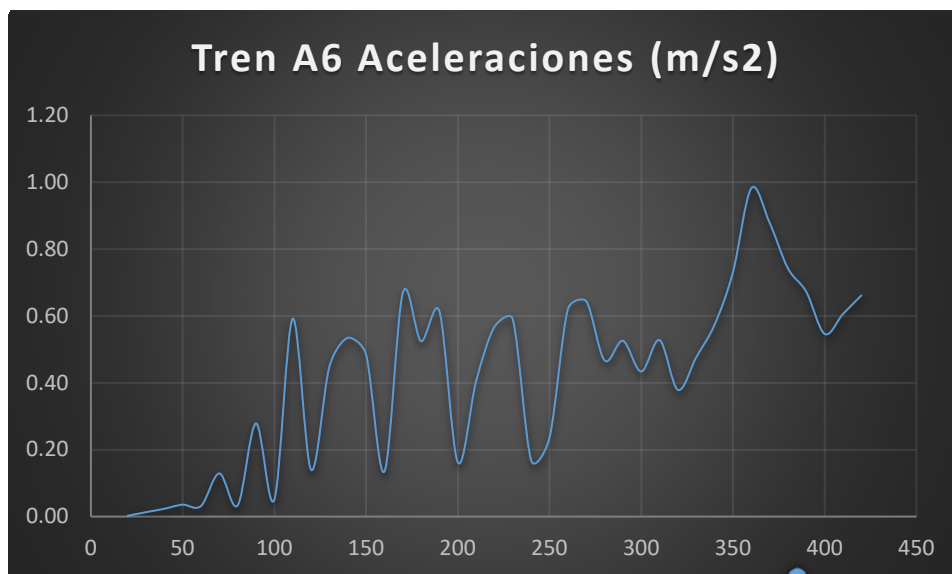


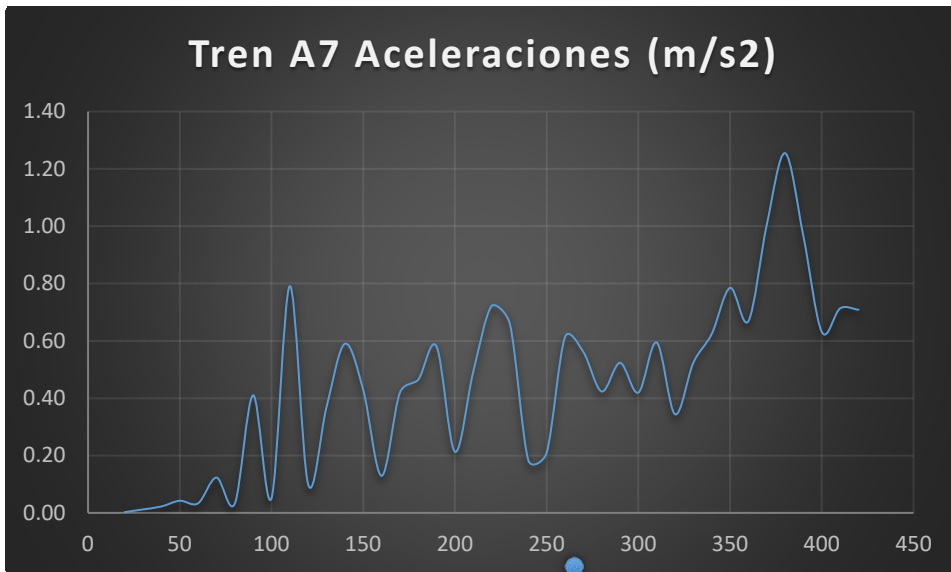
Figura 4.14 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/5



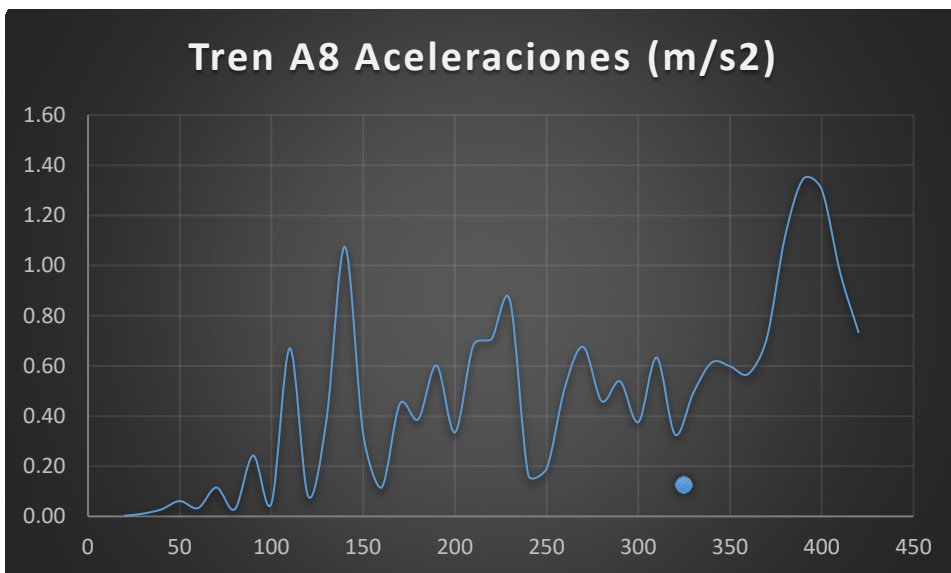
*Figura 4.15 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



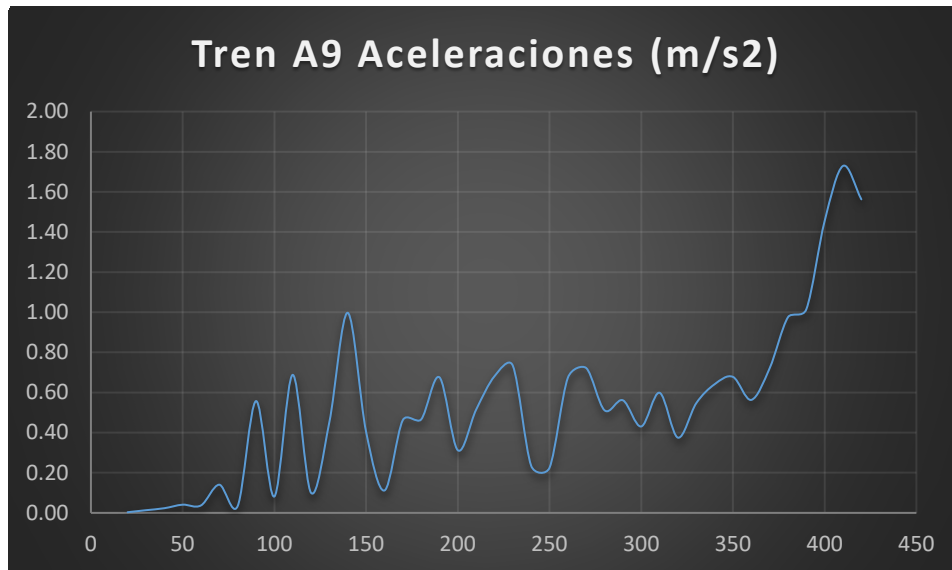
*Figura 4.16 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



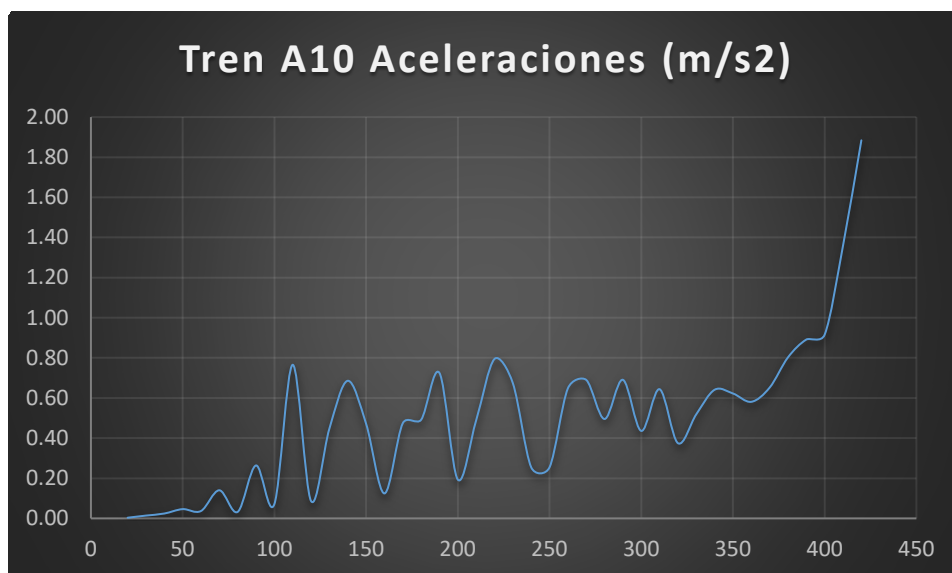
*Figura 4.17 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



*Figura 4.18 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



*Figura 4.19 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/5*



*Figura 4.20 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/5*

#### 4.1.2. Modelo relación flecha-luz 1/7.07

- Desplazamientos verticales máximos

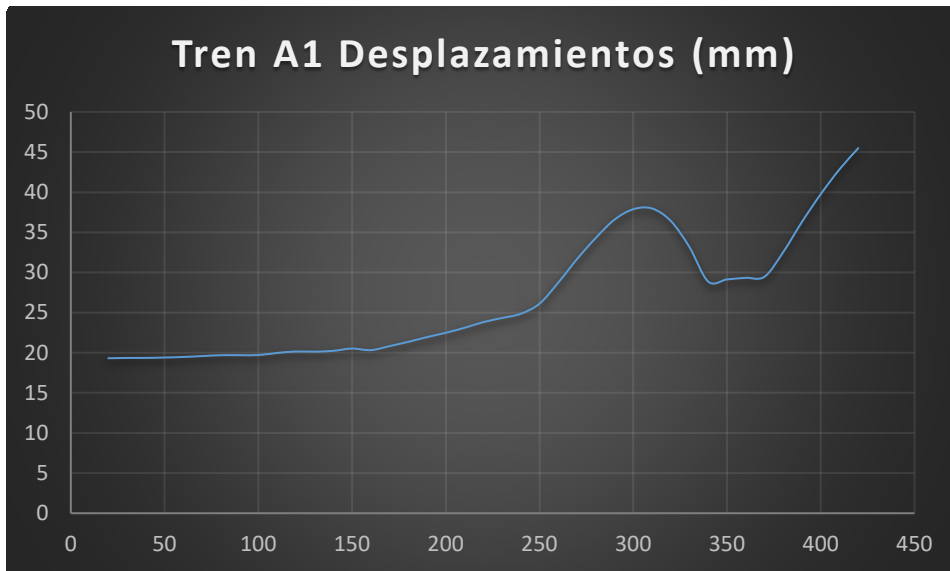
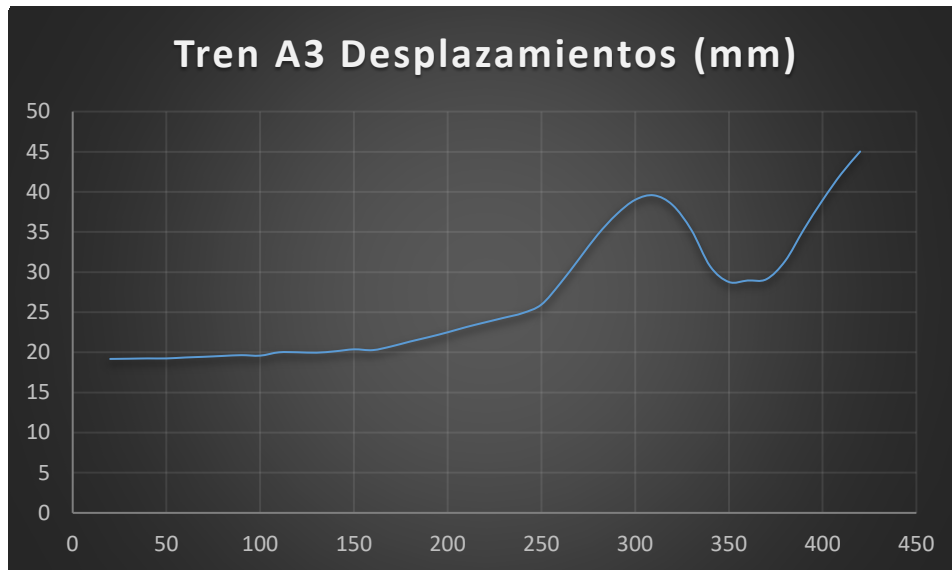


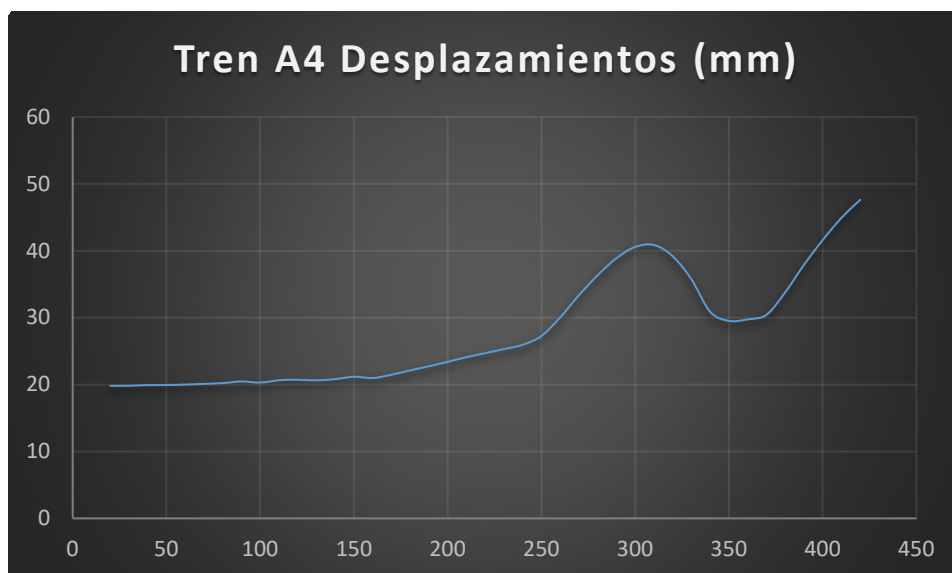
Figura 4.21 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07



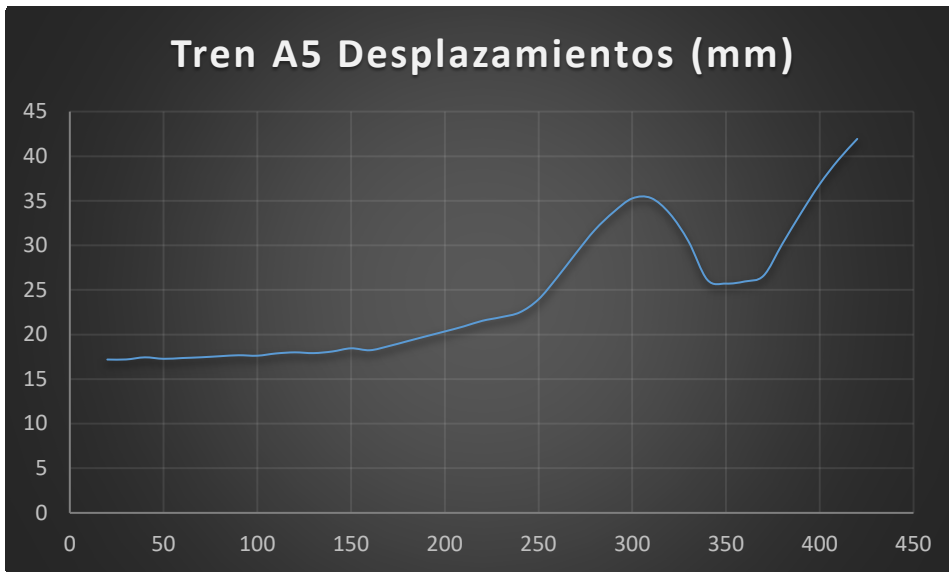
Figura 4.22 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07



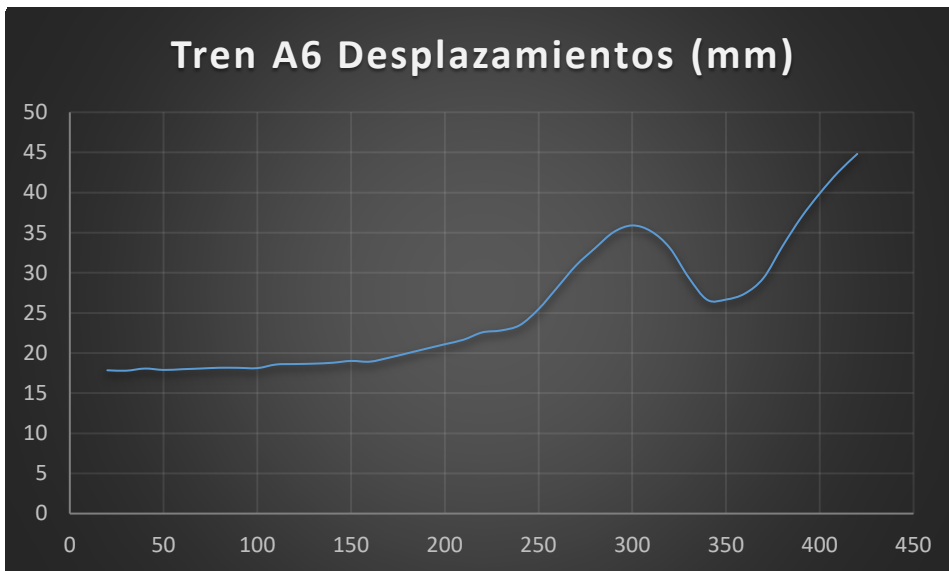
*Figura 4.23 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.24 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

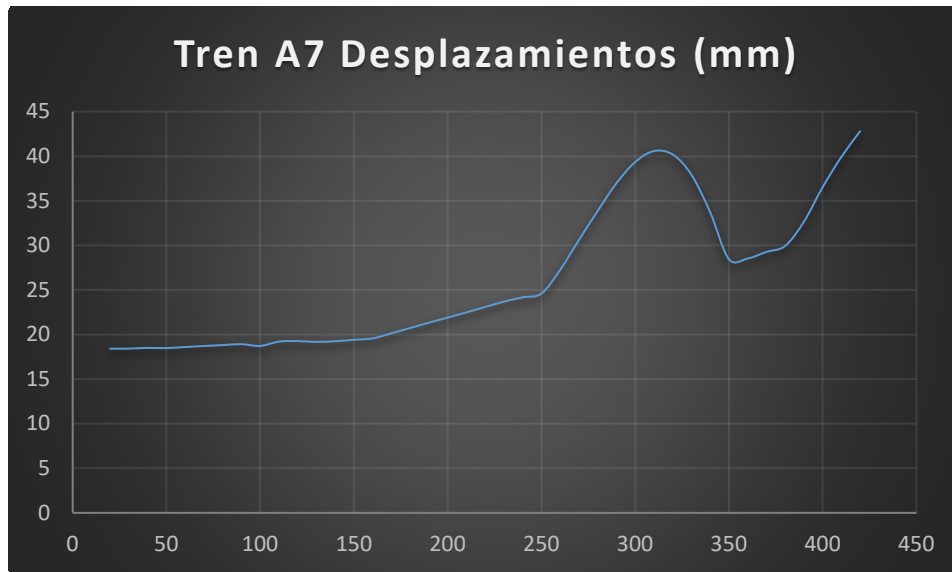


*Figura 4.25 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

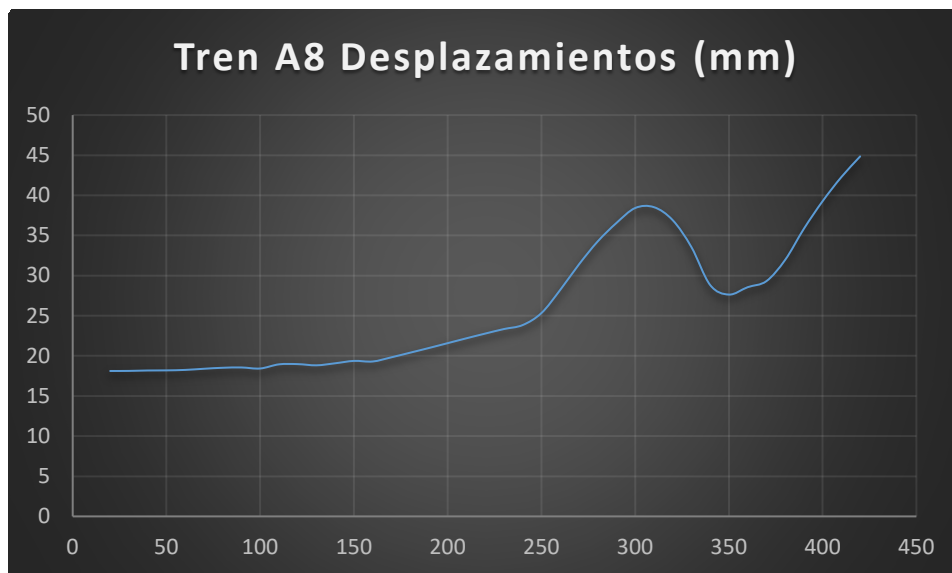


*Figura 4.26 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

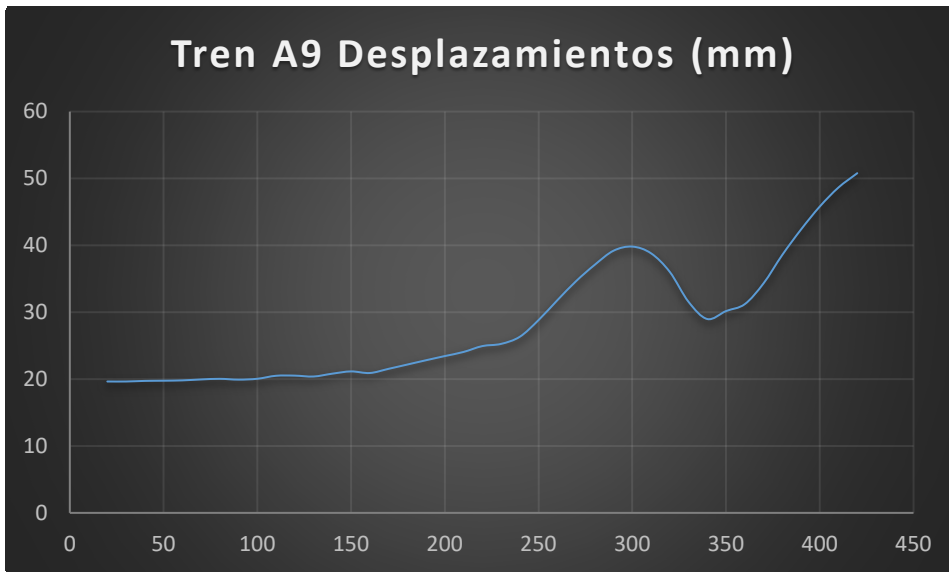




*Figura 4.27 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.28 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

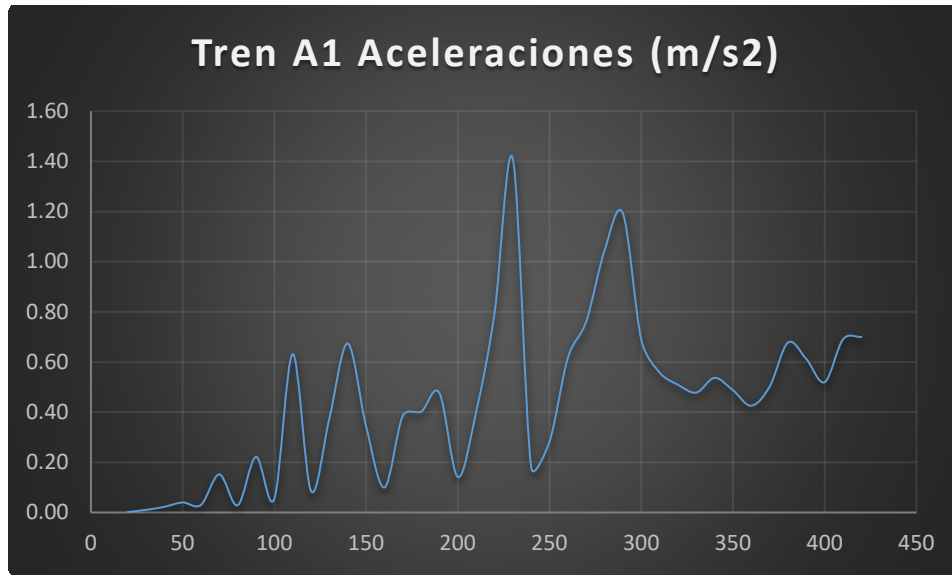


*Figura 4.29 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

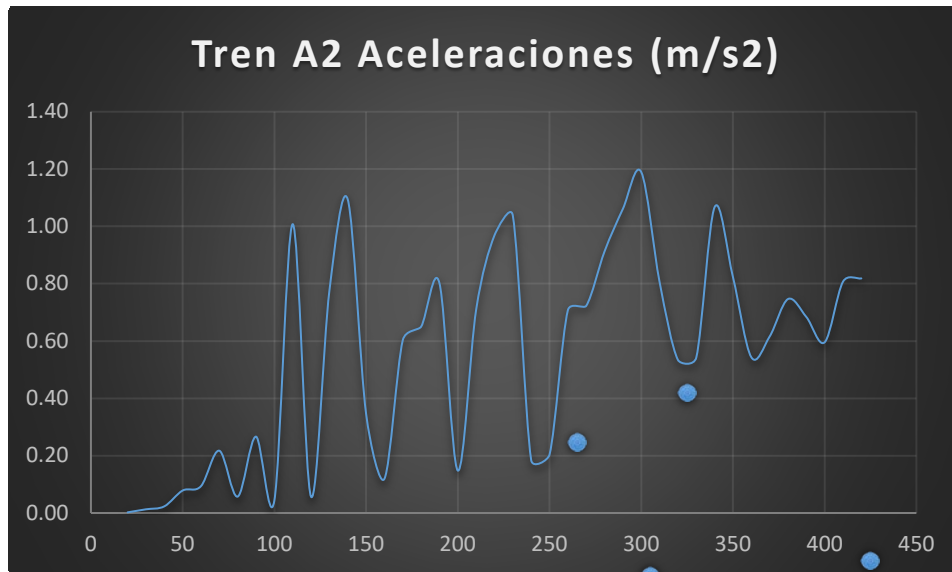


*Figura 4.30 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

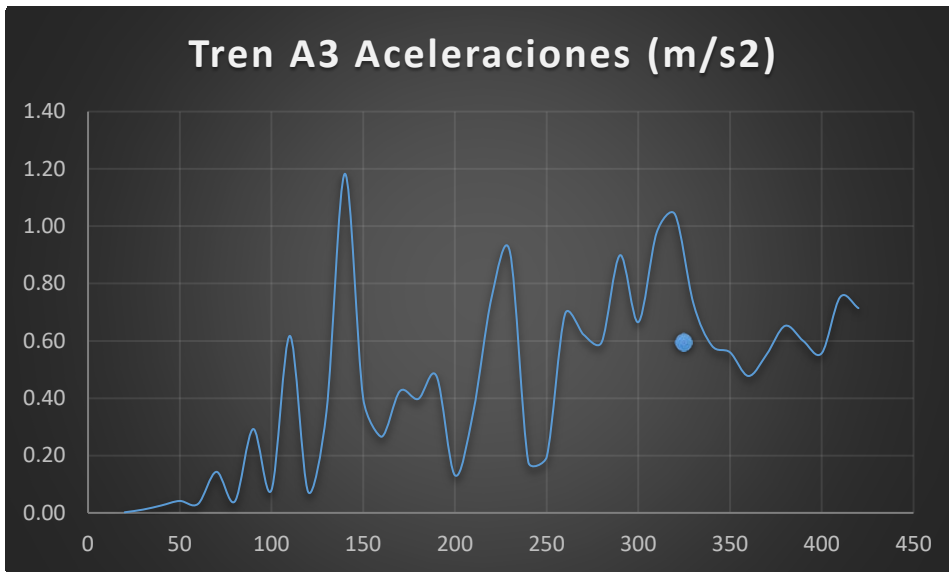
➤ Aceleraciones máximas



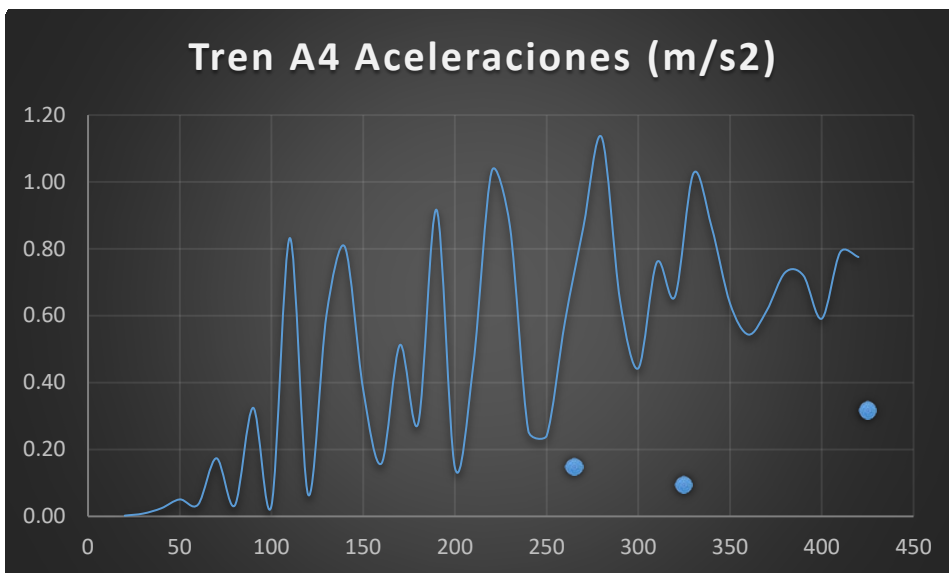
*Figura 4.31 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



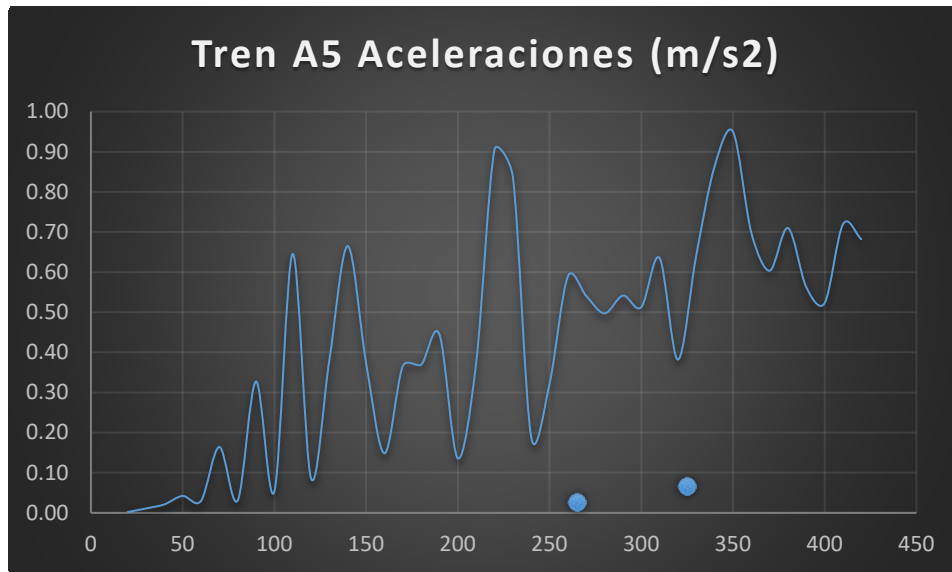
*Figura 4.32 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



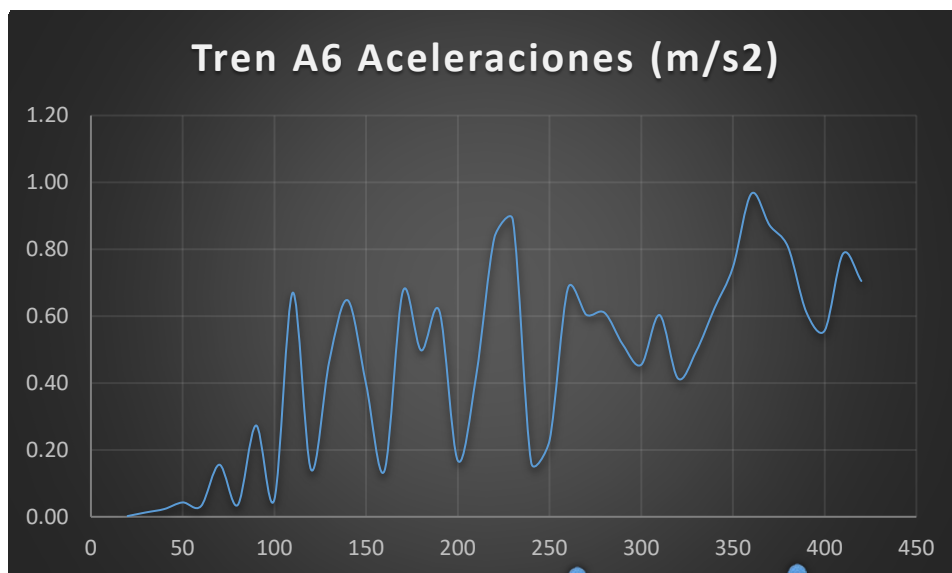
*Figura 4.33 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



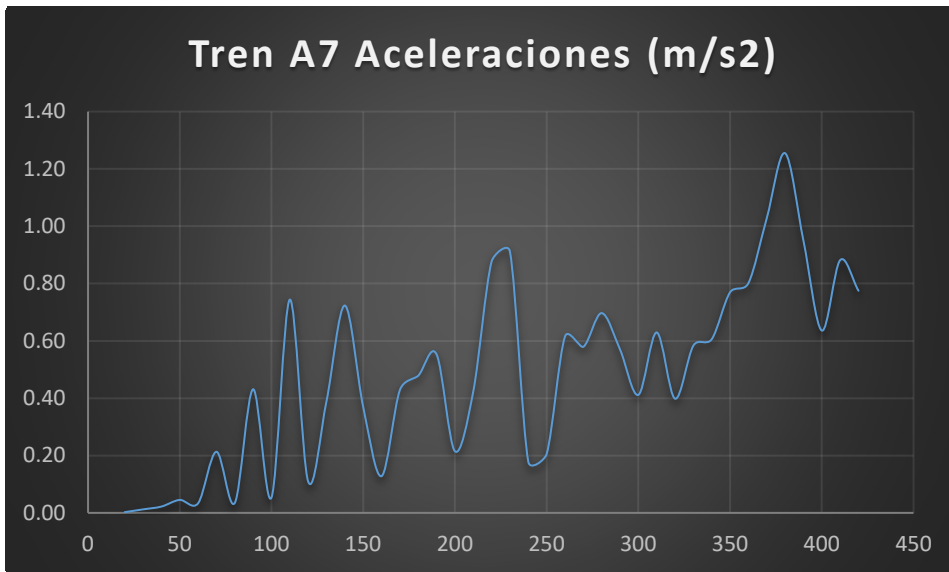
*Figura 4.34 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



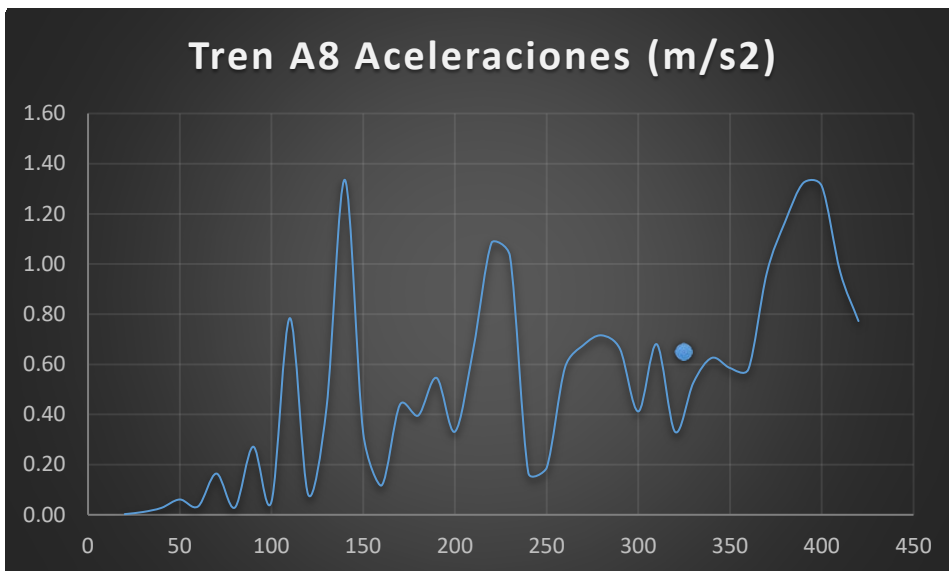
*Figura 4.35 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



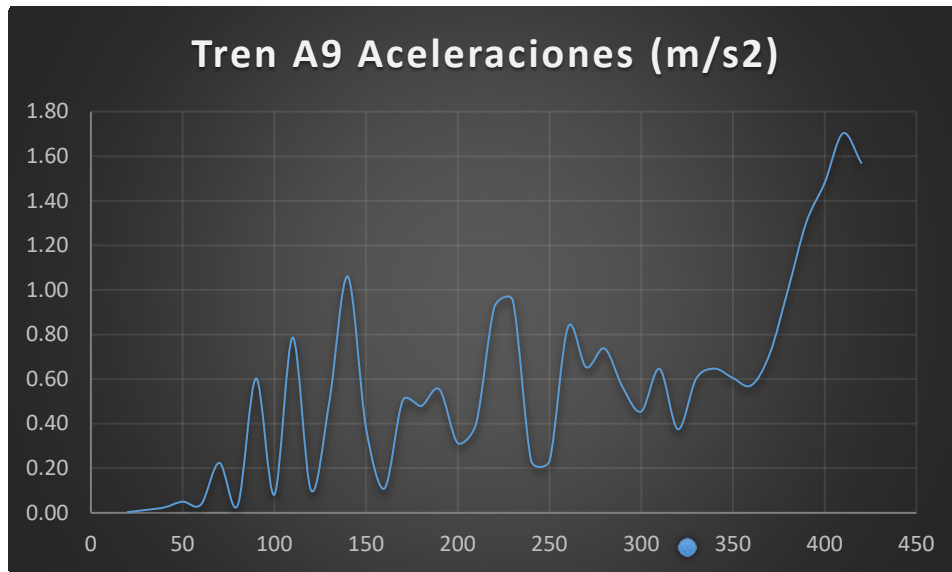
*Figura 4.36 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



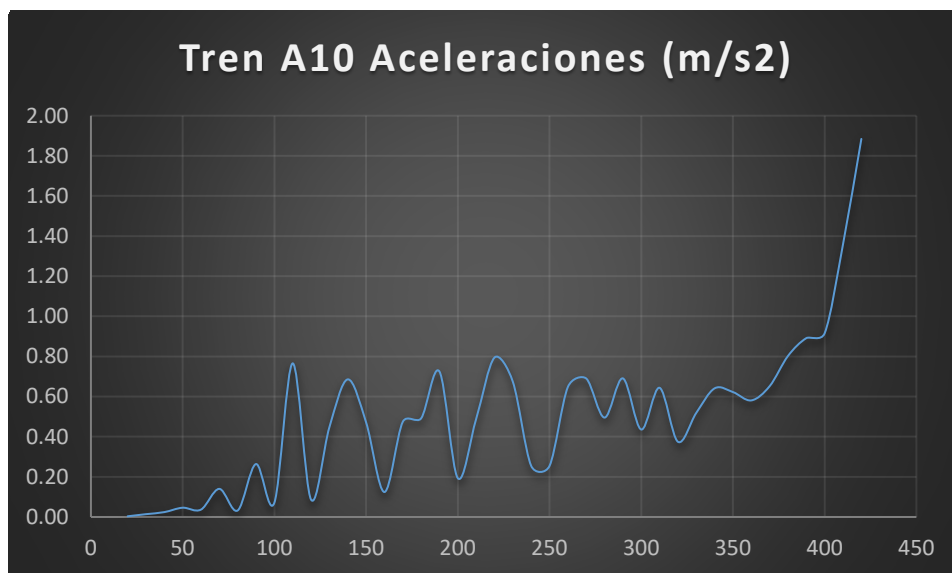
*Figura 4.37 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.38 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.39 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.40 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/7.07*

### 4.1.3. Modelo relación flecha-luz 1/10

➤ Desplazamientos máximos

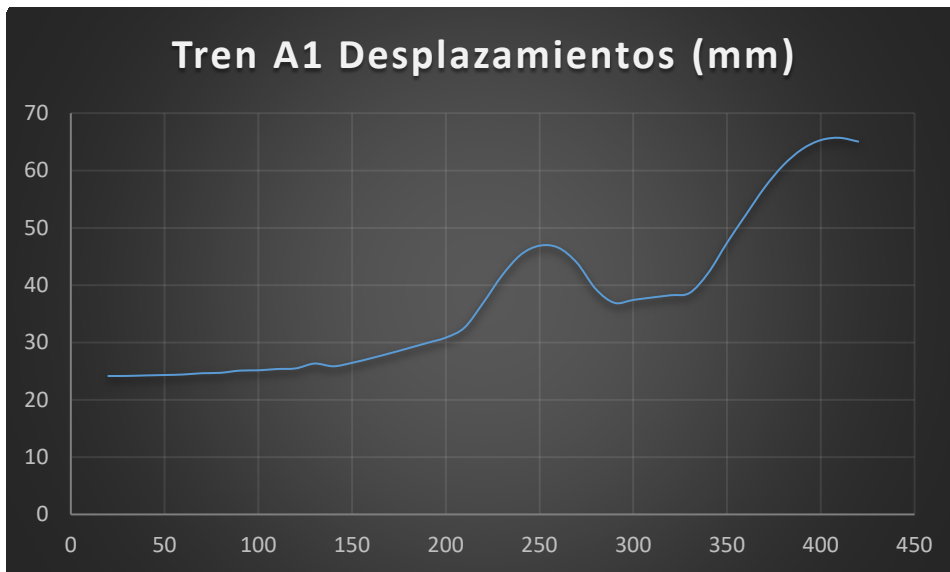


Figura 4.41 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/10

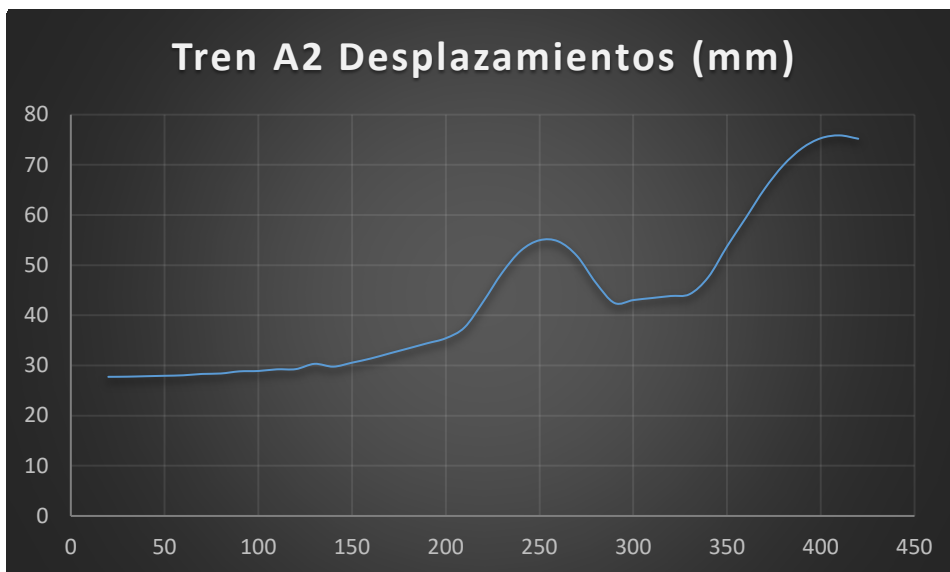


Figura 4.42 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/10





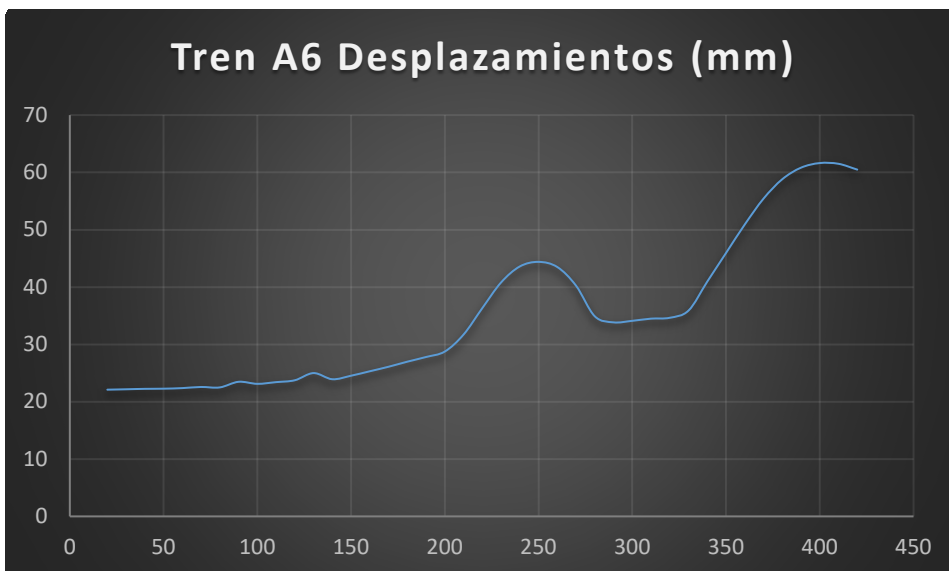
*Figura 4.43 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



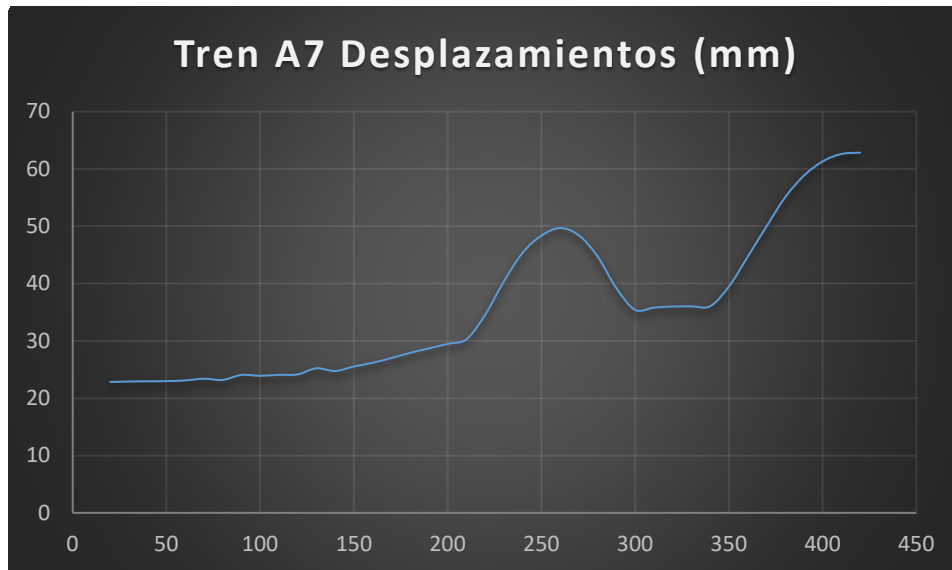
*Figura 4.44 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



*Figura 4.45 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



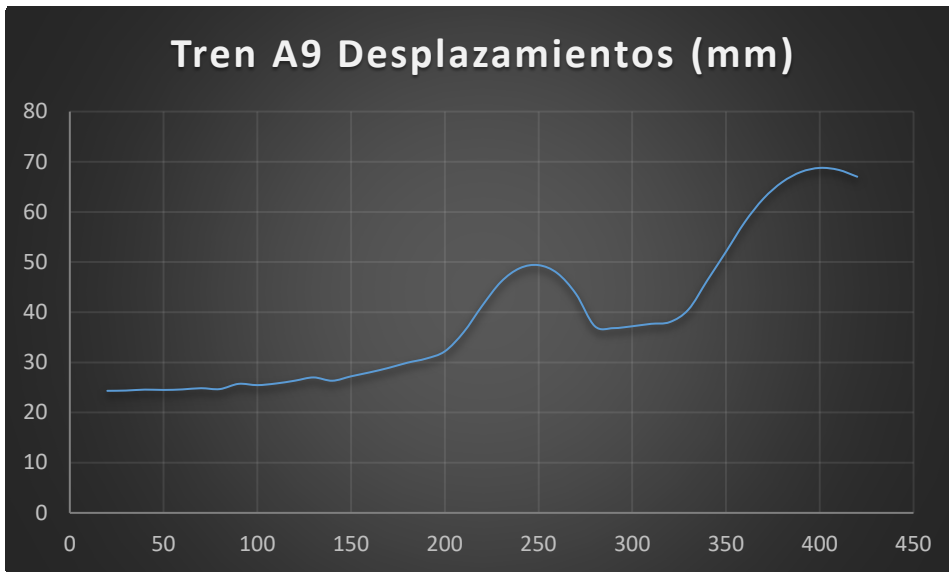
*Figura 4.46 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



*Figura 4.47 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



*Figura 4.48 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



*Figura 4.49 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



*Figura 4.50 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/10*

➤ Aceleraciones máximas

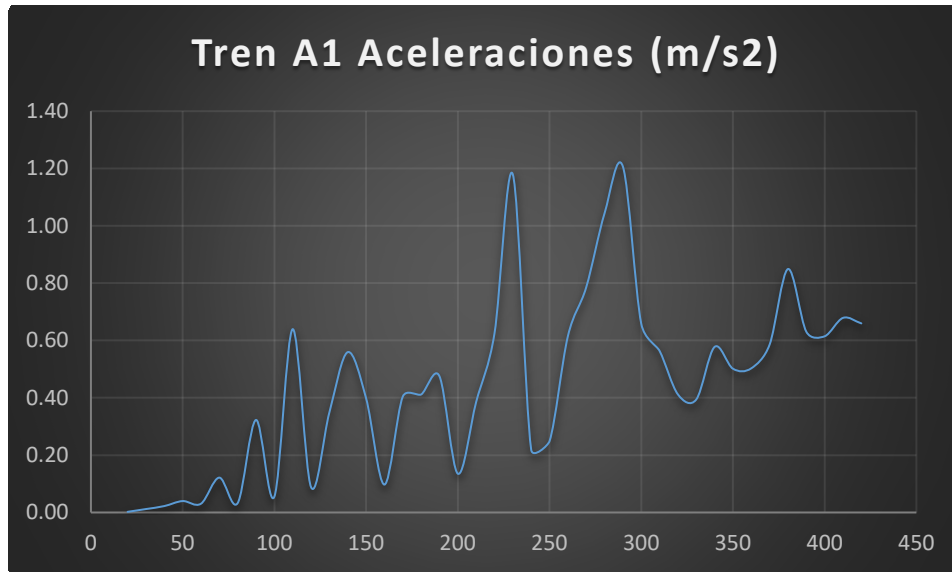


Figura 4.51 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/10

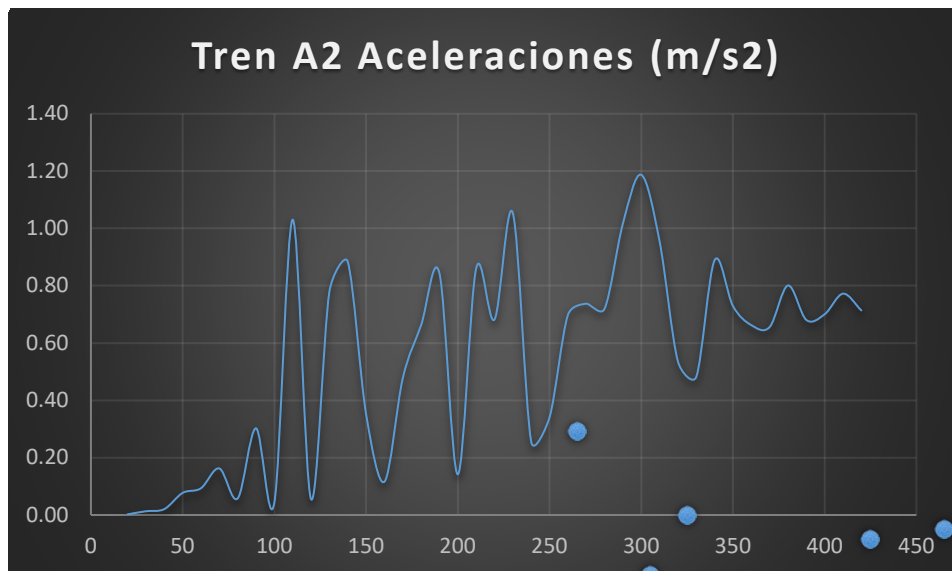
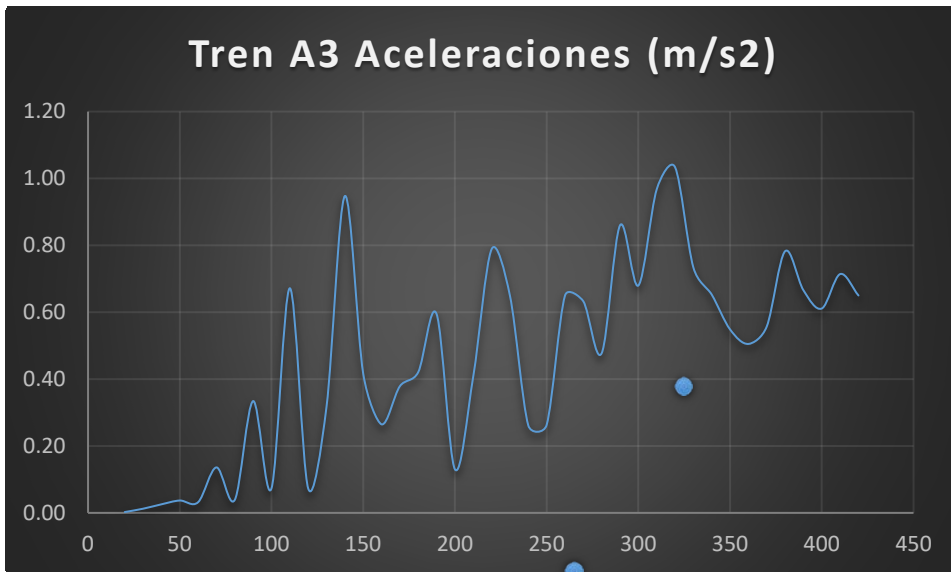
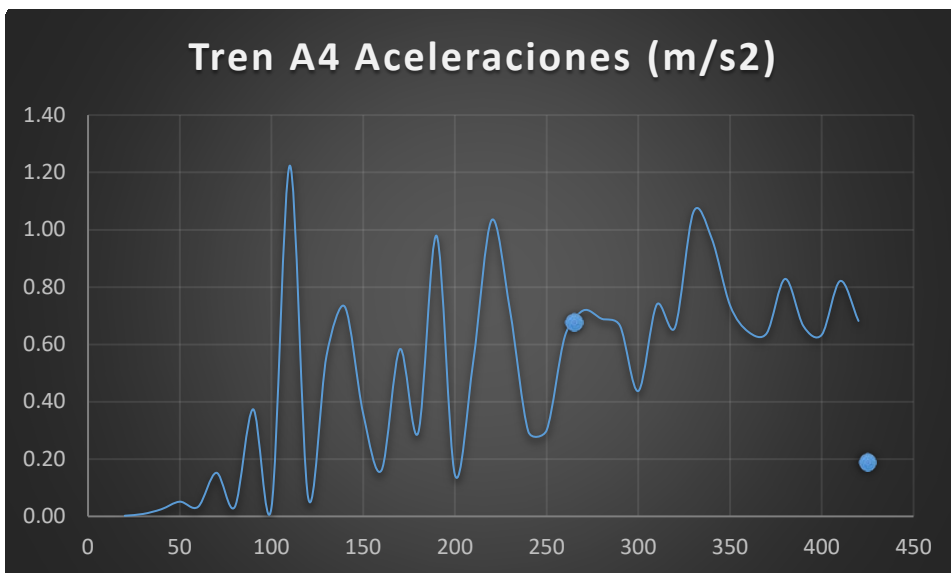


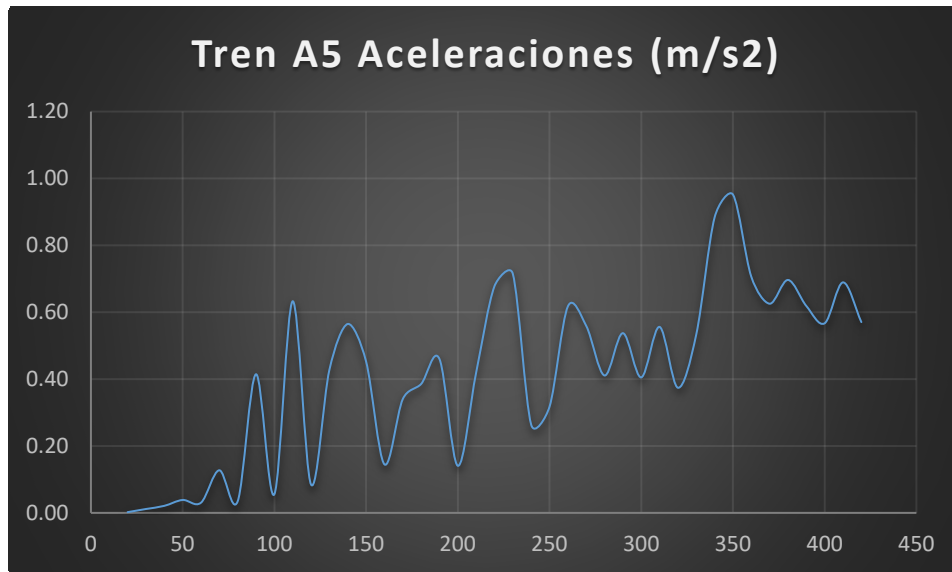
Figura 4.52 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/10



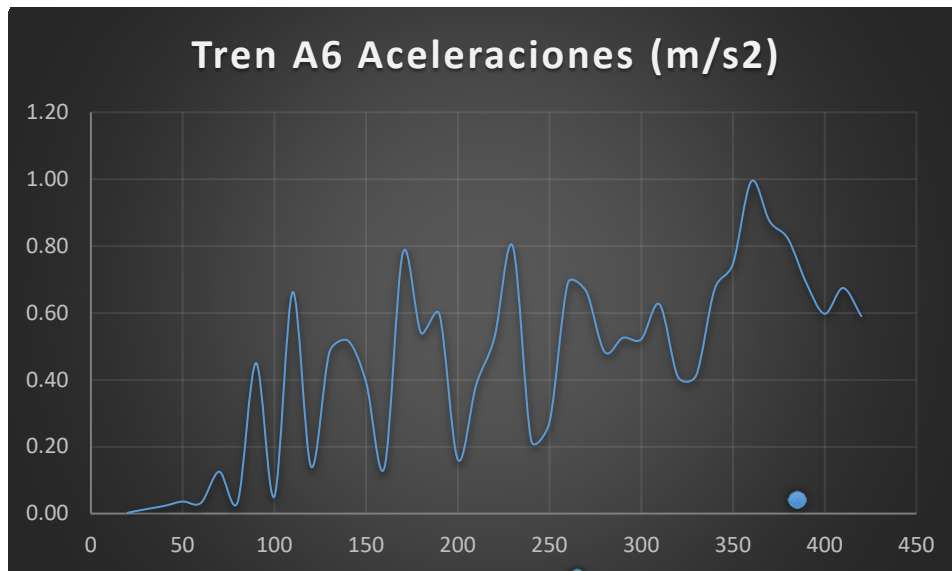
*Figura 4.53 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



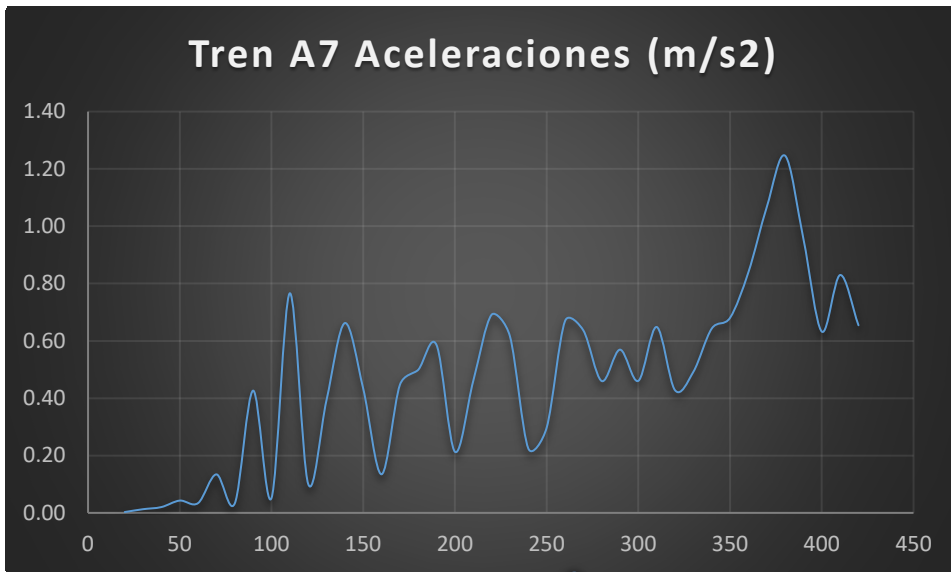
*Figura 4.54 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



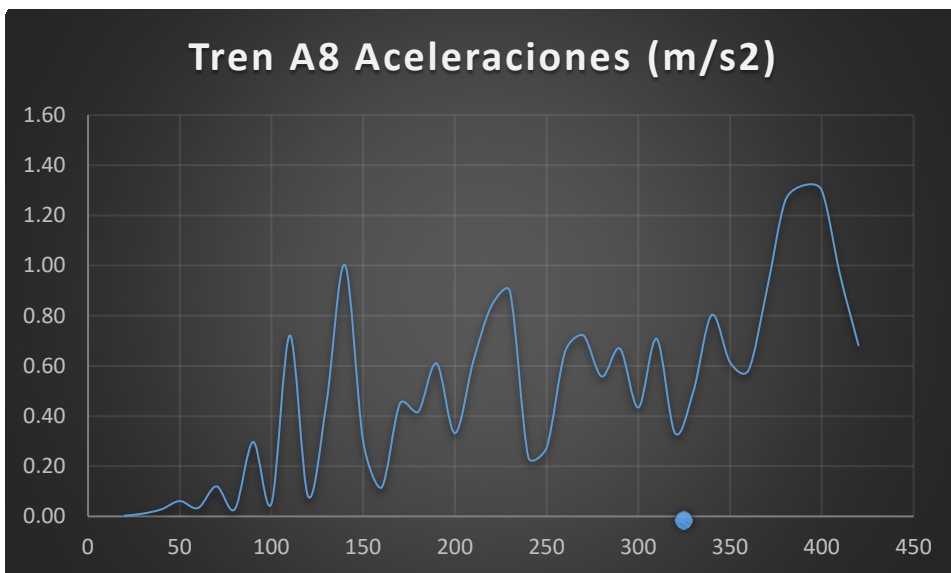
*Figura 4.55 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



*Figura 4.56 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/10*

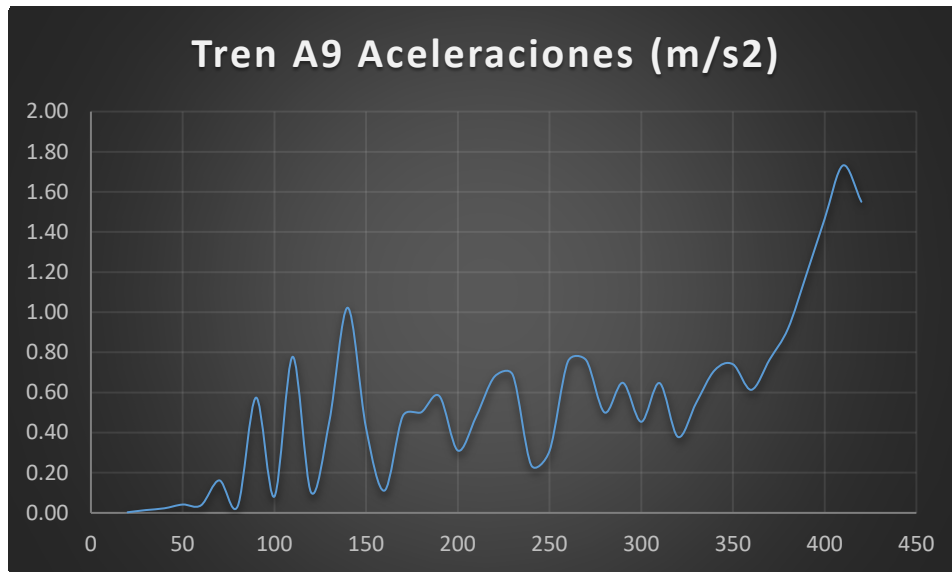


*Figura 4.57 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/10*

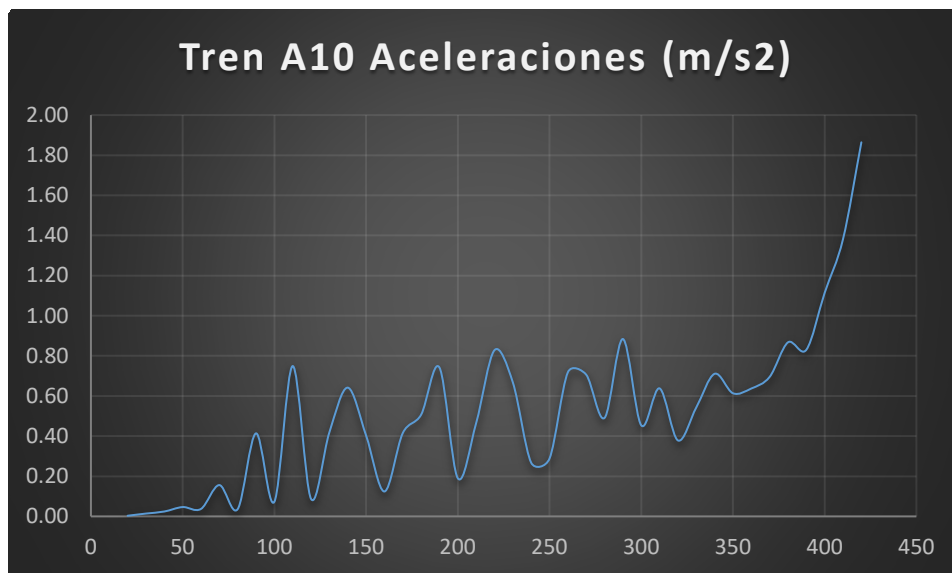


*Figura 4.58 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/10*





*Figura 4.59 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/10*



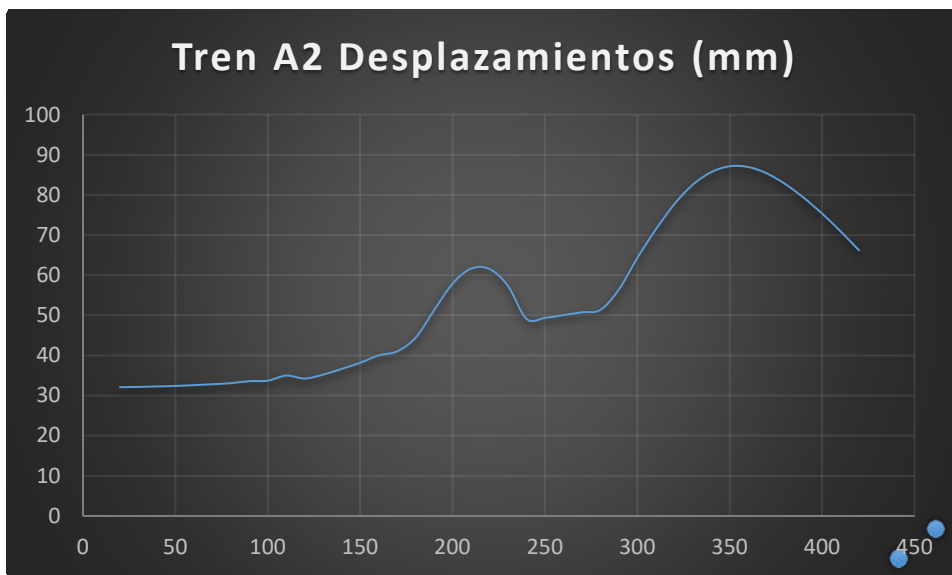
*Figura 4.60 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/10*

#### 4.1.4. Modelo relación flecha-luz 1/15

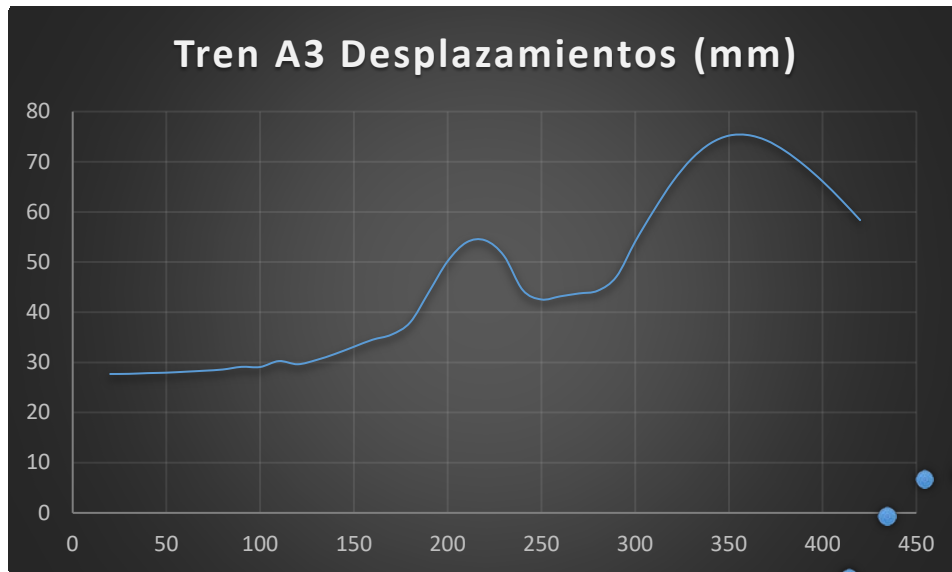
➤ Desplazamientos verticales máximos



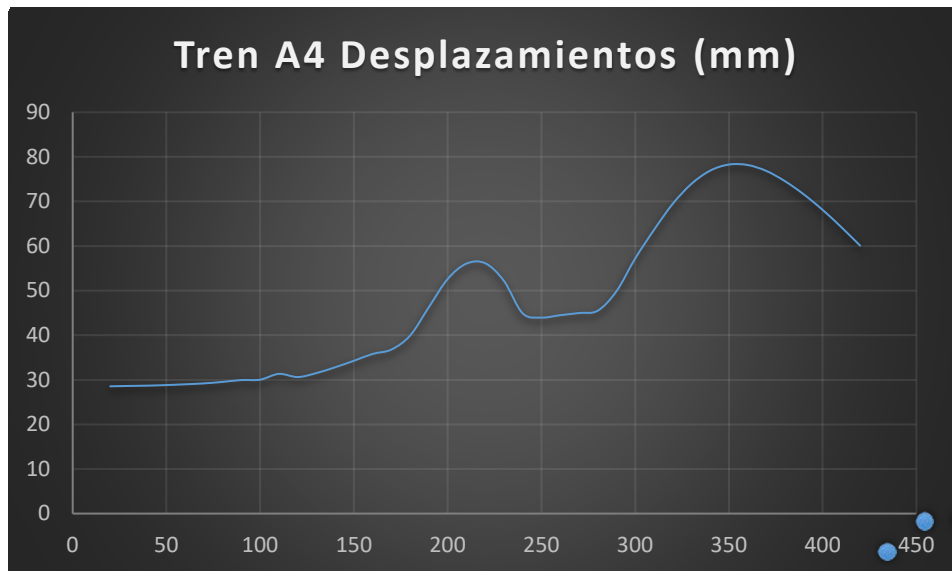
*Figura 4.61 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



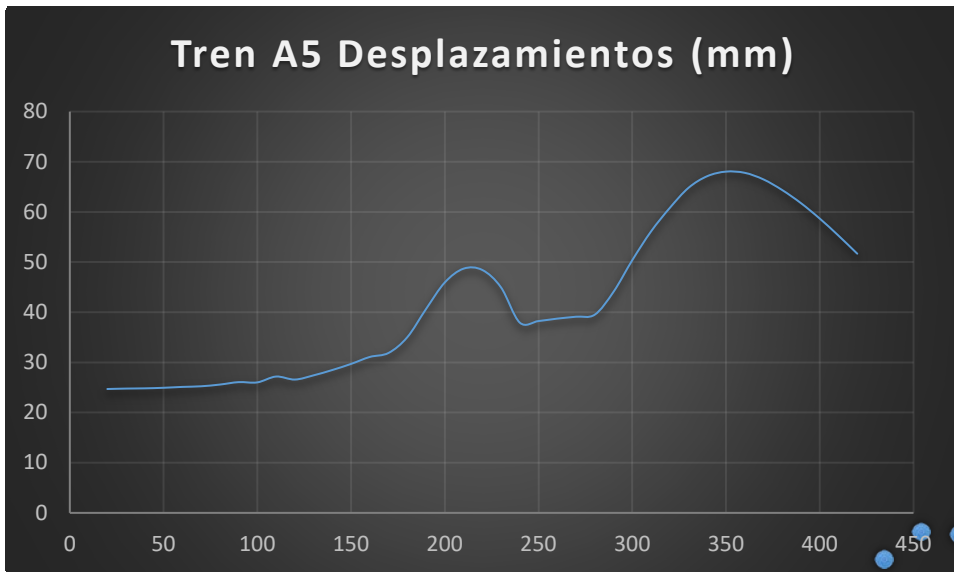
*Figura 4.62 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.63 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.64 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.65 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.66 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.67 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.68 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/15*

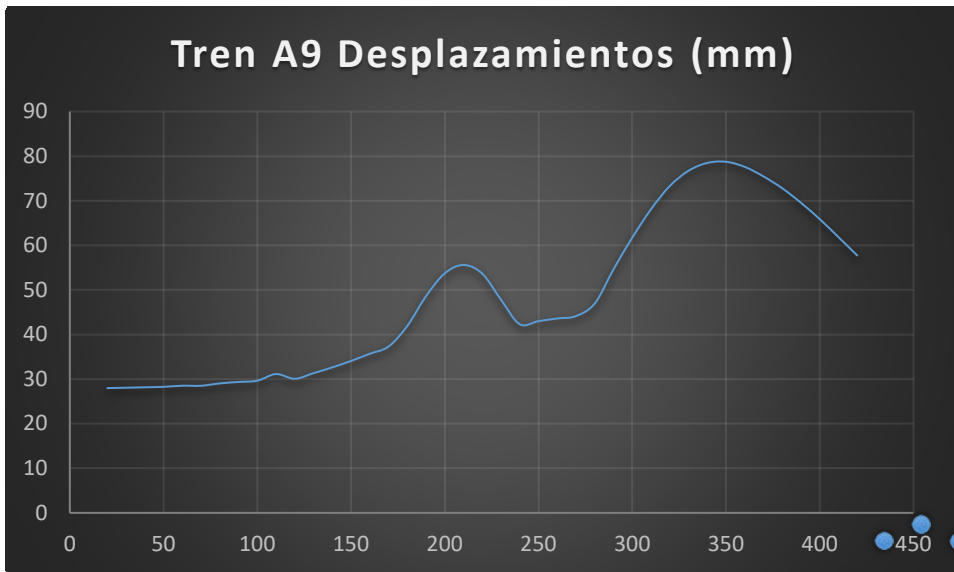
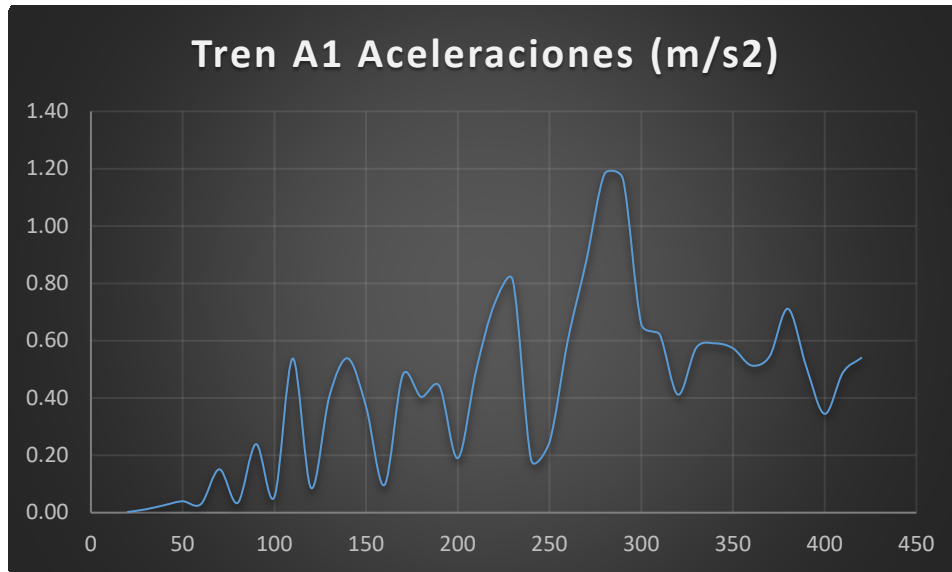


Figura 4.69 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/15

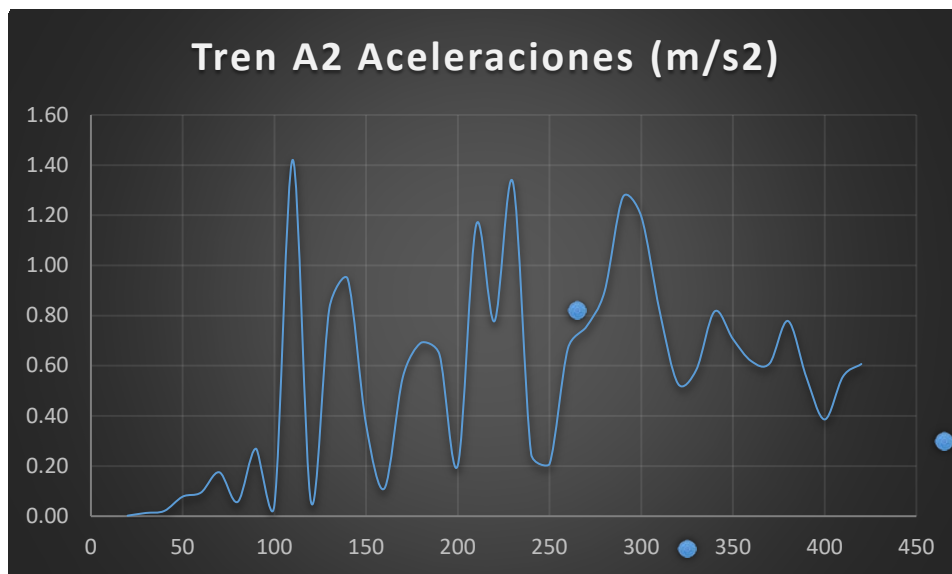


Figura 4.70 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/15

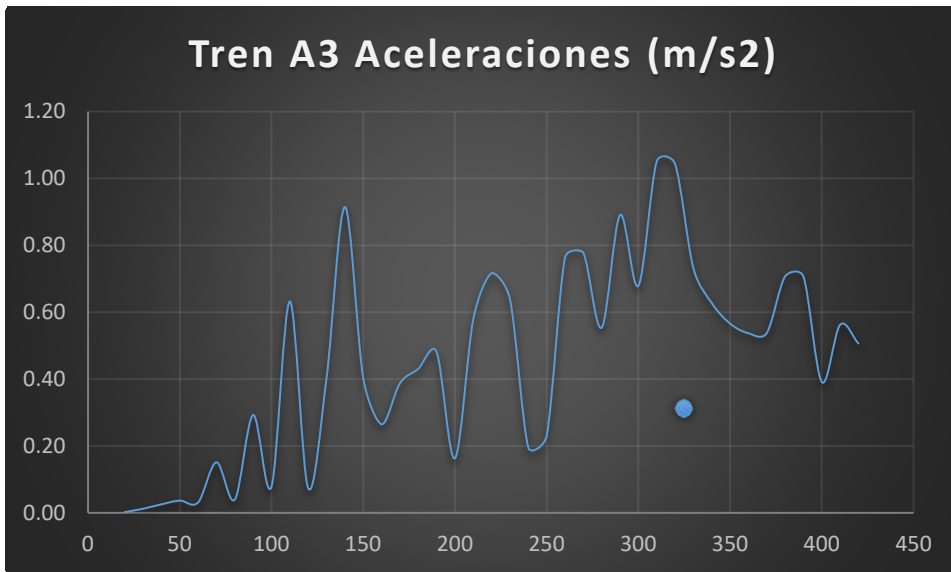
➤ Aceleraciones máximas



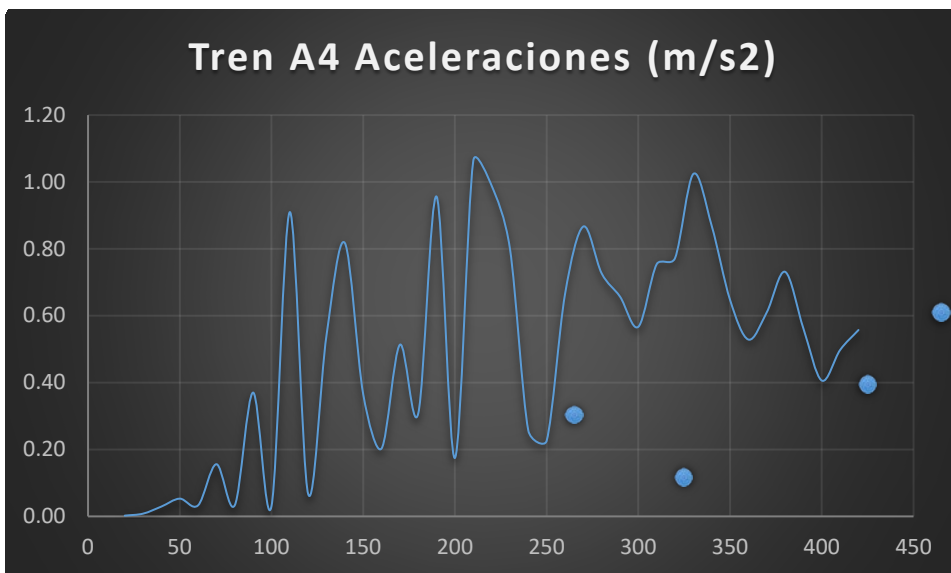
*Figura 4.71 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.72 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 300m de luz y relación 1/15*

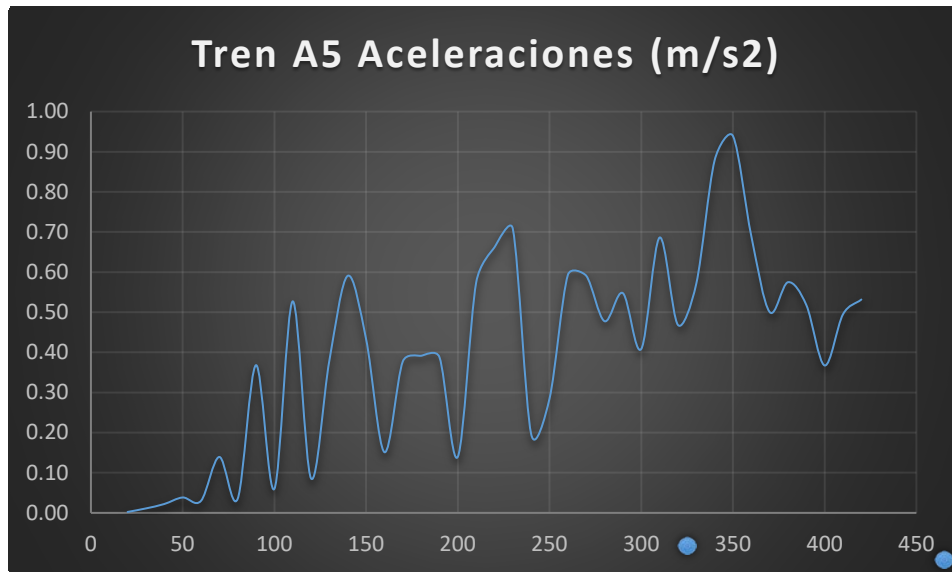


*Figura 4.73 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 300m de luz y relación 1/15*

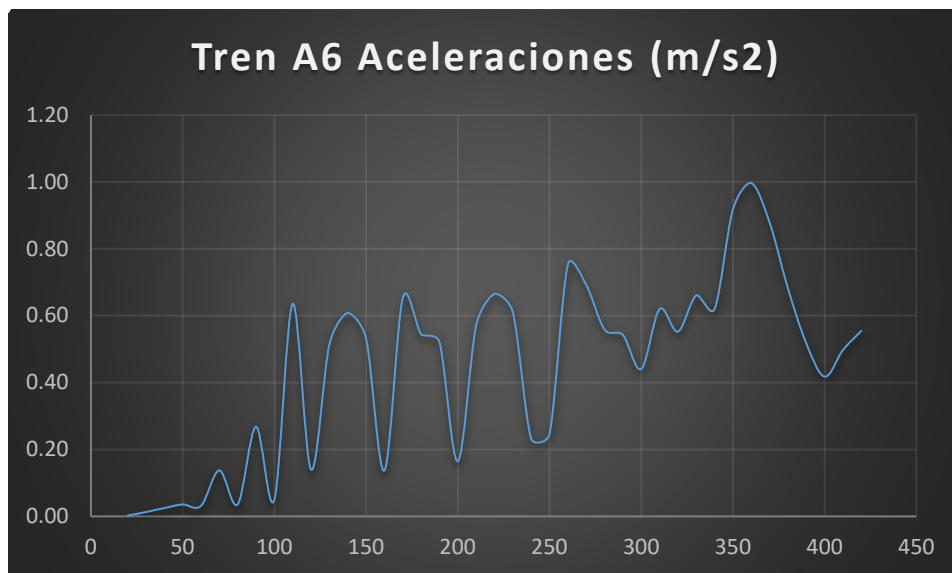


*Figura 4.74 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 300m de luz y relación 1/15*

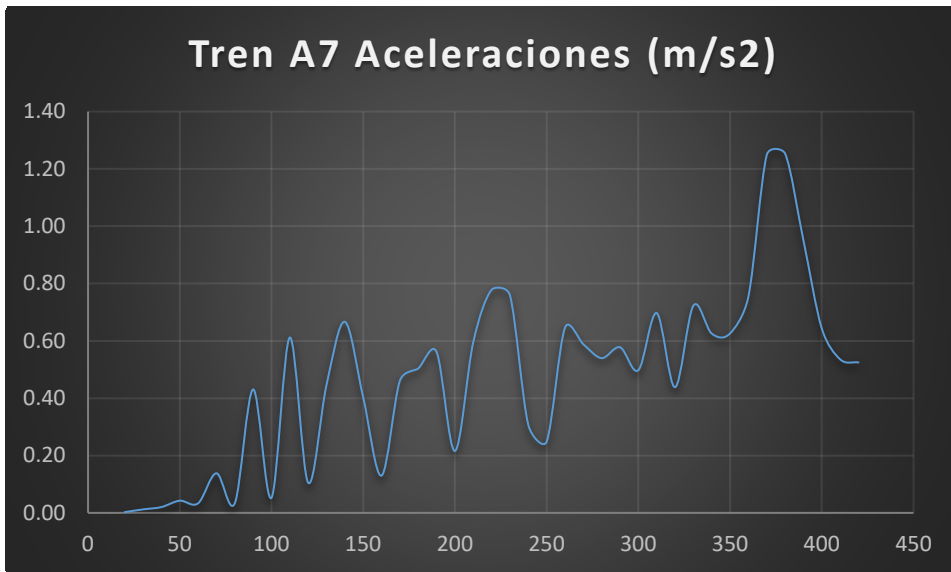




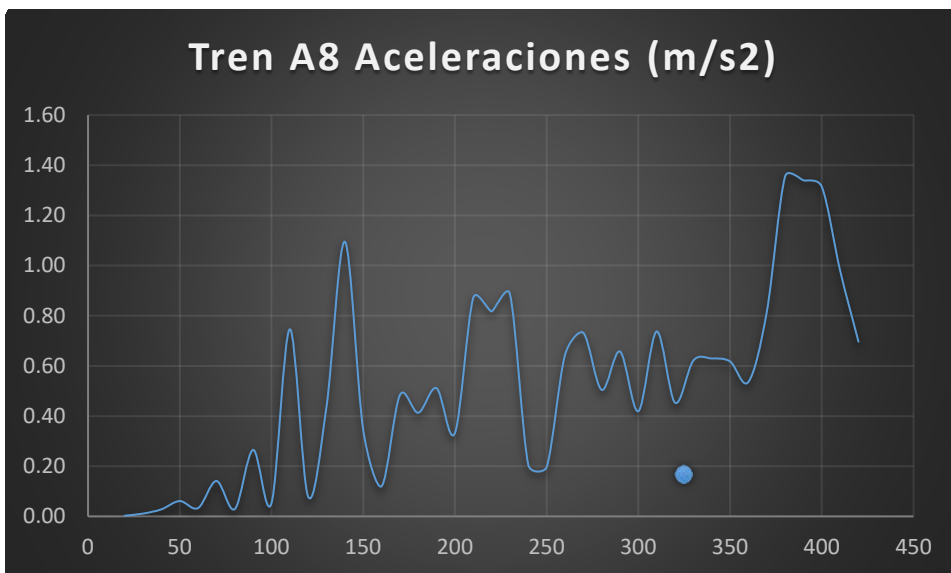
*Figura 4.75 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



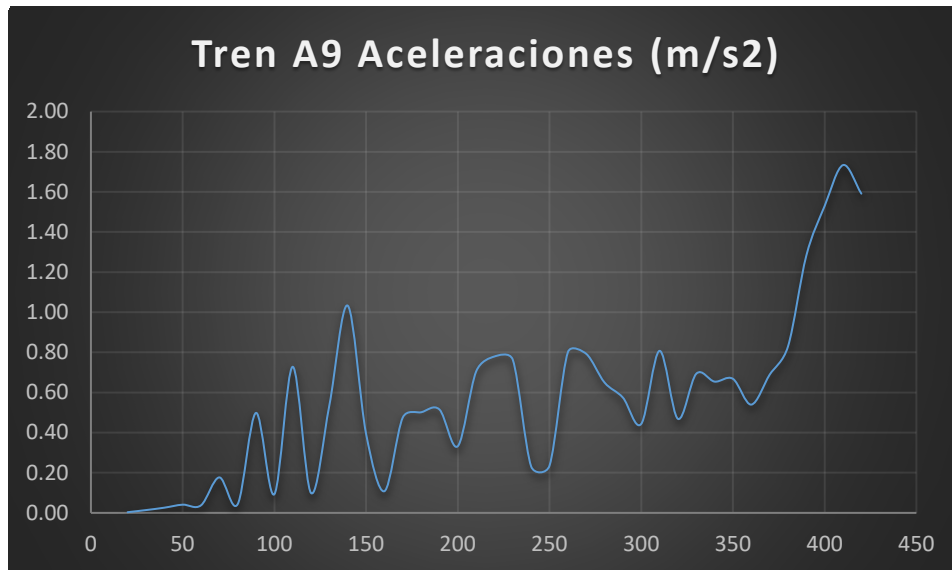
*Figura 4.76 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



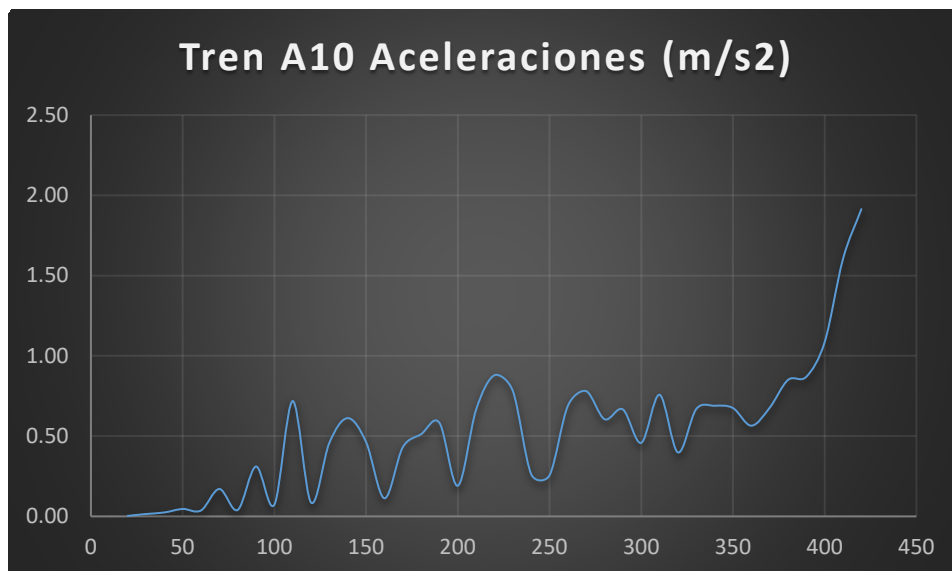
*Figura 4.77 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.78 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.79 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 300m de luz y relación 1/15*



*Figura 4.80 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 300m de luz y relación 1/15*

## 4.2. Modelo Arco de 200m de luz

### 4.2.1. Modelo relación flecha-luz 1/7.07

- Desplazamientos verticales máximos

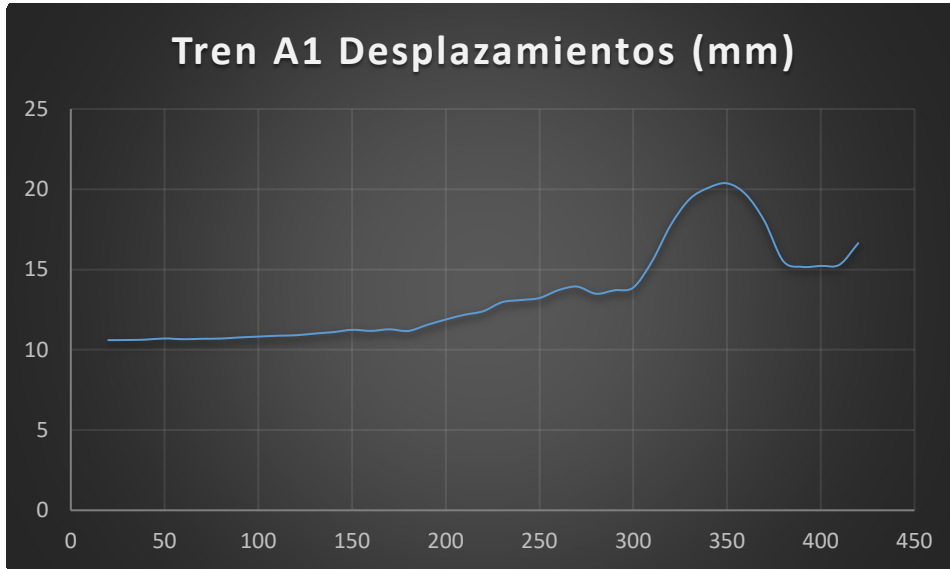


Figura 4.81 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07

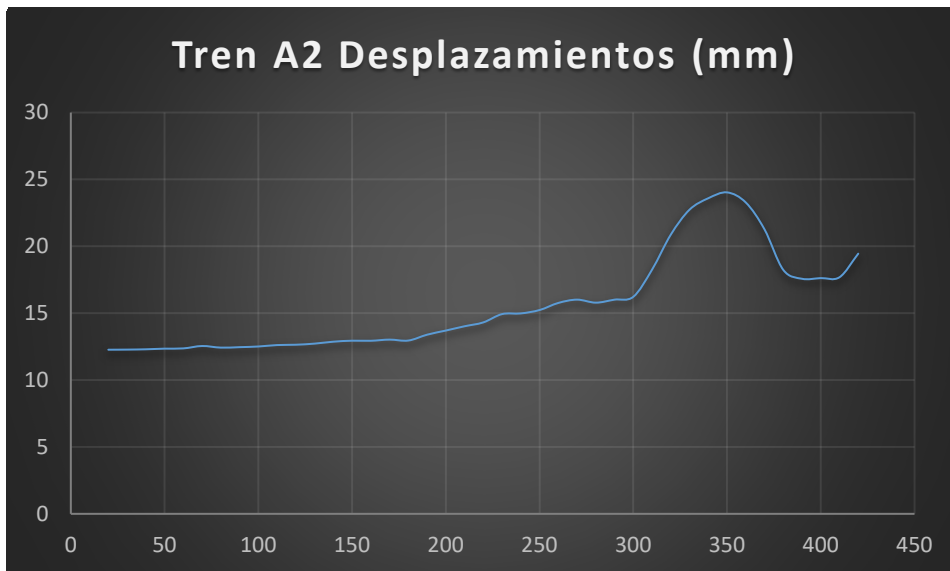
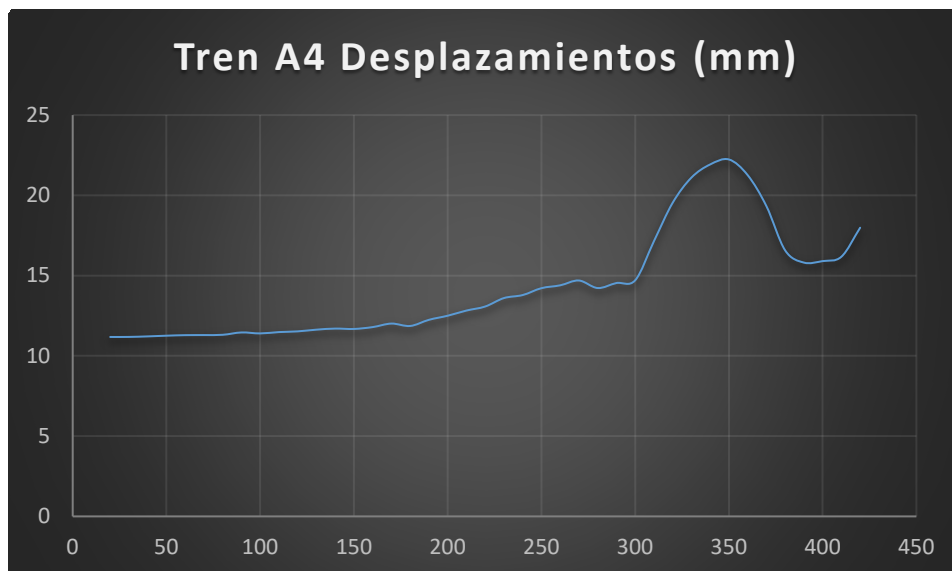


Figura 4.82 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07



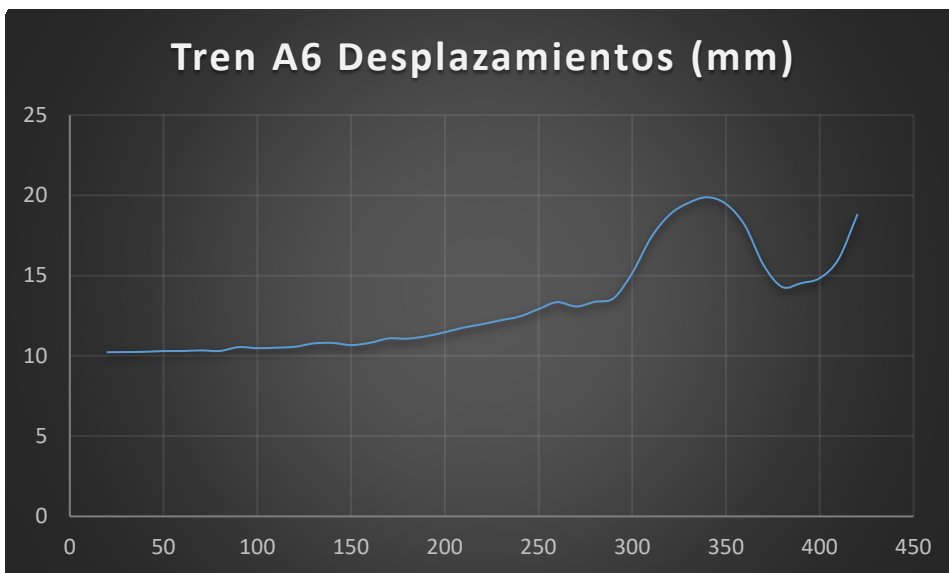
*Figura 4.83 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



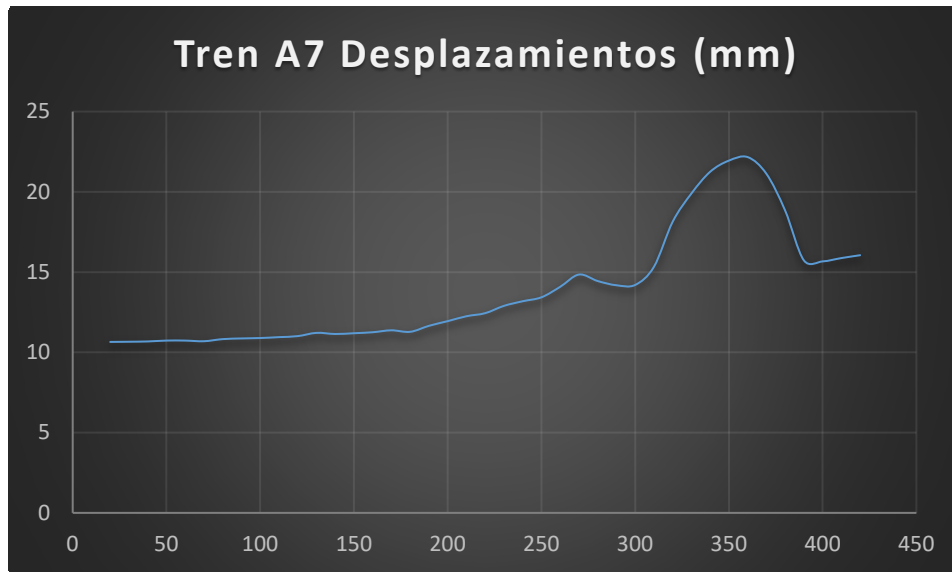
*Figura 4.84 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.85 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



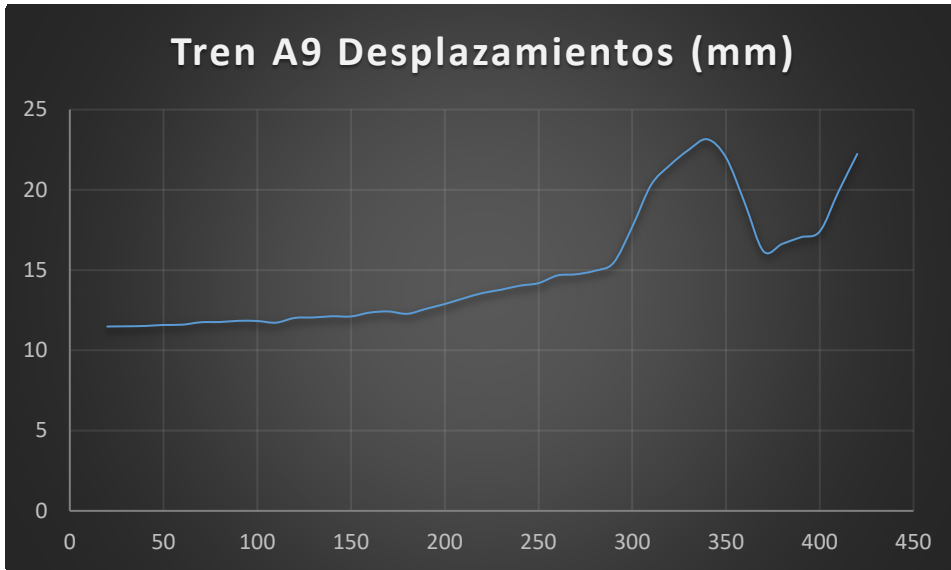
*Figura 4.86 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.87 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.88 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



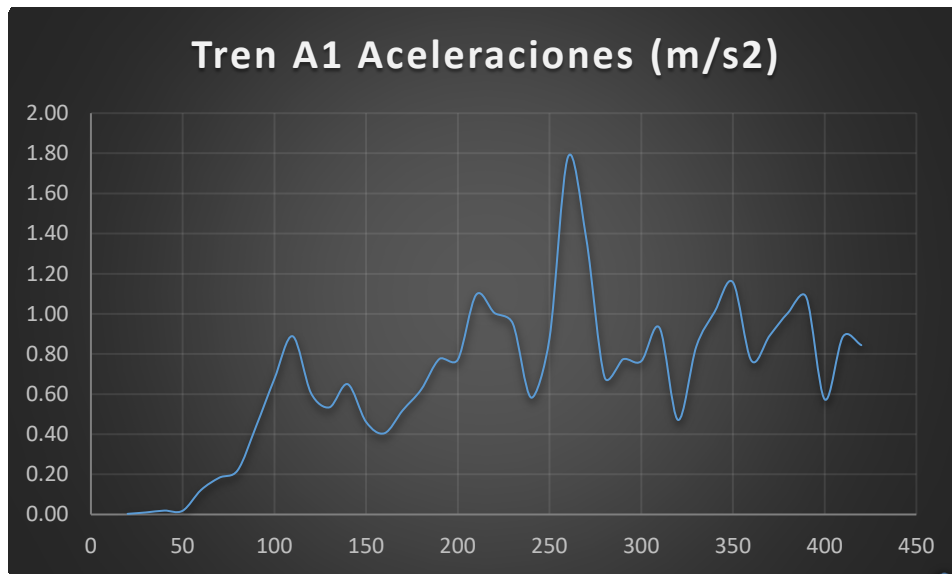
*Figura 4.89 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



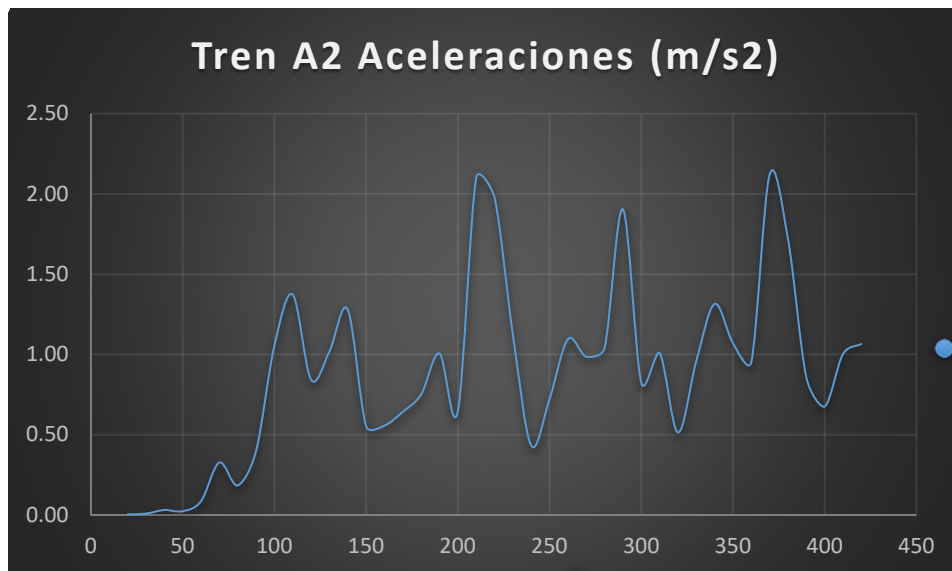
*Figura 4.90 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



➤ Aceleraciones máximas



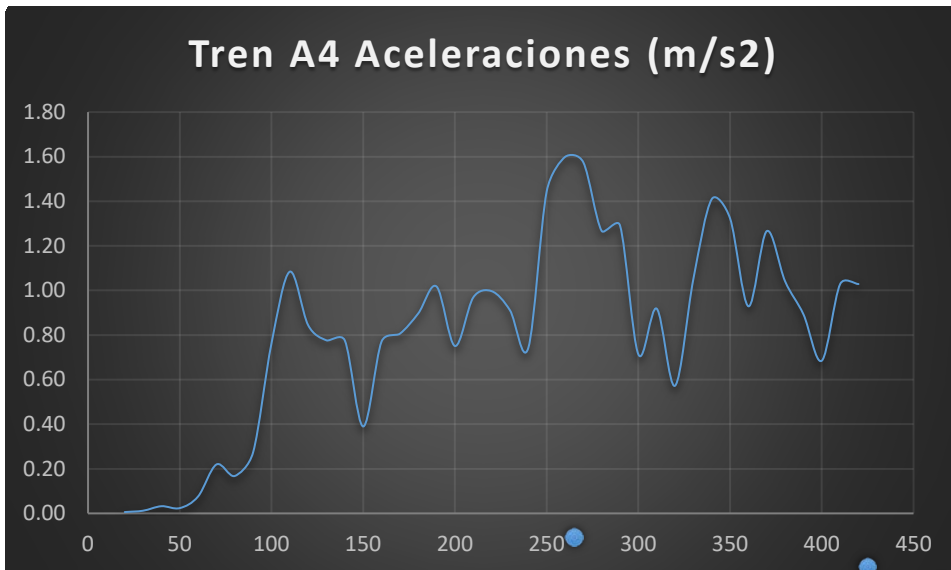
*Figura 4.91 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



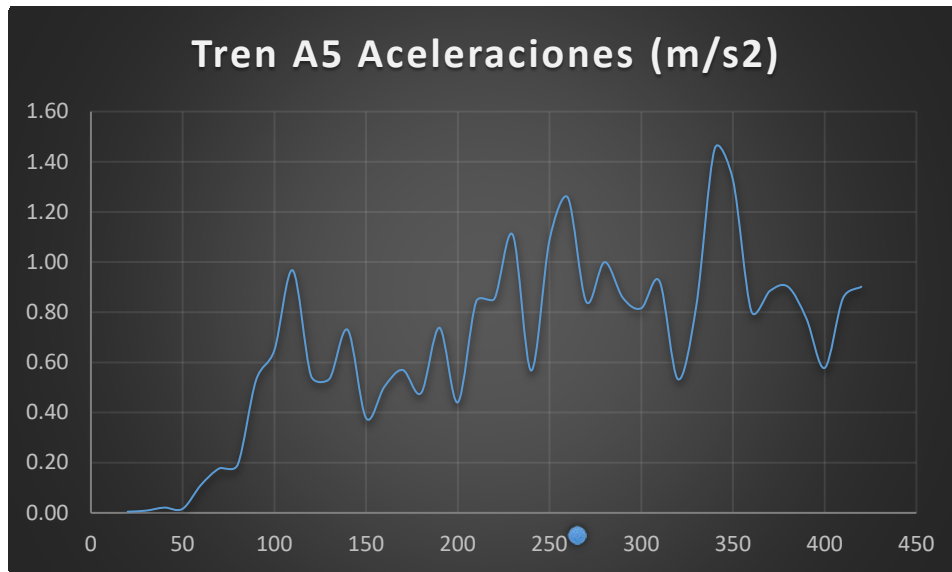
*Figura 4.92 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



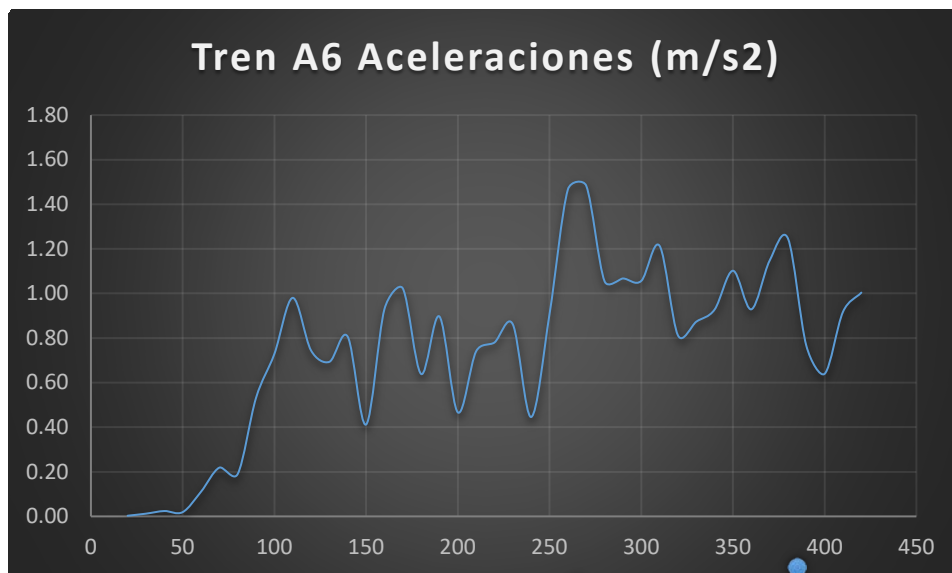
*Figura 4.93 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



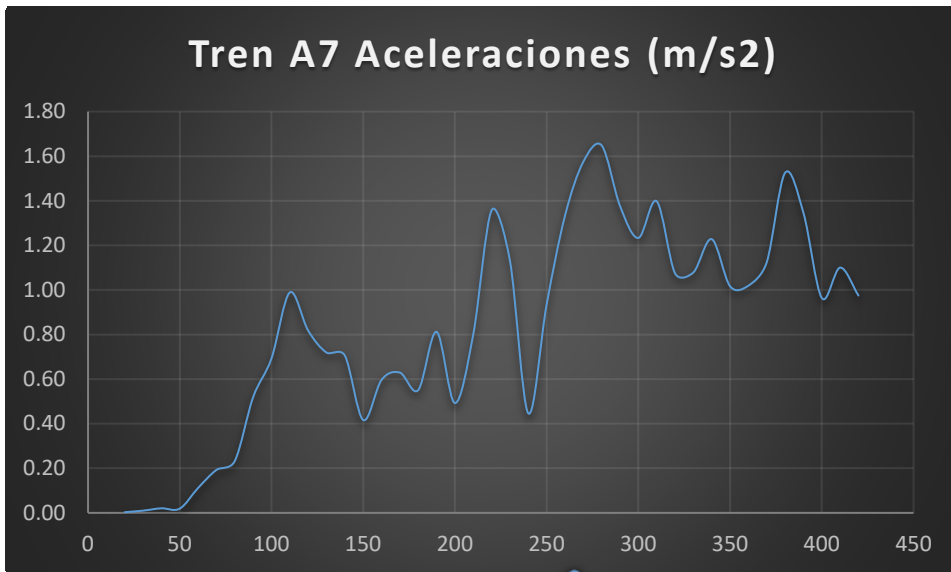
*Figura 4.94 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



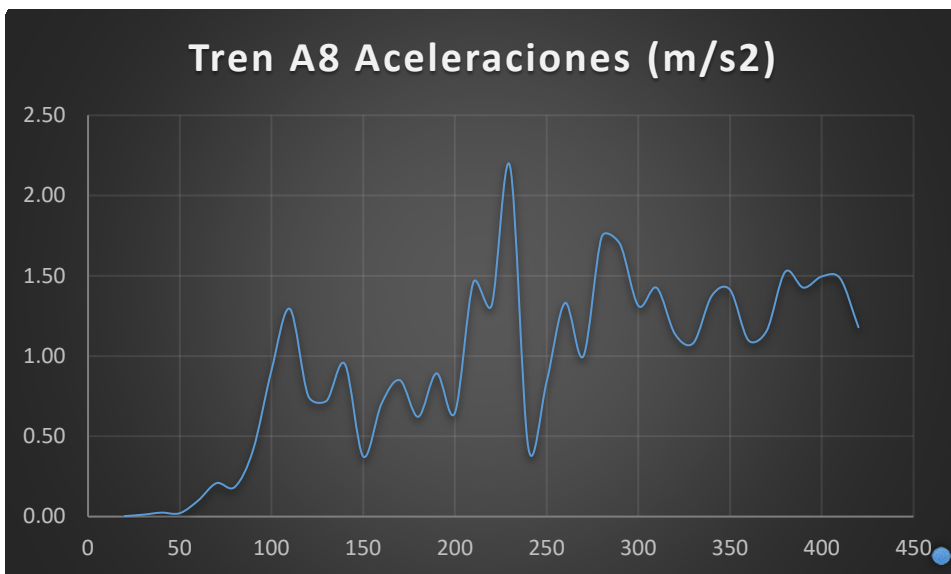
*Figura 4.95 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



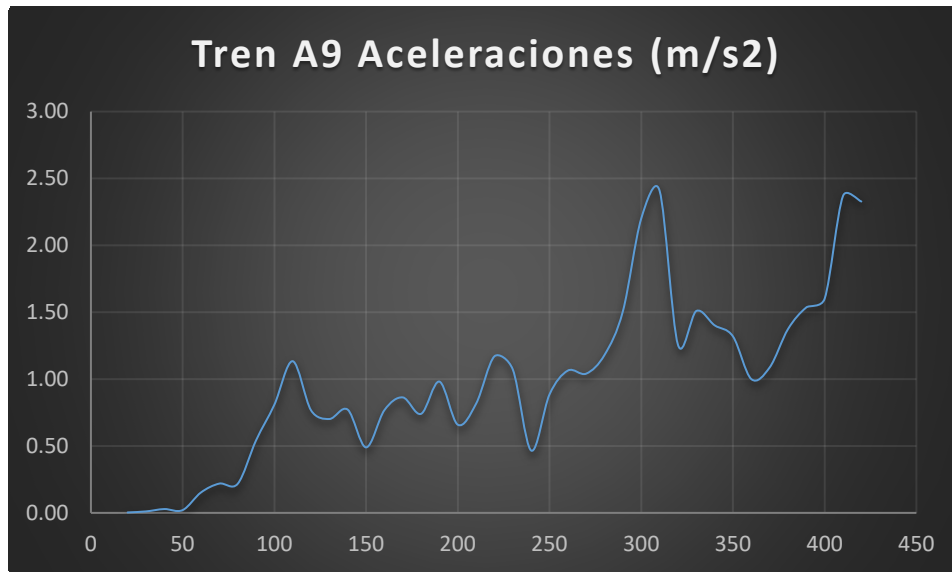
*Figura 4.96 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



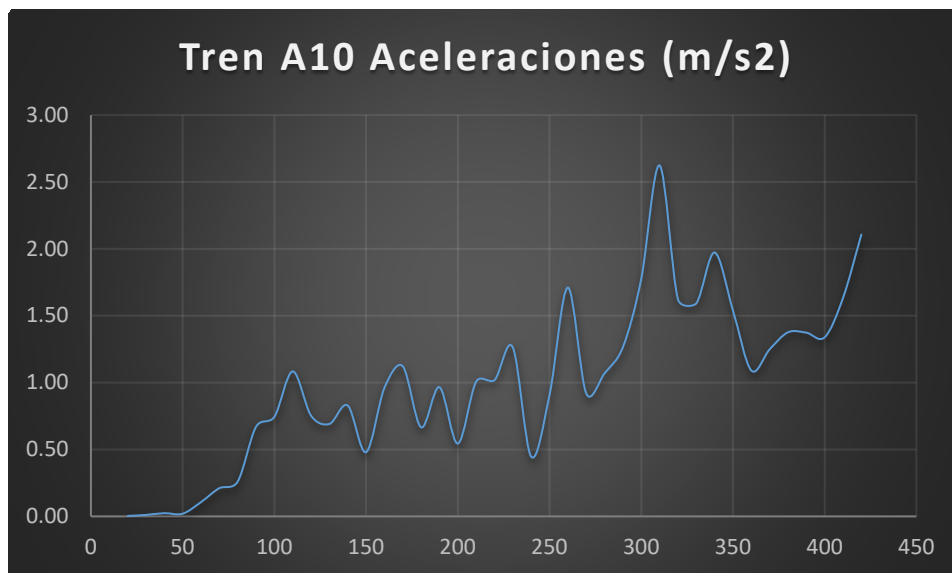
*Figura 4.97 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.98 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.99 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.100 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 200m de luz y relación 1/7.07*

### 4.3. Modelo Arco de 100m de luz

#### 4.3.1. Modelo relación flecha-luz 1/7.07

- Desplazamientos verticales máximos



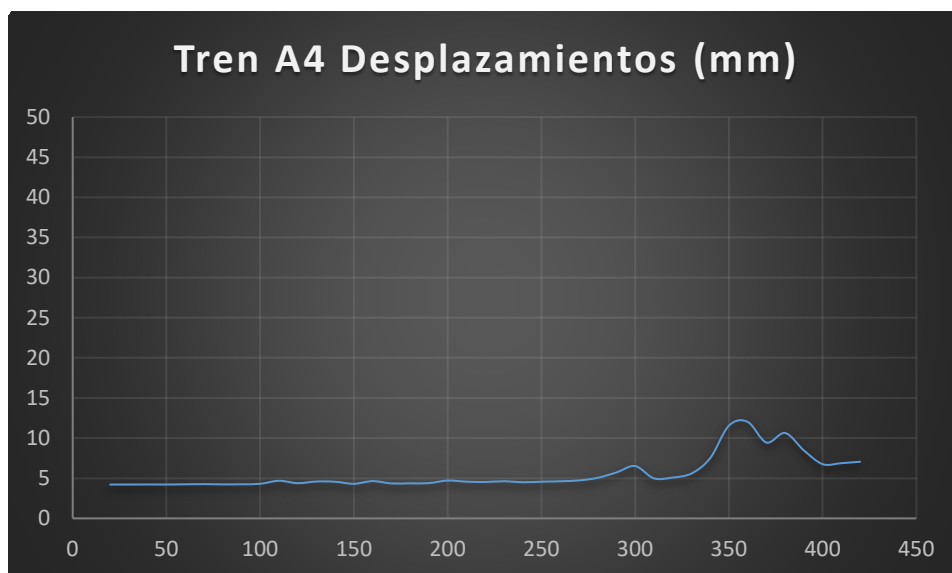
Figura 4.101 - Desplazamientos máximos tren A1 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07



Figura 4.102 - Desplazamientos máximos tren A2 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07



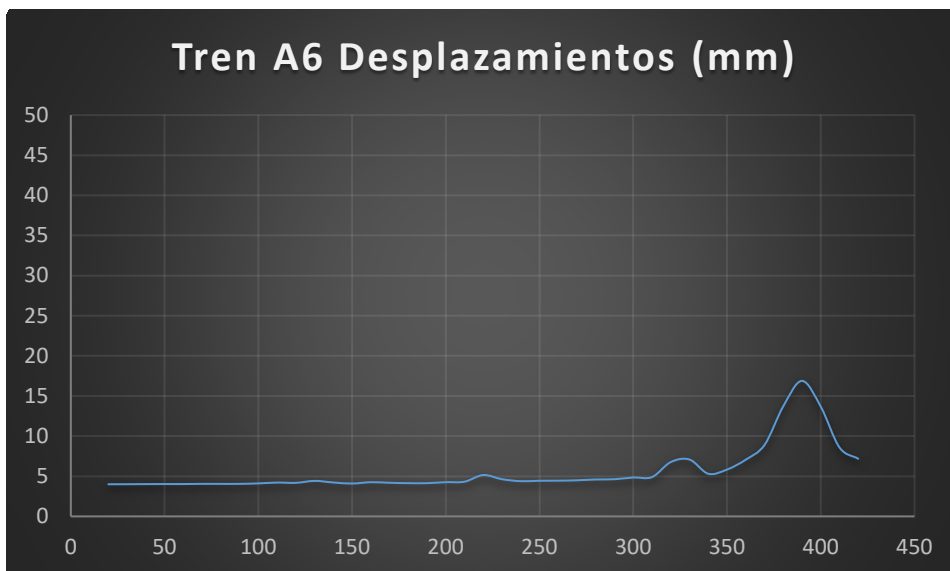
*Figura 4.103 - Desplazamientos máximos tren A3 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.104 - Desplazamientos máximos tren A4 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.105 - Desplazamientos máximos tren A5 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*

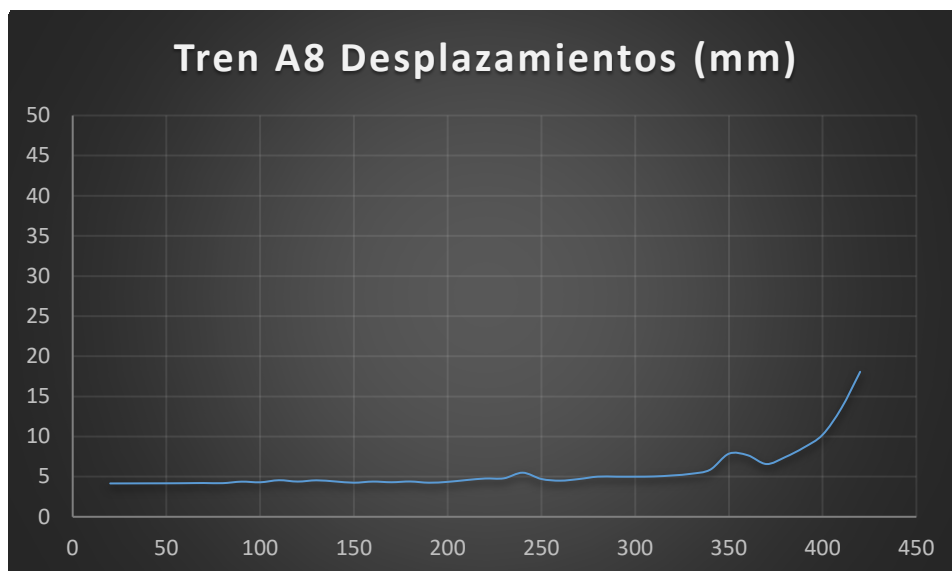


*Figura 4.106 - Desplazamientos máximos tren A6 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*

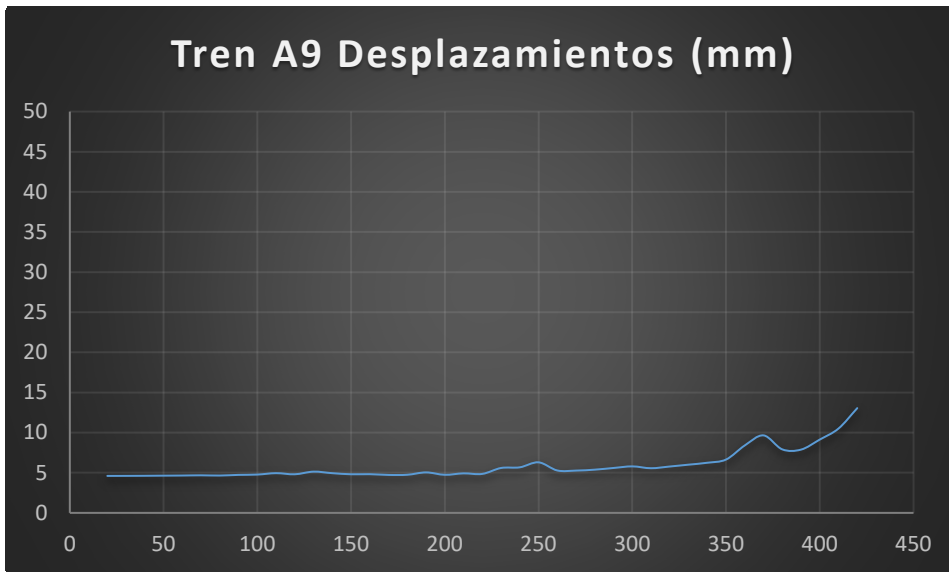




*Figura 4.107 - Desplazamientos máximos tren A7 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.108 - Desplazamientos máximos tren A8 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*

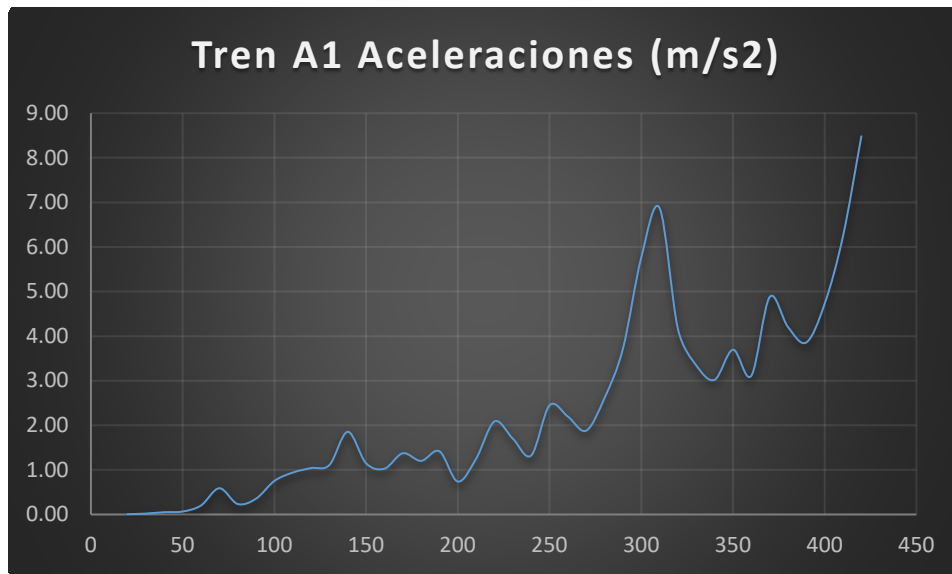


*Figura 4.109 - Desplazamientos máximos tren A9 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*

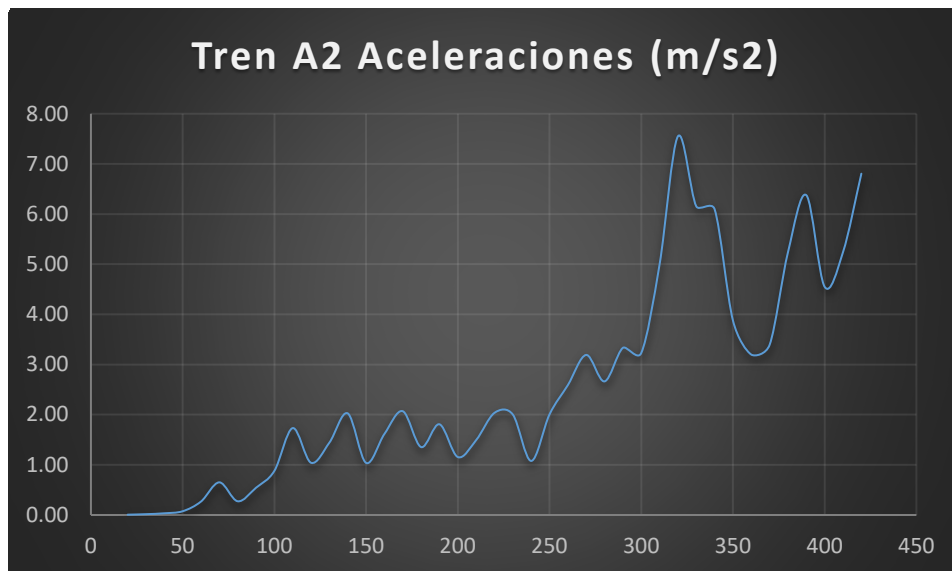


*Figura 4.110 - Desplazamientos máximos tren A10 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*

➤ Aceleraciones máximas



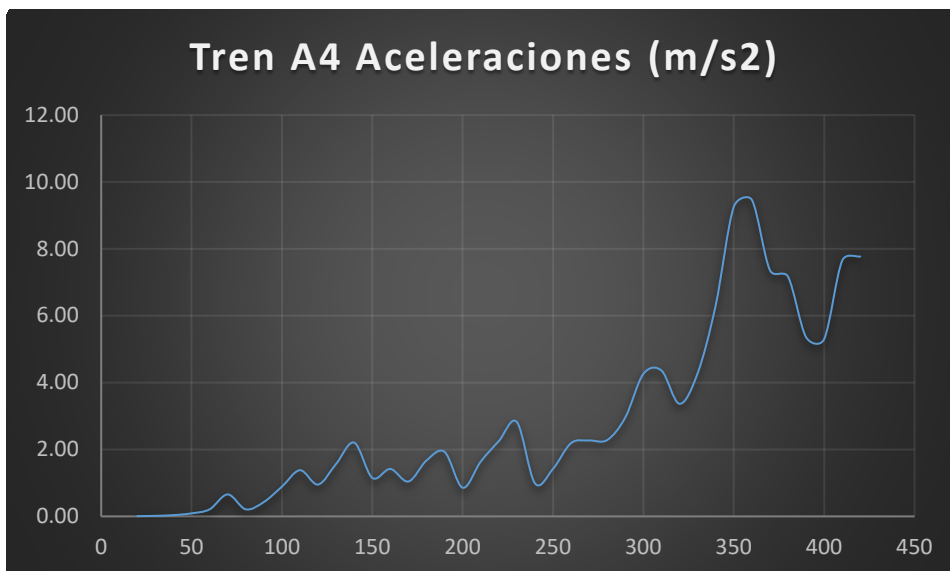
*Figura 4.111 - Aceleraciones máximas tren A1 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.112 - Aceleraciones máximas tren A2 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



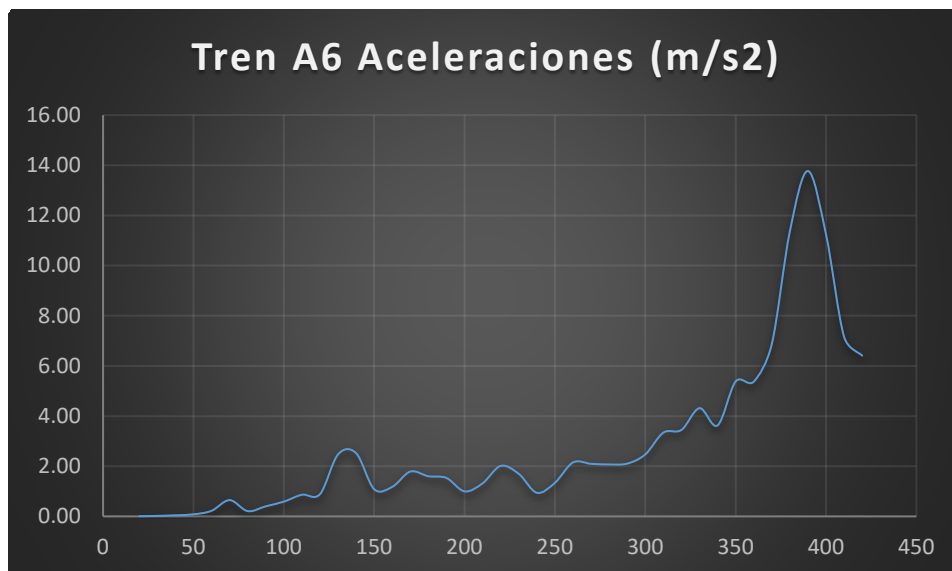
*Figura 4.113 - Aceleraciones máximas tren A3 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



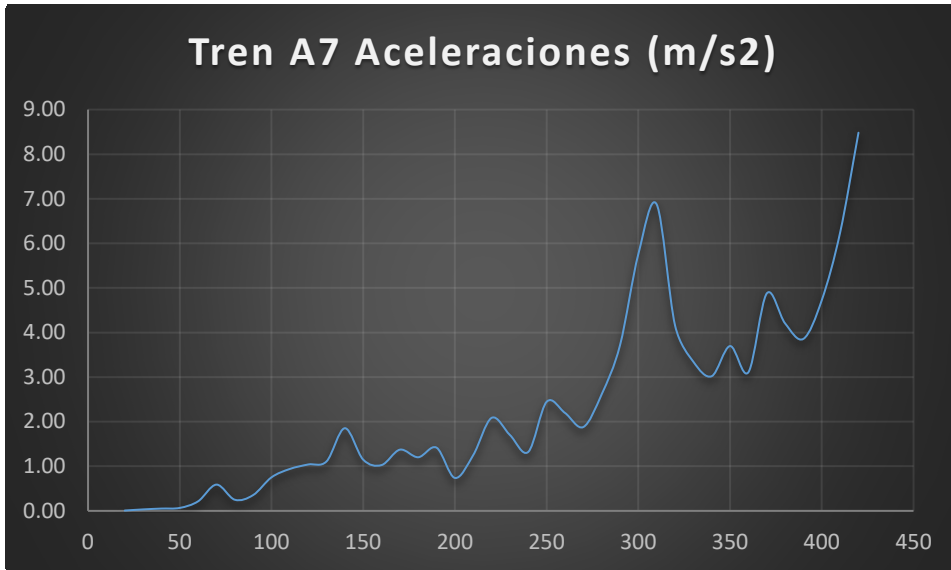
*Figura 4.114 - Aceleraciones máximas tren A4 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.115 - Aceleraciones máximas tren A5 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



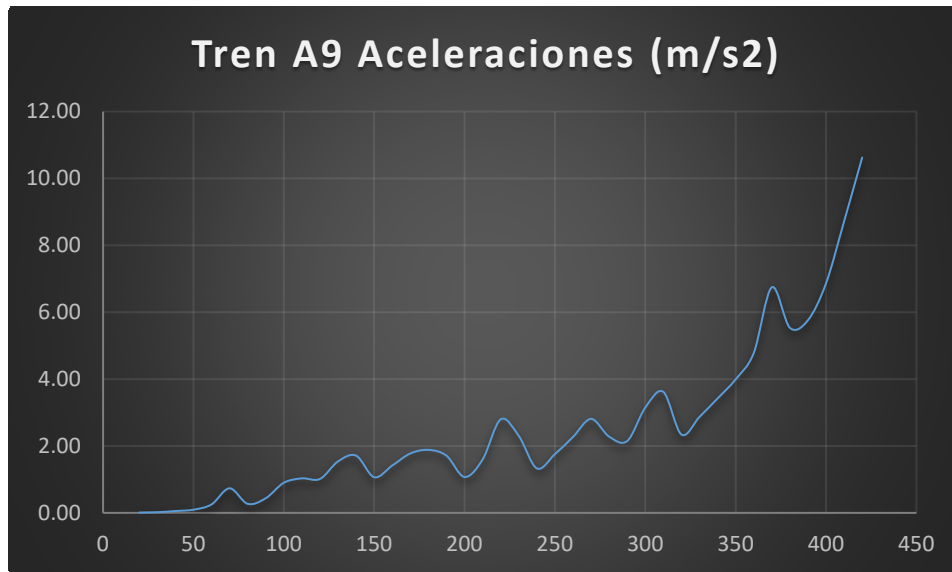
*Figura 4.116 - Aceleraciones máximas tren A6 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



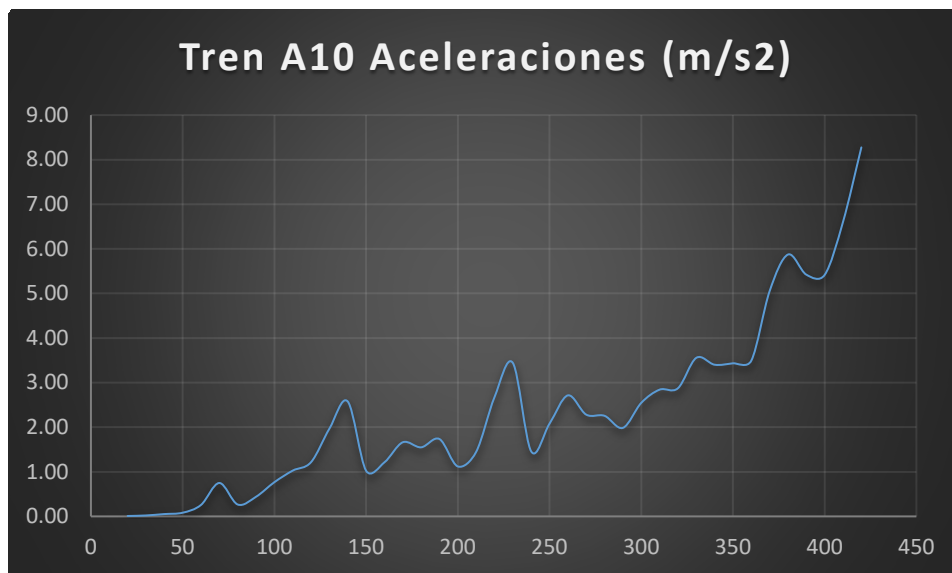
*Figura 4.117 - Aceleraciones máximas tren A7 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.118 - Aceleraciones máximas tren A8 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.119 - Aceleraciones máximas tren A9 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*



*Figura 4.120 - Aceleraciones máximas tren A10 en arco de 100m de luz y relación 1/7.07*

#### 4.4. Comparativa y análisis de los resultados

A continuación, se muestran las comparativas de desplazamientos máximos y aceleraciones máximas, de los 10 trenes HSLM para cada modelo.



#### 4.4.1 Modelo arco luz 300m

- Moledo arco 300m y relación flecha/luz 1/5

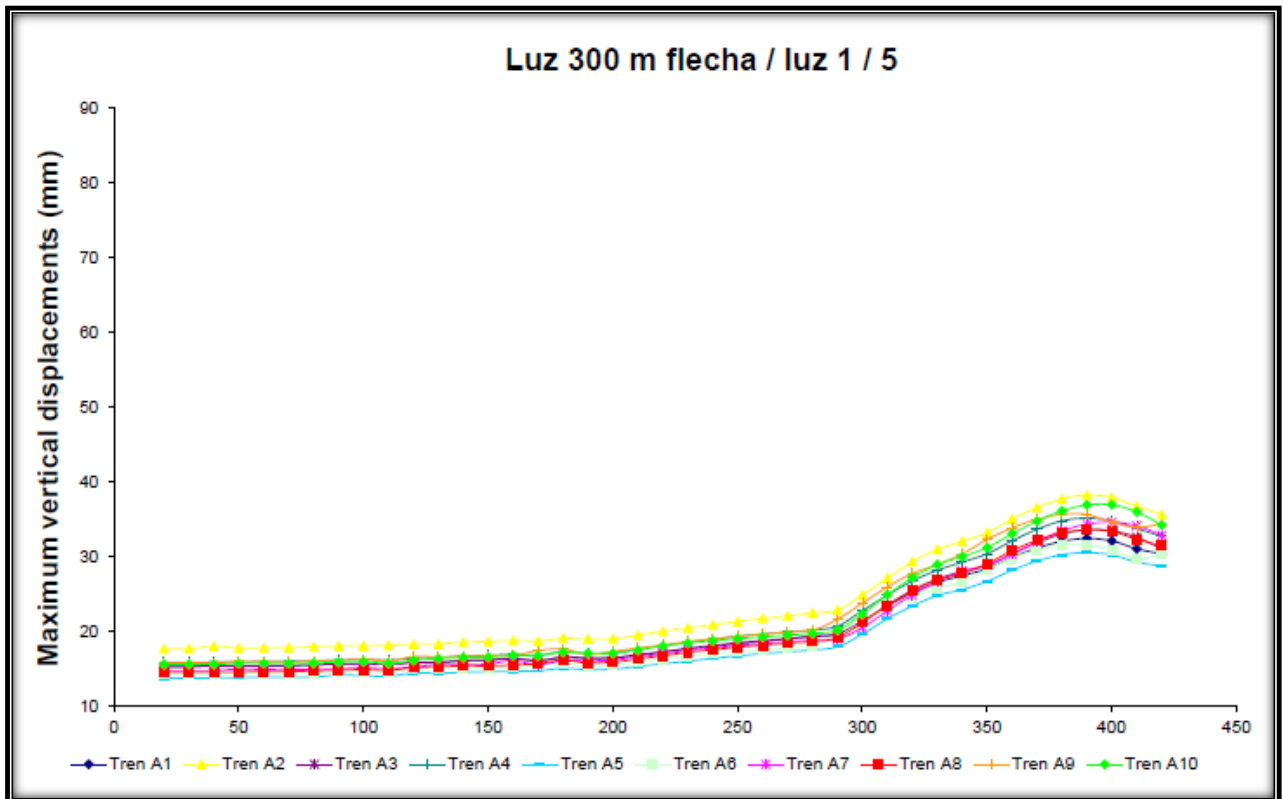


Figura 4.121 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación f/l 1/5

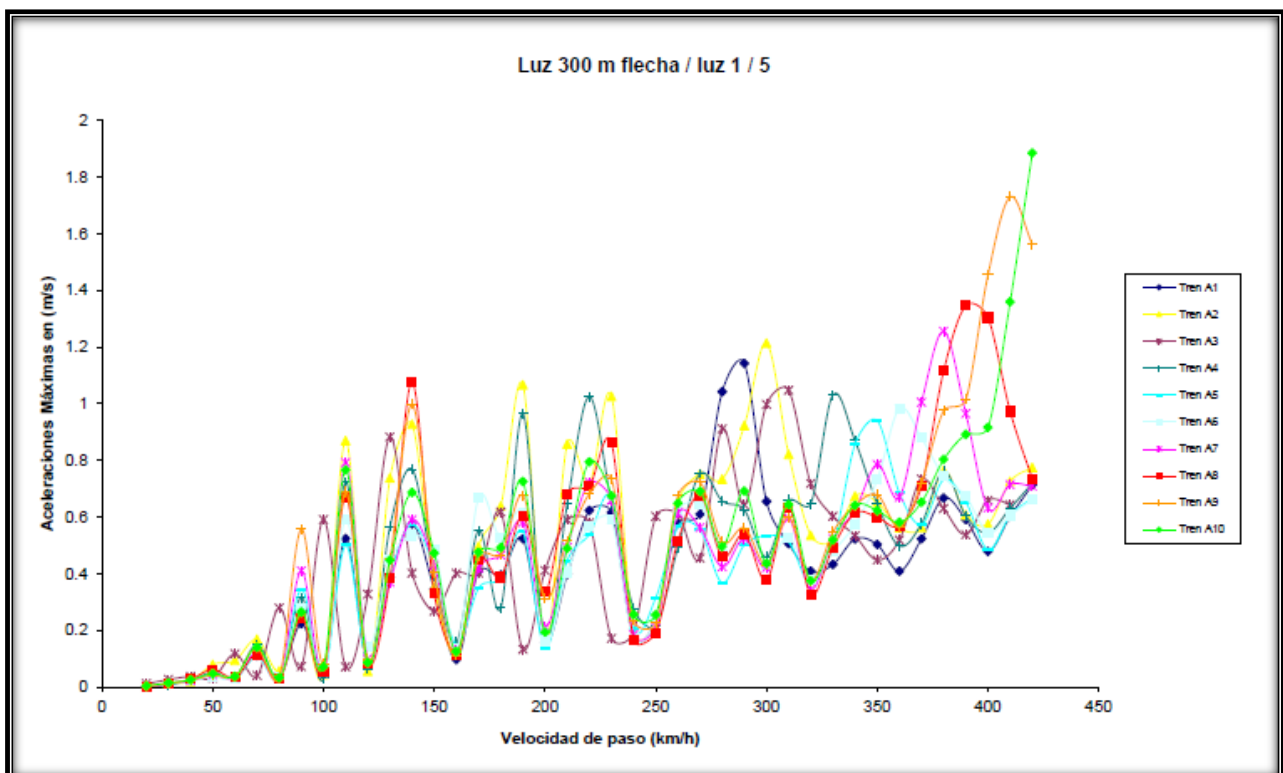


Figura 4.122 – Aceleraciones máximas luz 300m y relación f/l 1/5

En las gráficas anteriores, correspondientes al primer modelo se puede observar que los máximos **desplazamientos** los produce el tren **A2** para una velocidad de **390km/h**, cuyo valor es de **38.216mm**. Este tren está compuesto por 17 vagones intermedios con una longitud de 19 metros cada uno, una carga de 200 KN cada uno y una separación entre ejes de las ruedas de 3.5 metros.

Este máximo se producen en el nudo **1380** el cual se encuentra entre la 7º y la 8º pila del puente.

Aunque el tren A2 produce altas **aceleraciones**, no es el que da los máximas, ya que como se puede observar, estos máximos son producidos por el tren **A10** a una velocidad de **420 km/h**, cuyo valor es de **1.884m/s<sup>2</sup>**. Este tren está compuesto por 11 vagones intermedios con una longitud de 27 metros cada uno, una carga de 210 KN cada uno y una separación entre ejes de las ruedas de 2 metros.

Este máximo se producen en el nudo **1507** el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

➤ Moledo arco 300m y relación flecha/luz 1/7.07

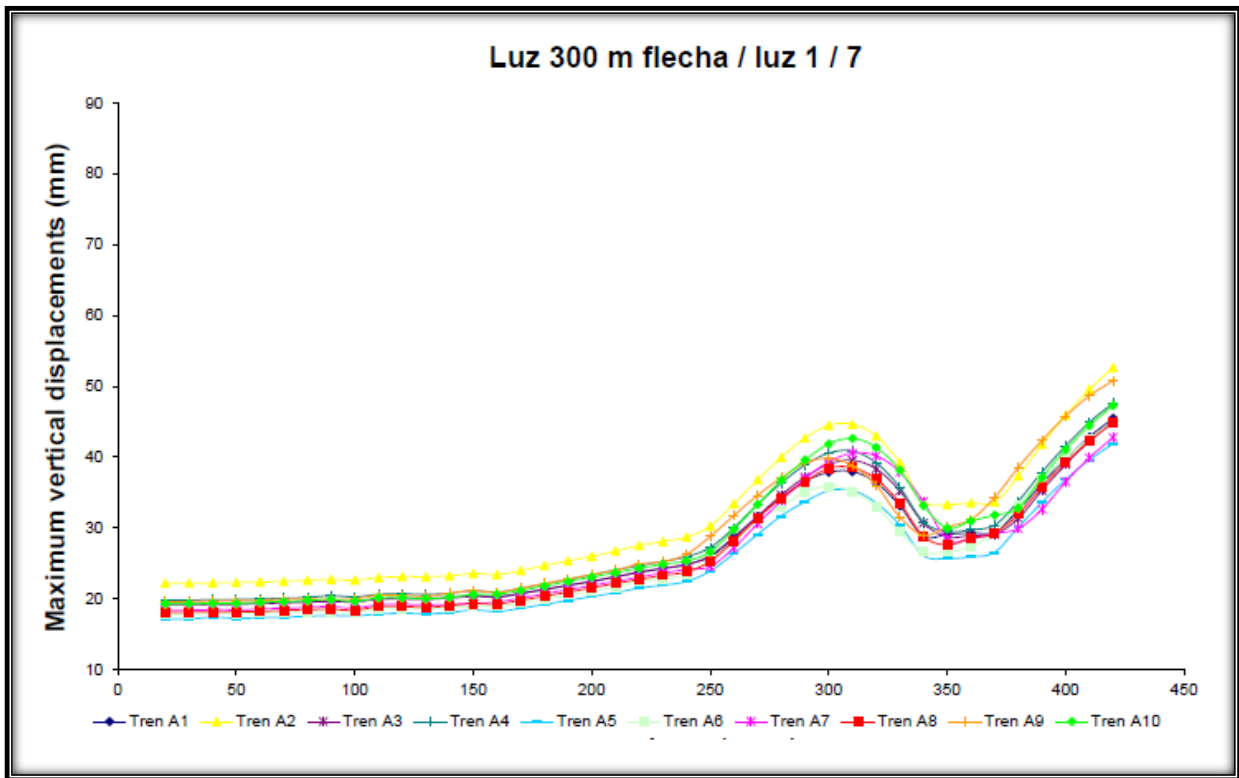


Figura 4.123 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación f/l 1/7.07

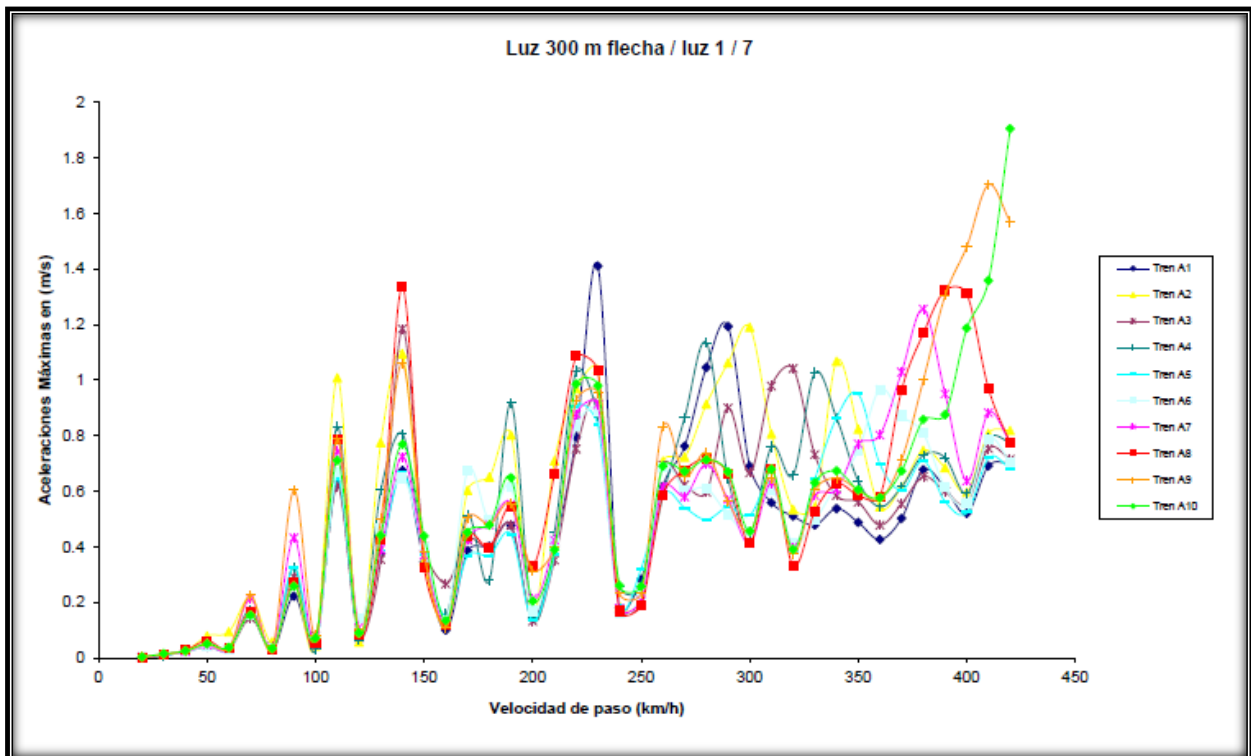


Figura 4.124 - Aceleraciones máximas luz 300m y relación f/l 1/7.07

Al igual que en el anterior modelo, se puede observar en este segundo modelo, que los máximos **desplazamientos** los produce el tren **A2** y para una velocidad de **420km/h**, cuyo valor es de **52.643mm**.

Este máximo se producen en el nudo **1330** el cual se encuentra entre la 6ª y la 7ª pila del puente.

Aunque el tren A2 produce altas **aceleraciones**, no es el que da los máximos, ya que como se puede observar, estos máximos son producidos por el tren **A10** a una velocidad de **420 km/h**, cuyo valor es de **1.904m/s<sup>2</sup>**.

Este máximo se producen en el nudo **1507** el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

➤ Moledo arco 300m y relación flecha/luz 1/10

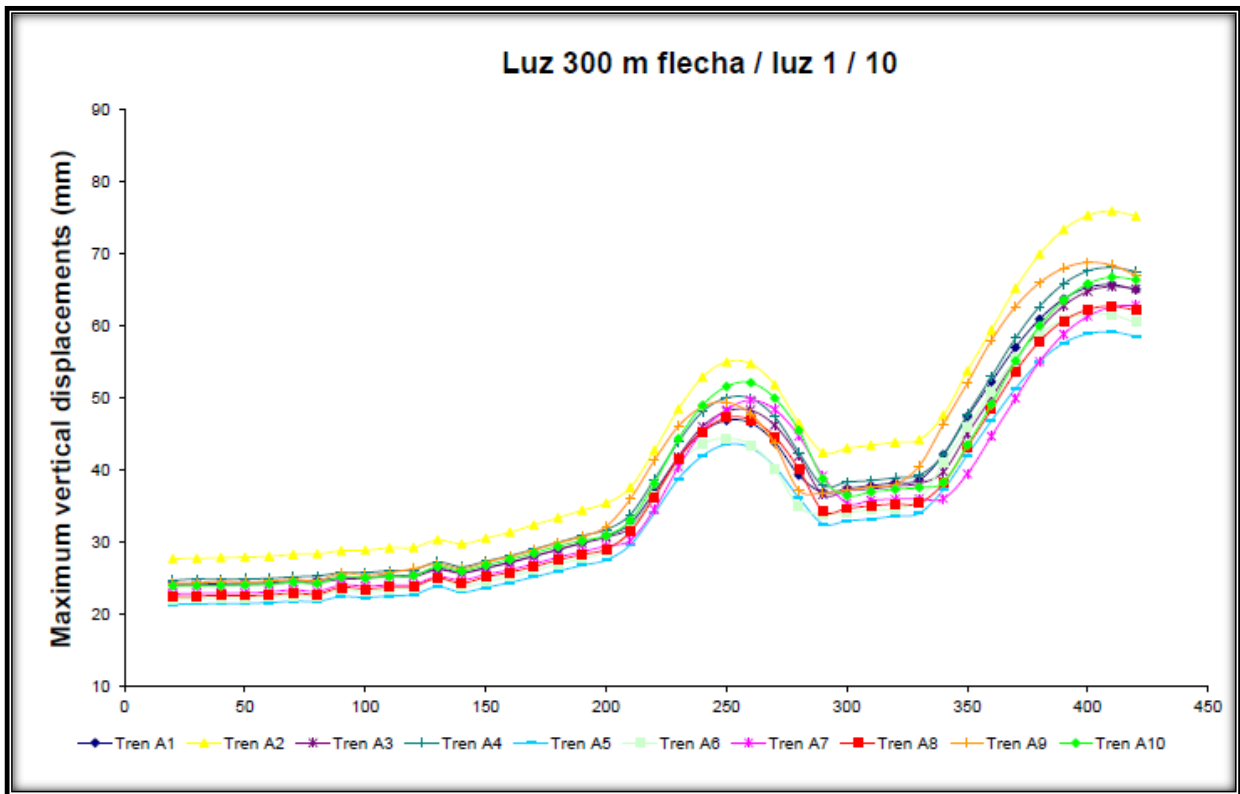


Figura 4.125 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación  $f/l$  1/10

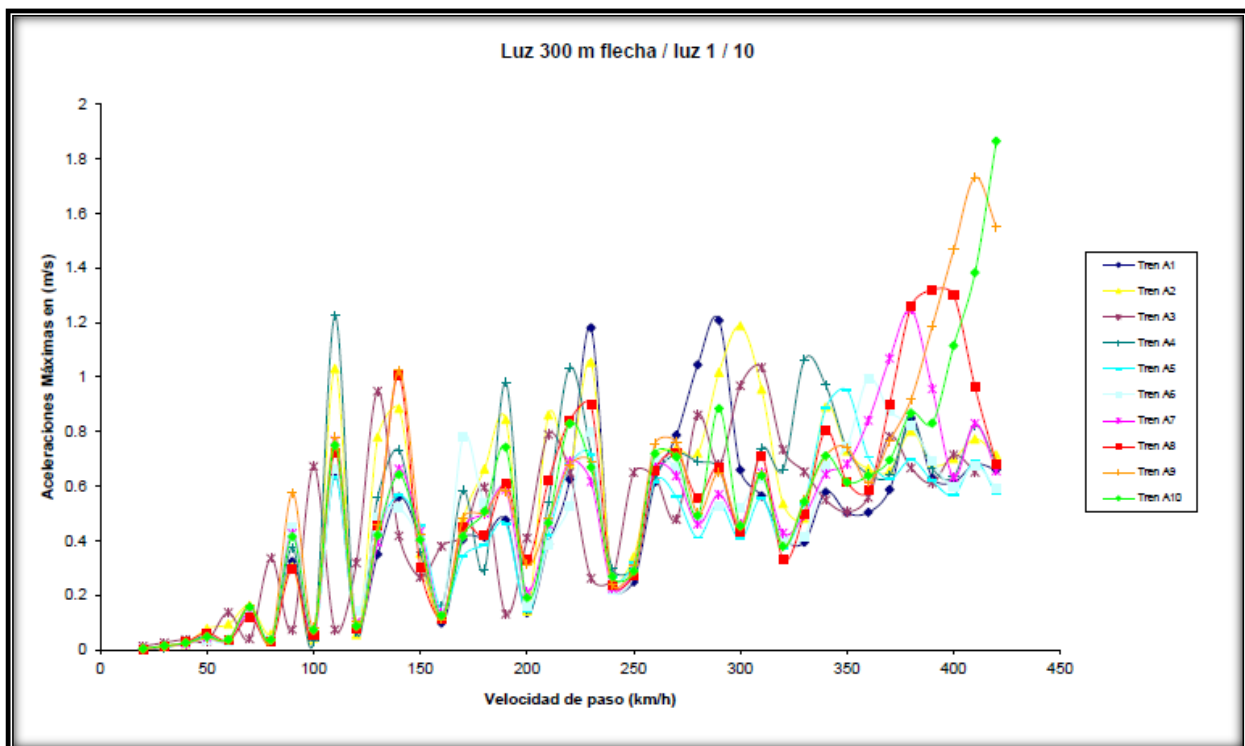


Figura 4.126 - Aceleraciones máximas luz 300m y relación  $f/l$  1/10

Al igual que en el anterior modelo, se puede observar en este tercer modelo, que los máximos **desplazamientos** los produce el tren **A2** y para una velocidad de **410km/h**, cuyo valor es de **75.886mm**.

Este máximo se producen en el nudo **1370** el cual se encuentra entre la 7ª y la 8ª pila del puente.

Aunque el tren A2 produce altas **aceleraciones**, no es el que da los máximos, ya que como se puede observar, estos máximos son producidos por el tren **A10** a una velocidad de **420 km/h**, cuyo valor es de **1.864m/s<sup>2</sup>**.

Este máximo se producen en el nudo **1507** el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

➤ Moledo arco 300m y relación flecha/luz 1/15

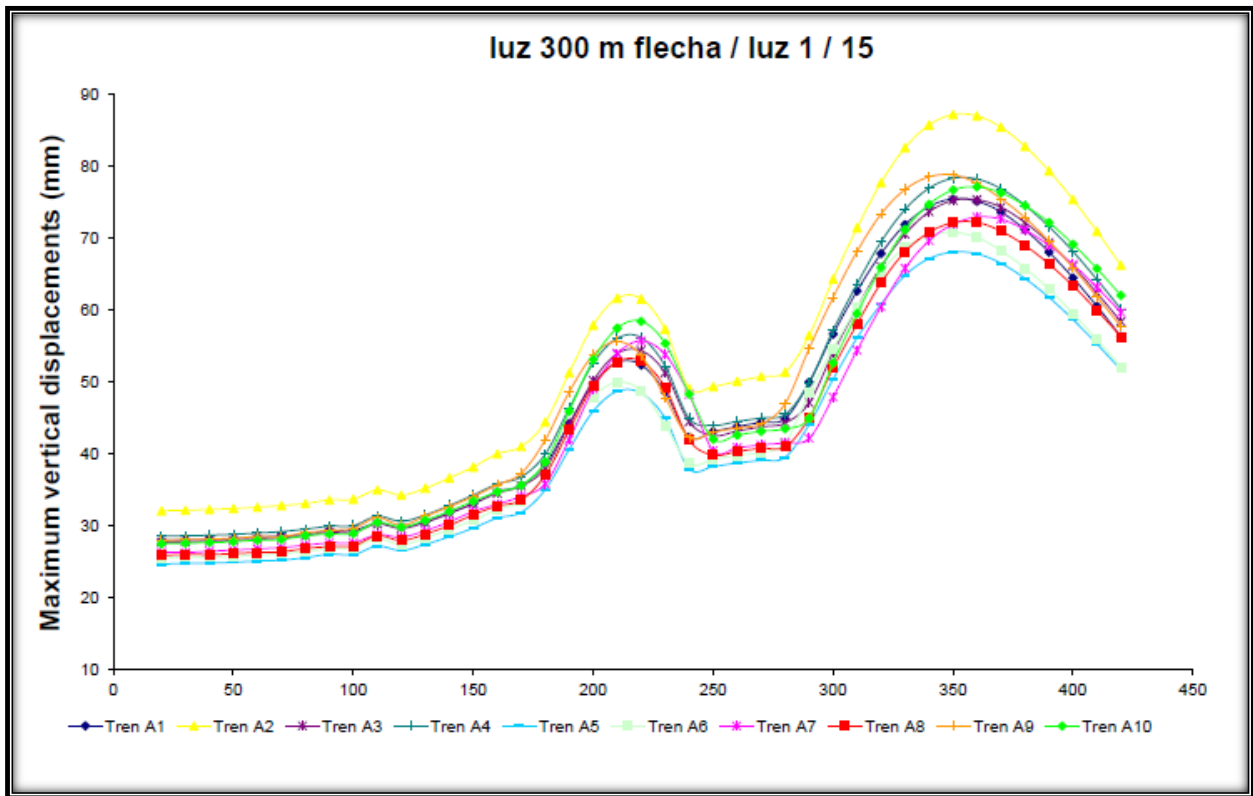


Figura 4.127 – Desplazamientos máximos luz 300m y relación  $f/l$  1/15

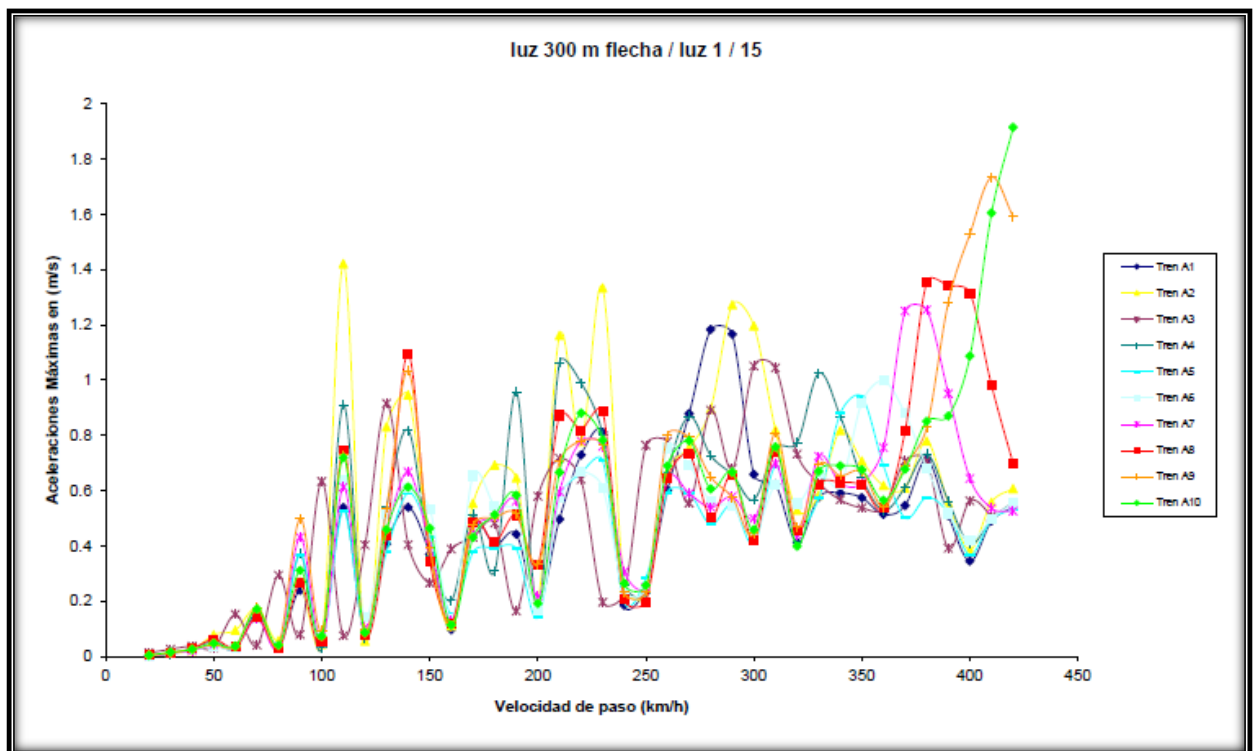
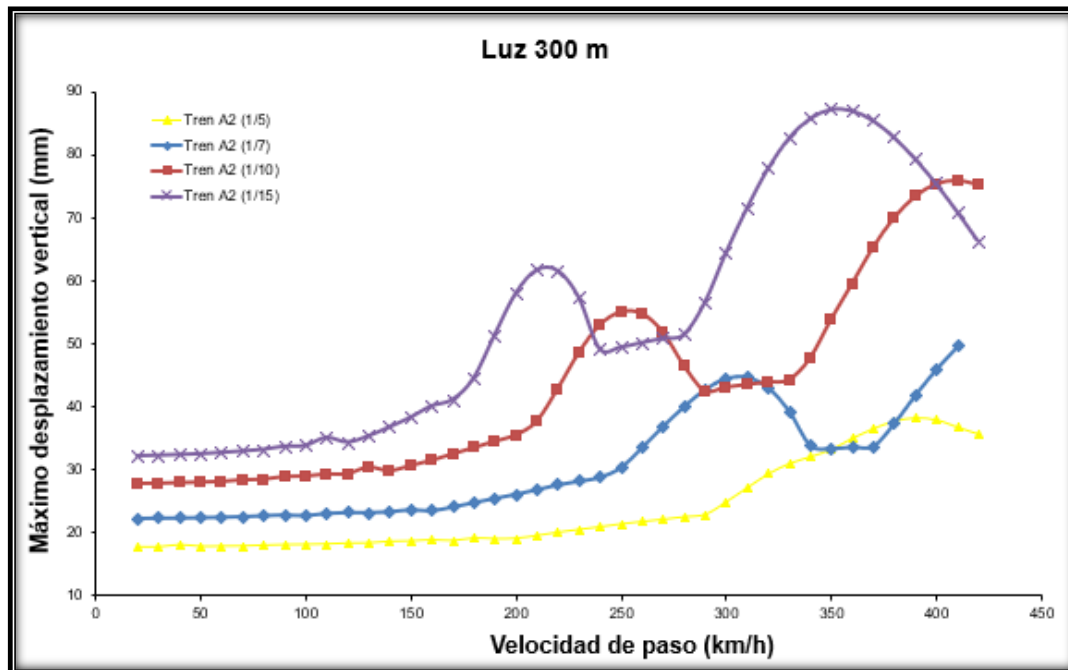


Figura 4.128 - Aceleraciones máximas luz 300m y relación  $f/l$  1/15

Al igual que en el anterior modelo, se puede observar en este cuarto modelo, que los máximos desplazamientos los produce el tren **A2** y para una velocidad de **350km/h**, cuyo valor es de **87.154mm**.

Este máximo se producen en el nudo **1368** el cual se encuentra entre la 7<sup>o</sup> y la 8<sup>o</sup> pila del puente.



*Figura 4.129 – Comparación trenes A2 para luz de 300m*

De las gráficas de desplazamientos máximos de los puentes arco de 300 m de luz se observa que, se producen amplificaciones considerables para velocidades decrecientes con la flecha del arco. Esas amplificaciones son independientes del tipo de tren, por lo que son independientes de la distancia entre ejes, y está relacionado con la carga “repartida” que supone el tren. Se trata del efecto del movimiento global del arco, es decir, el efecto resonante que provoca la amplificación involucra a todo el arco. En ese sentido el tren A2 es el que más carga produce por metro de longitud. Por otro lado, cuando la flecha disminuye, el desplazamiento vertical aumenta.

Aunque el tren A2 produce altas **aceleraciones**, no es el que da los máximos, ya que como se puede observar, estos máximos son producidos por el tren **A10** a una velocidad de **420 km/h**, cuyo valor es de **1.914m/s<sup>2</sup>**.

Este máximo se producen en el nudo **1507** el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

Las aceleraciones máximas, sin embargo, están relacionadas con la vibración vertical del tablero, y por eso se producen los máximos en el vano extremo que es el menos arriostrado. Dado que las luces del tablero son similares, los resultados en aceleraciones también son parecidos, es decir, no hay una influencia relevante en la aceleración máxima de la relación flecha luz del arco, para estas luces.



#### 4.4.2 Modelo arco luz 200m

- Moledo arco 200m y relación flecha/luz 1/7.07

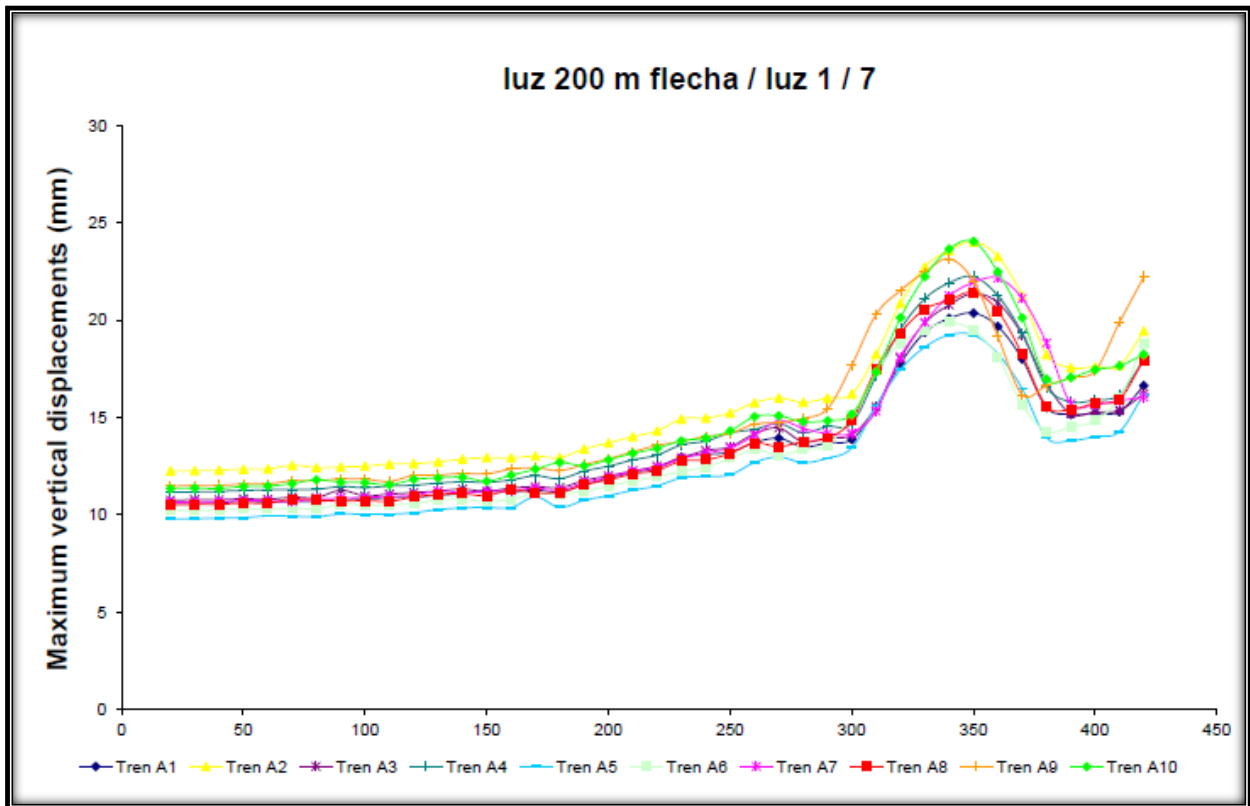


Figura 4.130 – Desplazamientos máximos luz 200m y relación f/l 1/7.07

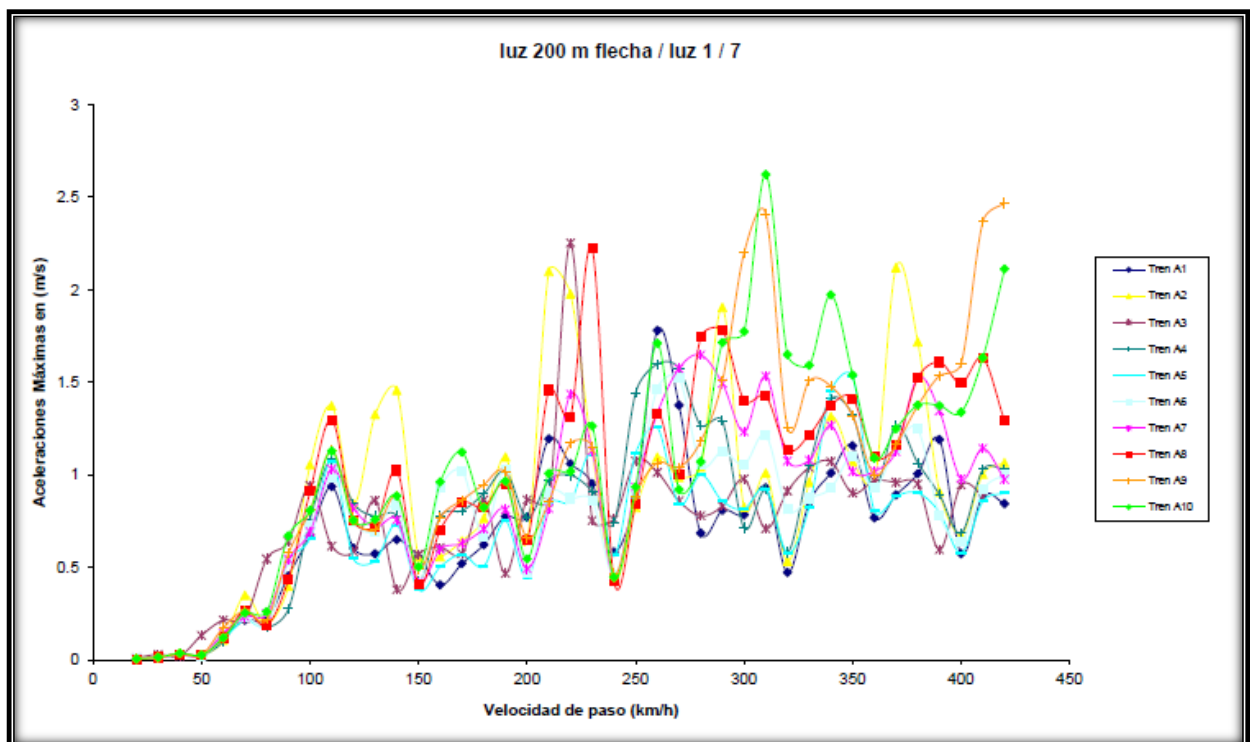
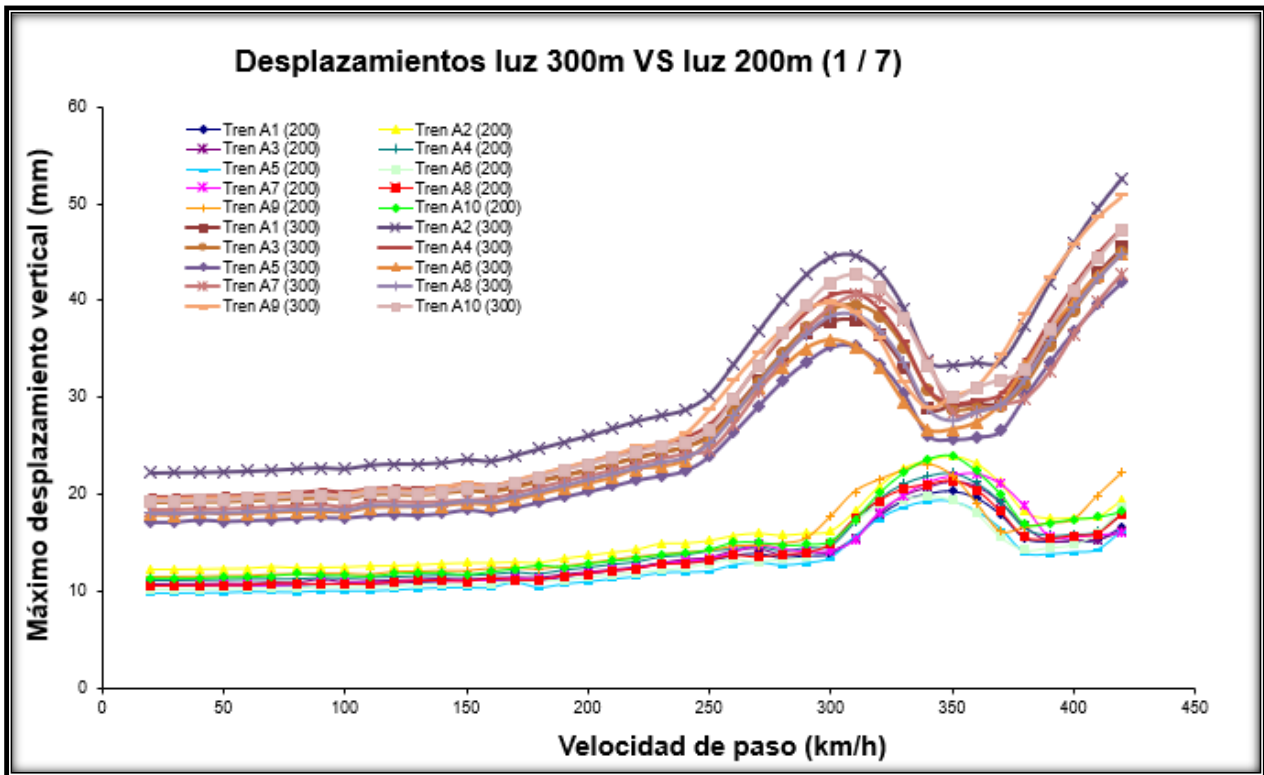


Figura 4.131 - Aceleraciones máximas luz 200m y relación f/l 1/7.07

Se puede observar en este quinto modelo, que los máximos desplazamientos los produce el tren A10 y para una velocidad de 350km/h, cuyo valor es de 24.054mm.

Este máximo se producen en el nudo 862 el cual se encuentra entre la 7ª y la 8ª pila del puente.



*Figura 4.132 Desplazamientos luz 300m vs luz 200m (1/7)*

En la curva de desplazamientos se observa un fenómeno similar al del arco de 300 m, en el sentido de que la amplificación se produce en las mismas velocidades, independientemente del tipo de tren. Además los desplazamientos verticales son mayores en el arco de 300 m y las amplificaciones se producen a velocidades más bajas.

El tren A10 es en este caso el que induce las mayores **aceleraciones**, estos máximos son producidos a una velocidad de 310 km/h, cuyo valor es de 2.624m/s<sup>2</sup>.

Este máximo se producen en el nudo 966 el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

En el caso de las aceleraciones, siguen estando asociadas a la vibración del tablero, son fuertemente dependientes del tipo de tren y de la distancia entre bogies, y en este caso los valores son más elevados, como es habitual al disminuir la luz del tablero.

#### 4.4.3 Modelo arco luz 100m

➤ Moledo arco 100m y relación flecha/luz 1/7.07

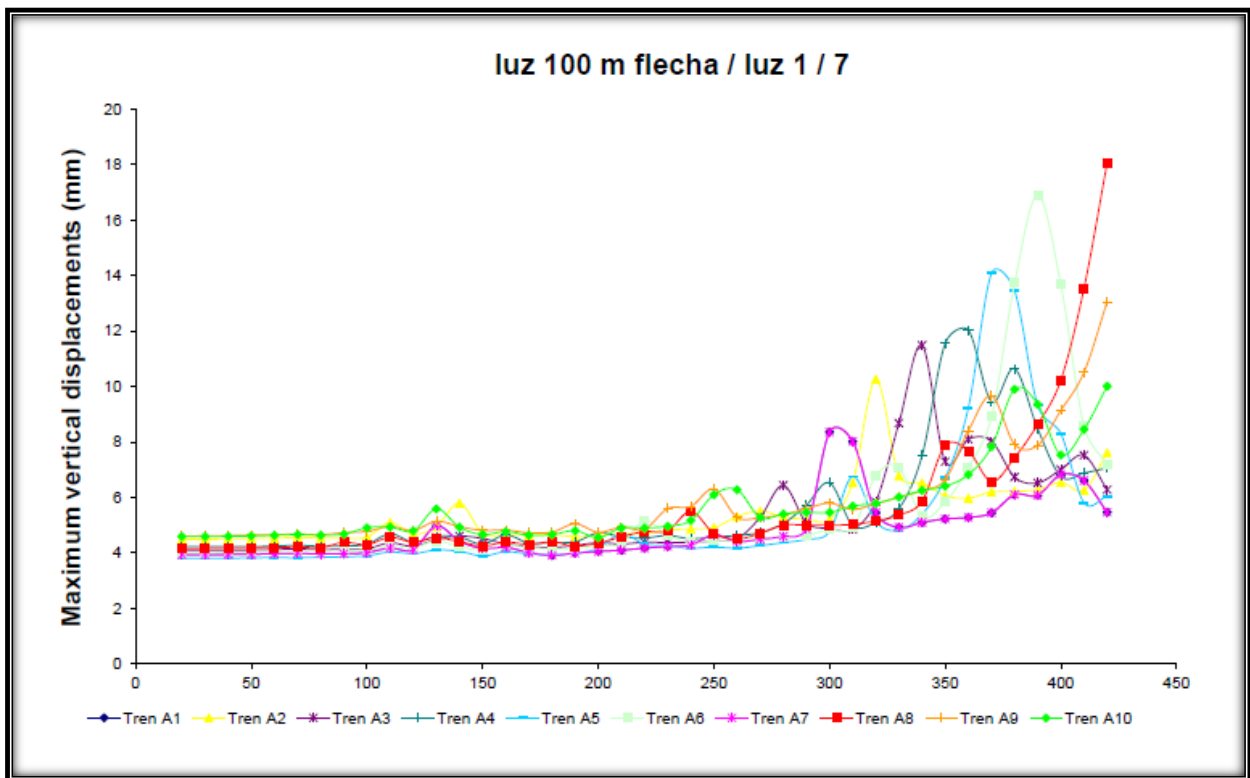


Figura 4.133 – Desplazamientos máximos luz 100m y relación f/l 1/7.07

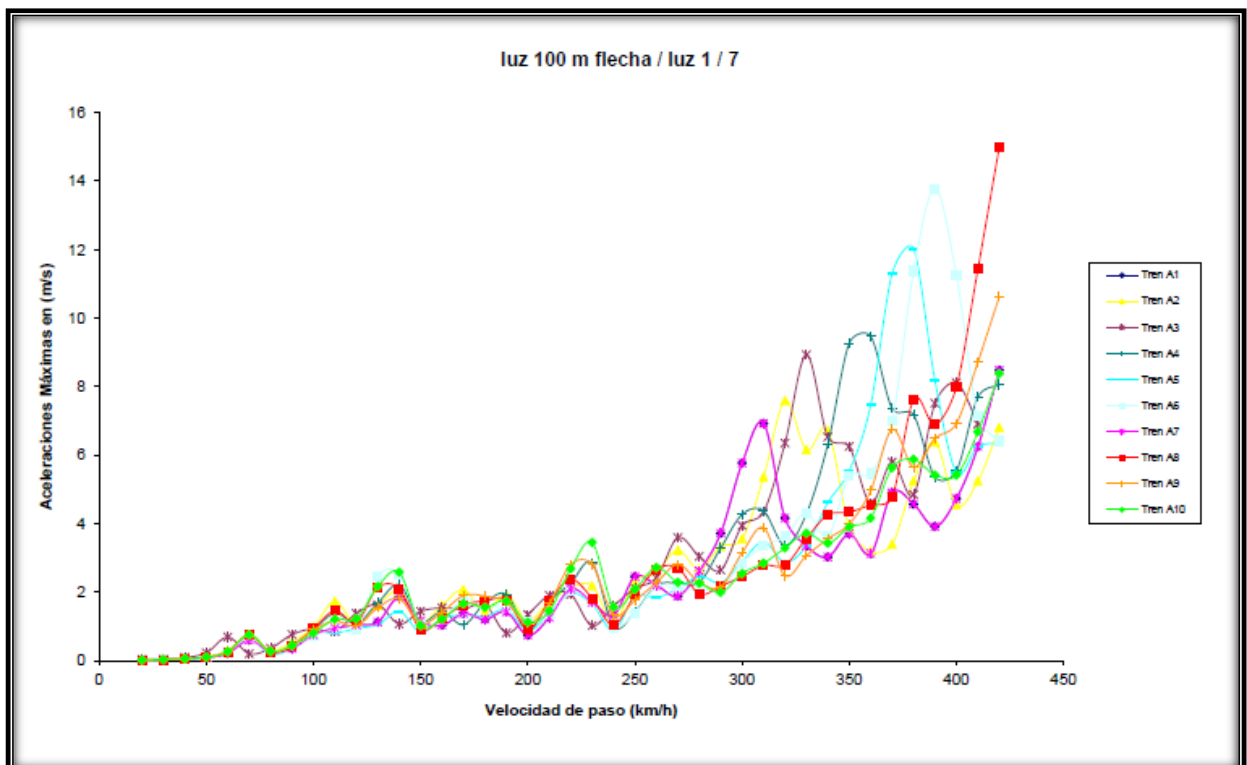


Figura 4.134 - Aceleraciones máximas luz 100m y relación f/l 1/7.07

Se puede observar en este sexto modelo, que los máximos **desplazamientos** los produce el tren **A8** y para una velocidad de **420km/h**, cuyo valor es de **18.064mm**. Este tren está compuesto por 12 vagones intermedios con una longitud de 25 metros cada uno, una carga de 190 KN cada uno y una separación entre ejes de las ruedas de 2,5 metros.

Este máximo se producen en el nudo **580** el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

Para el arco de 100 m de luz los desplazamientos verticales máximos están asociados a la vibración vertical del tablero, y son fuertemente dependientes de la distancia entre bogies, los efectos resonantes involucran únicamente al tablero. Los máximos están asociados al último vano que es el menos coaccionado. Es similar a lo que ya venía ocurriendo con las aceleraciones máximas.

El tren **A8** es en este caso el que induce las mayores **aceleraciones**, estos máximos son producidos a una velocidad de **420 km/h**, cuyo valor es de **15.088m/s<sup>2</sup>**. Este tren está compuesto por 12 vagones intermedios con una longitud de 25 metros cada uno, una carga de 190 KN cada uno y una separación entre ejes de las ruedas de 2,5 metros.

Este máximo se producen en el nudo **579** el cual se encuentra entre la última pila y el estribo final del puente.

En este caso la luz tan corta del tablero hace que las aceleraciones sean elevadas, por encima de lo que marca la normativa, por lo que habría que ajustar la rigidez del tablero para evitar esos efectos. Esto se podría solucionar reduciendo la esbeltez.

Si se divide la velocidad del tren por la longitud del puente (luz del arco en un caso o luz del tablero en otro) se obtiene la frecuencia con la que pasa la carga por encima del puente. Si esa frecuencia coincide o está próxima con la frecuencia natural del puente (arco o tablero) se producen efectos resonantes, es decir, se amplifican muchos los desplazamientos y aparecen grandes aceleraciones. Por eso cuando las velocidades se van acercando a la de la frecuencia natural aparecen las jorobas en las gráficas de desplazamientos máximos.

A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados máximos de los 6 modelos, para a simple vista, poder obtener las conclusiones del presente estudio.

|   | Modelo 1<br>(arco 300m<br>1/5) | modelo 2<br>(arco 300m<br>1/7.07) | modelo 3<br>(arco 300m<br>1/10) | modelo 4<br>(arco 300m<br>1/15) | modelo 5<br>(arco 200m<br>1/7.07) | modelo 6<br>(arco 100m<br>1/7.07) |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| desplazamiento<br>máximo (mm)             | 38.216                         | 52.643                            | 75.866                          | 87.154                          | 24.054                            | 18.064                            |
| velocidad de<br>paso (km/h)               | 390                            | 420                               | 410                             | 350                             | 350                               | 420                               |
| tren que lo<br>produce                    | 2                              | 2                                 | 2                               | 2                               | 10                                | 8                                 |
| nudo en el que<br>se da                   | 1380                           | 1330                              | 1370                            | 1368                            | 862                               | 580                               |
|   |                                |                                   |                                 |                                 |                                   |                                   |
| aceleración<br>máxima (m/s <sup>2</sup> ) | 1.884                          | 1.905                             | 1.864                           | 1.914                           | 2.624                             | 15.009                            |
| velocidad de<br>paso (km/h)               | 420                            | 420                               | 420                             | 420                             | 310                               | 420                               |
| tren que lo<br>produce                    | 10                             | 10                                | 10                              | 10                              | 10                                | 8                                 |
| nudo en el que<br>se da                   | 1507                           | 1507                              | 1507                            | 1507                            | 966                               | 579                               |

**Tabla 7 - Resultados de los modelos**

## 5. CONCLUSIONES FINALES

- 1) La primera conclusión, es que, los **máximos desplazamientos y aceleraciones** se obtienen a altas velocidades, por encima de los 300km/h, que es la velocidad a la que circula un tren de alta de velocidad, el AVE circula a una velocidad máxima de 310km/h.
- 2) Otra conclusión importante, que se puede obtener de este estudio, es que se producen mayores desplazamientos, a medida que aumenta la luz del arco y disminuye la relación flecha/luz.

Según la normativa, el desplazamiento vertical máximo, que se puede producir en el tablero de un puente, es la que viene definida por la siguiente relación:

$F_{max} = L/2400$  siendo L la longitud total del puente y definida para velocidades de entre 280km/h y 350km/h.

Aunque las velocidades, para las que se obtienen los desplazamientos verticales máximos, son superiores a los 350km/h, cabe recordar que la velocidad máxima del AVE es de 310km/h. Las longitudes de los tableros son de: 462m para el arco con una luz de 300m, 334m para el arco con una luz de 200m y 169m para el arco con una luz de 100m. Por tanto, desplazamientos verticales máximos admitidos y obtenidas son:

|                                | ARCO 300M DE LUZ | ARCO 200M DE LUZ | ARCO 100M DE LUZ |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Desplazamiento vertical máximo | 0.1925M          | 0.139M           | 0.070M           |
| Desplazamientos obtenidos      | 0.087M           | 0.024M           | 0.018M           |

*Tabla 8 – Desplazamientos verticales máximos*

**A la vista de los resultados, los desplazamientos verticales máximos obtenidos son inferiores a las marcadas por la normativa.**

- 3) Por otro lado, las **aceleraciones** son prácticamente las mismas, para una luz de arco concreta, aunque varié la relación flecha/luz. Si aumenta esta aceleración, a medida que disminuye la luz del arco.

Según la IAPF-07 <sup>10</sup>, normativa vigente, establece que las aceleraciones máximas en puentes de vía con balasto deben ser inferior a 3.5m/seg<sup>2</sup>. Esta aceleración máxima, se establece para evitar problemas de estabilidad del balasto y que esto provoque problemas de seguridad.

Como se puede observar en la tabla de resultados, esto no se cumple para el tren con una luz de arco de 100 metros ya que la aceleración máxima es de 15.009 m/s<sup>2</sup>.

- 4) En el caso arco de luz 300m, como se puede observar en la siguiente tabla, el tren A2 es el de mayor carga, es por ello que resultan de este tipo de tren los mayores desplazamientos verticales. Además, se puede ver que el tren A5 tiene la menor carga.

Esto sucede para los 4 casos de luz de arco de 300 metros con diferente relación flecha/luz.

| TREN | DESPLAZAMIENTOS<br>mm | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A2   | 38.216                | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A10  | 36.904                | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A9   | 35.614                | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A4   | 35.12                 | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A7   | 34.566                | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A3   | 33.585                | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A8   | 33.516                | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A1   | 32.403                | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A6   | 31.542                | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 30.492                | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 9 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/5**

| TREN | DESPLAZAMIENTOS<br>mm | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A2   | 52.643                | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A9   | 50.79                 | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A4   | 47.631                | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A10  | 47.299                | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A1   | 45.49                 | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A3   | 45.027                | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A8   | 44.856                | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A6   | 44.818                | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A7   | 42.803                | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A5   | 41.937                | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 10 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/7.07**

| TREN | DESPLAZAMIENTOS<br>mm | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A2   | 75.866                | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A9   | 68.774                | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A4   | 68.076                | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A10  | 66.746                | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A1   | 65.697                | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A3   | 65.455                | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A7   | 62.845                | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A8   | 62.706                | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A6   | 61.636                | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 59.152                | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 11 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/10**

| TREN | DESPLAZAMIENTOS<br>mm | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A2   | 87.154                | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A9   | 78.745                | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A4   | 78.283                | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A10  | 77.102                | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A1   | 75.425                | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A3   | 75.327                | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A7   | 72.902                | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A8   | 72.161                | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A6   | 70.756                | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 68.035                | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 12 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 300m y relación 1/15**



Sin embargo, las mayores aceleraciones vienen provocadas por el tren **A10** el cual tiene la mayor longitud de vagón y mayor peso por vagón. El tren **A5**, genera la menor aceleración, siendo el que tiene menor longitud de vagón y menor peso por vagón.

| TREN | ACELERACIONES<br>m/s <sup>2</sup> | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A10  | 1.884                             | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A9   | 1.729                             | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A8   | 1.347                             | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A7   | 1.255                             | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A2   | 1.213                             | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A1   | 1.142                             | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A3   | 1.047                             | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A4   | 1.031                             | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A6   | 0.982                             | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 0.940                             | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 13 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/5**

| TREN | ACELERACIONES<br>m/s <sup>2</sup> | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A10  | 1.905                             | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A9   | 1.703                             | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A1   | 1.410                             | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A8   | 1.335                             | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A7   | 1.255                             | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A2   | 1.190                             | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A3   | 1.183                             | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A4   | 1.134                             | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A6   | 0.966                             | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 0.950                             | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 14 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/7.07**

| TREN | ACELERACIONES<br>m/s <sup>2</sup> | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A10  | 1.864                             | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A10  | 1.732                             | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A10  | 1.320                             | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A10  | 1.246                             | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A10  | 1.224                             | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A10  | 1.207                             | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A10  | 1.187                             | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A10  | 1.034                             | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A10  | 0.994                             | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A10  | 0.952                             | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 15 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/10**

| TREN | ACELERACIONES<br>m/s <sup>2</sup> | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A10  | 1.914                             | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A9   | 1.733                             | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A2   | 1.421                             | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A8   | 1.356                             | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A7   | 1.253                             | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A1   | 1.182                             | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A4   | 1.063                             | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A3   | 1.051                             | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A6   | 0.997                             | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 0.939                             | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 16 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 300m y relación 1/15**

En el caso **arco de luz 200m**, los mayores desplazamientos y aceleraciones, son provocadas por el tren A10, en este caso los mayores desplazamientos no vienen provocados por el tren A2, aunque es verdad que el desplazamiento vertical provocado por este segundo tren es prácticamente la misma. Se puede deducir que: no afecta el número de vagones, ni la longitud de los vagones, ni la separación de ejes, si no el peso unitario de cada vagón, ya que además el tren A5 es el que, con menor peso, provoca el menor desplazamiento vertical y la casi la menor aceleración.

| TREN | DESPLAZAMIENTOS<br>mm | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A10  | 24.054                | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A2   | 24.031                | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A9   | 23.152                | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A4   | 22.237                | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A7   | 22.165                | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A8   | 21.441                | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A3   | 21.378                | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A1   | 20.372                | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A6   | 19.882                | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |
| A5   | 19.246                | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |

**Tabla 17 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 200m**

| TREN | ACELERACIONES<br>m/s <sup>2</sup> | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL |
|------|-----------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|
| A10  | 2.624                             | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           |
| A9   | 2.469                             | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           |
| A3   | 2.254                             | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           |
| A8   | 2.226                             | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           |
| A2   | 2.121                             | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           |
| A1   | 1.780                             | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           |
| A7   | 1.648                             | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           |
| A4   | 1.599                             | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           |
| A5   | 1.532                             | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           |
| A6   | 1.526                             | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           |

**Tabla 18 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 200m**

En el caso **arco de luz 100m**, los mayores desplazamientos y aceleraciones, son provocadas por el tren **A8**, el menor desplazamiento vertical es el provocada por el tren A7 y la menor aceleración por el tren A2. Si se observan los modos de vibración del puente y centrándose en el que hace vibrar el tablero, se puede observar a 420km/h entra la distancia entre bogies del tren A8 es la que se queda más cerca de la frecuencia natural, provocando el mayor desplazamiento vertical y la mayor aceleración.

| TREN | DESPLAZAMIENTOS<br>mm | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL | KN*m  |
|------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|-------|
| A8   | 18.064                | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           | 18.63 |
| A6   | 16.887                | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           | 18.82 |
| A5   | 14.078                | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           | 18.33 |
| A9   | 13.052                | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           | 20.13 |
| A4   | 12.030                | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           | 21.19 |
| A3   | 11.482                | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           | 20.82 |
| A2   | 10.260                | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           | 24.08 |
| A10  | 10.007                | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           | 19.45 |
| A1   | 8.356                 | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           | 21.38 |
| A7   | 8.356                 | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           | 19.11 |

**Tabla 19 - Trenes ordenados por desplazamientos máximos en arco 100m**

| TREN | ACELERACIONES<br>m/s <sup>2</sup> | VAGONES<br>ud | LONGITUD<br>VAGON m | SEPARACION<br>EJES m | PESO<br>KN | PESO<br>TOTAL | LONGITUD<br>TOTAL | KN*m  |
|------|-----------------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------------|---------------|-------------------|-------|
| A8   | 15.009                            | 12            | 25                  | 2.5                  | 190        | 7220          | 387.525           | 18.63 |
| A6   | 13.771                            | 13            | 23                  | 2                    | 180        | 7200          | 382.525           | 18.82 |
| A5   | 12.021                            | 14            | 22                  | 2                    | 170        | 7140          | 389.525           | 18.33 |
| A9   | 10.626                            | 11            | 26                  | 2                    | 210        | 7560          | 375.525           | 20.13 |
| A4   | 9.467                             | 15            | 21                  | 3                    | 190        | 8360          | 394.525           | 21.19 |
| A3   | 8.929                             | 16            | 20                  | 2                    | 180        | 8280          | 397.525           | 20.82 |
| A1   | 8.482                             | 18            | 18                  | 2                    | 170        | 8500          | 397.525           | 21.38 |
| A7   | 8.482                             | 13            | 24                  | 2                    | 190        | 7600          | 397.525           | 19.11 |
| A10  | 8.379                             | 11            | 27                  | 2                    | 210        | 7560          | 388.525           | 19.45 |
| A2   | 7.588                             | 17            | 19                  | 3.5                  | 200        | 9600          | 398.525           | 24.08 |

**Tabla 20 - Trenes ordenados por aceleraciones máximas en arco 100m**

5) Los **máximos desplazamientos** se producen entre las pilas 7º y 8º, mientras que en el 6º modelo se dan entre la última pila y el estribo final del puente.

Por otro lado, las **máximas aceleraciones** se producen entre la última pila y el estribo final del puente, en todos los modelos.

## 6. ESTUDIOS FUTUROS

---

En estudios futuros, se podría:

- 1) Comprobar si los resultados comparativos, que se obtienen para las 3 luces de arco y las relaciones flecha/luz de  $1/7.07$  se mantienen para las relaciones  $1/5$ ,  $1/10$  y  $1/15$ .
- 2) Variar el material utilizado y usar uno de mayor resistencia característica y otro de menor resistencia característica para ver si influye significativamente en los resultados, del modelo con una luz de arco de 100m.
- 3) Se podrían variar las secciones de las pilas, es decir, utilizar diferentes secciones según la luz del arco que se está estudiando, incluso para la misma luz de arco variar dichas secciones, según la relación flecha/luz.

## 7. REFERENCIAS

---

- ADIF, 2020. [http://www.adifaltavelocidad.es/es\\_ES/infraestructuras/lineas\\_de\\_alta\\_velocidad/lineas\\_de\\_alta\\_velocidad.shtml](http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/lineas_de_alta_velocidad.shtml)
- CEN, Comité Europeo de Normalización, 2004. *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Cargas de tráfico en puentes.*
- EscapadaRural, 2020. [https://www.escapadarural.com/que-hacer/yeste\\_albacete/puente-de-la-vicaria](https://www.escapadarural.com/que-hacer/yeste_albacete/puente-de-la-vicaria)
- Iberdrola, 2015. <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-comienza-los-trabajos-de-iluminacion-del-puente-romano-de-alcantara-2912305920150724>.
- Manuel Arévalo Hernández, Emilio. 2018. *Redes sociales.*
- Manterola, J., 2006. *Puentes: apuntes para su diseño, cálculo y construcción, Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.*
- Martinez de la Concha, Antonio, 2017. *Tesis Doctoral. Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento dinámico de puentes sometidos al paso de trenes de alta velocidad.*
- Megaconstrucciones, 2018. <https://megaconstrucciones.net/?construccion=puente-barranco-rio-nuevo>
- Ministerio de Fomento, 2010. *Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF), Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones.*
- Rombach, G.A., 2011. *Finite-element design of concrete structures: practical problems and their solutions, London: ICE.*
- Turismomerida, 2017. <http://turismomerida.org/que-ver/puente-lusitania/>





# ANEXO I: GRAFICAS DE MÁXIMOS

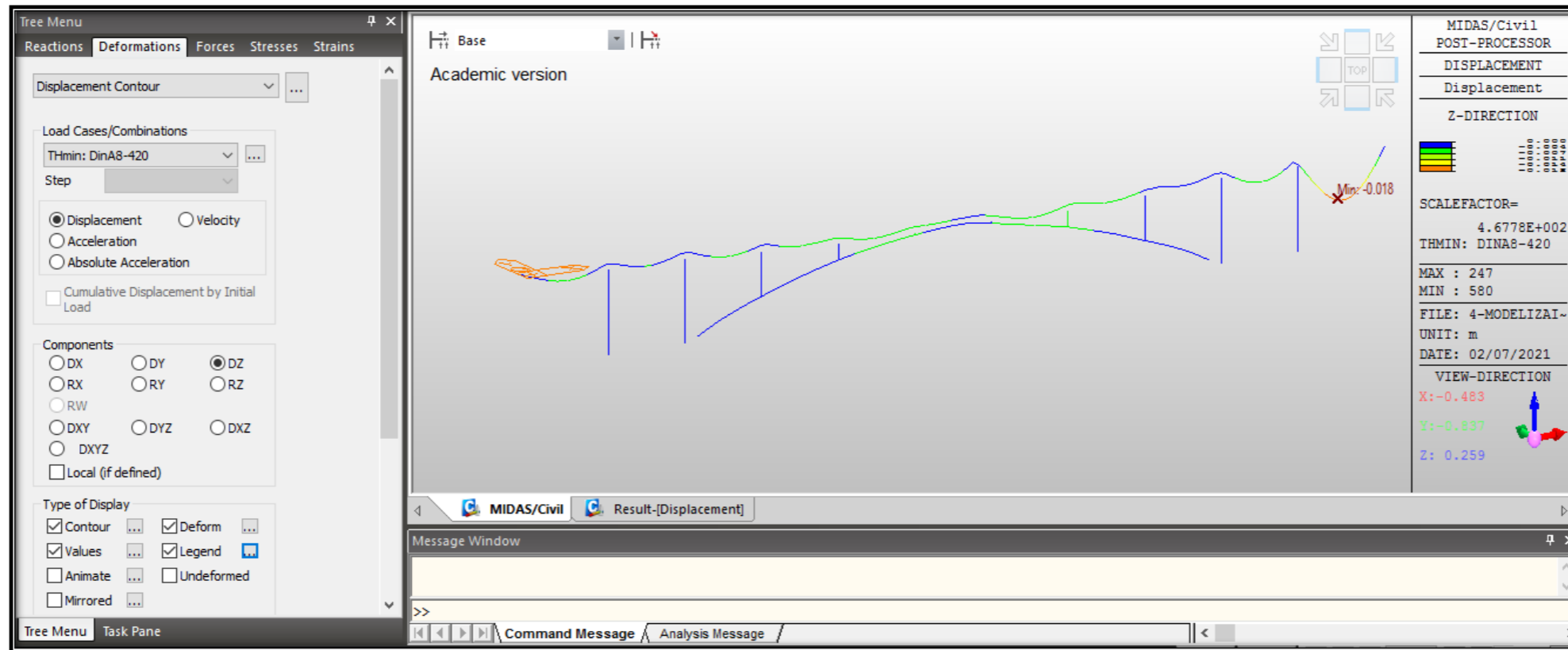


Figura 6.0.1 – Máximos desplazamientos arco de 100m de luz y relación f/l de 1/7.07

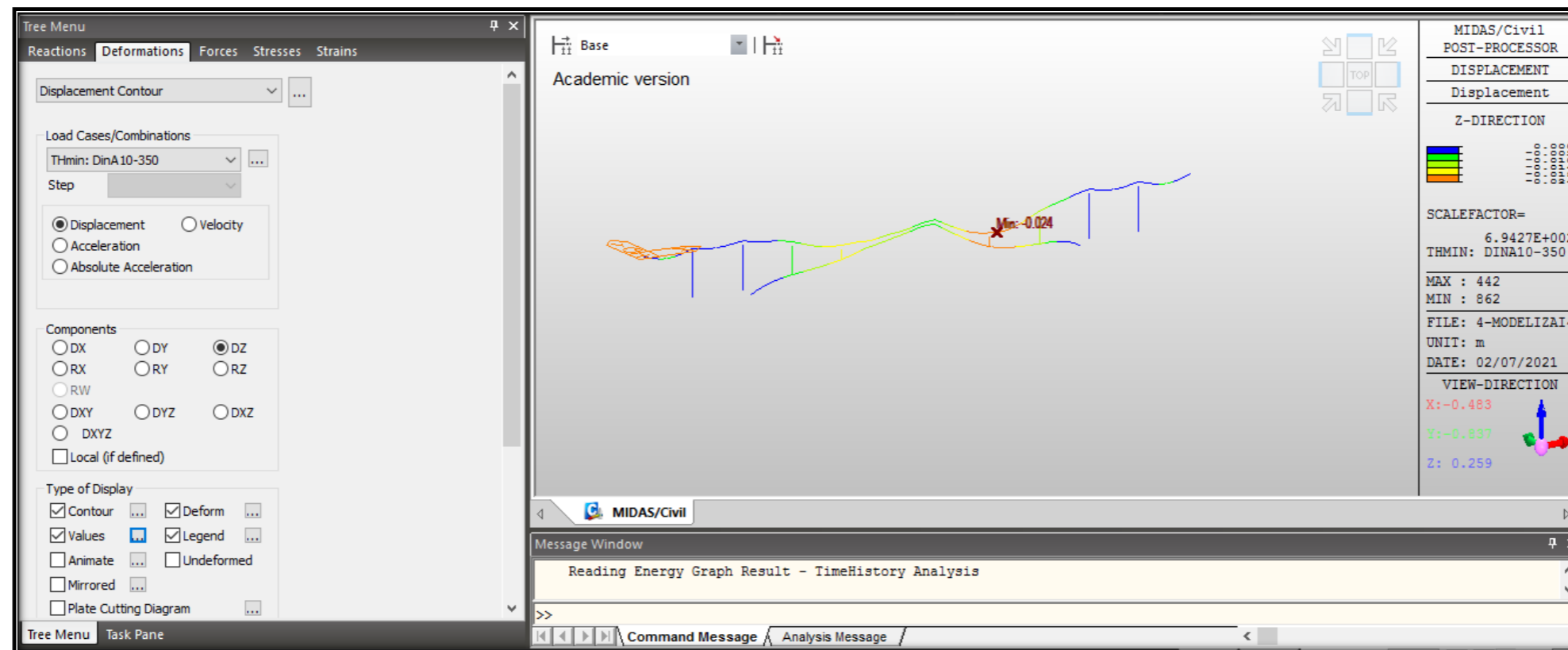


Figura 6.0.2 – Máximos desplazamientos arco de 200m de luz y relación f/l de 1/7.07



Figura 6.0.3 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación f/l de 1/5

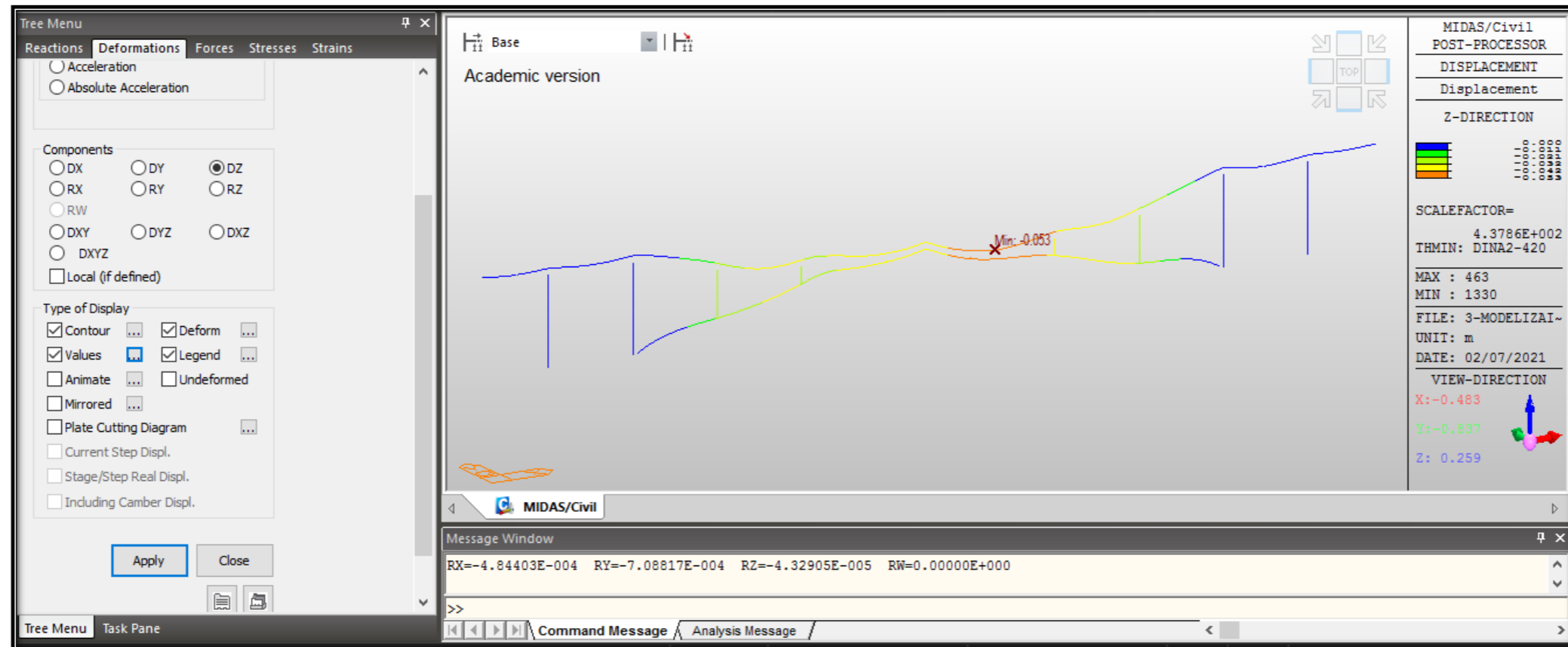


Figura 6.0.4 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación f/l de 1/7.07



Figura 6.0.5 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación  $f/l$  de 1/10

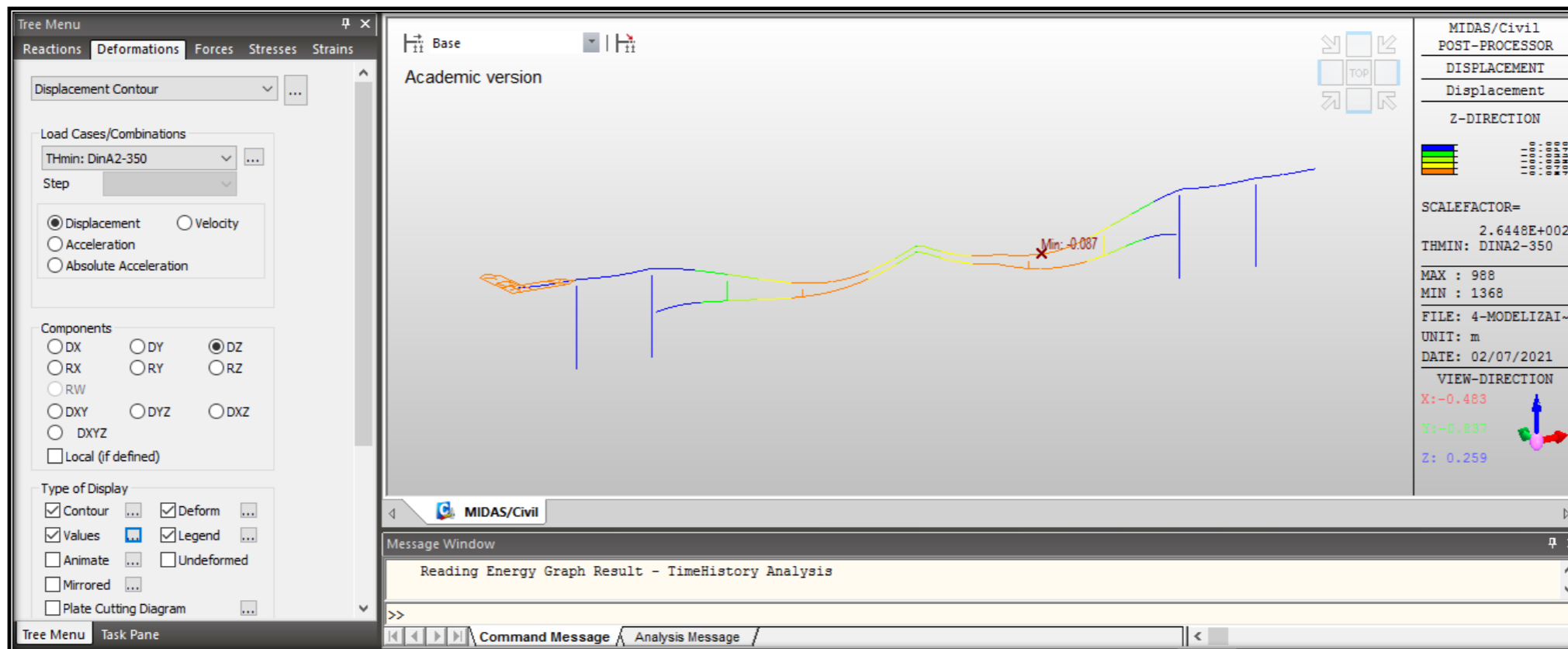


Figura 6.0.6 – Máximos desplazamientos arco de 300m de luz y relación  $f/l$  de 1/15

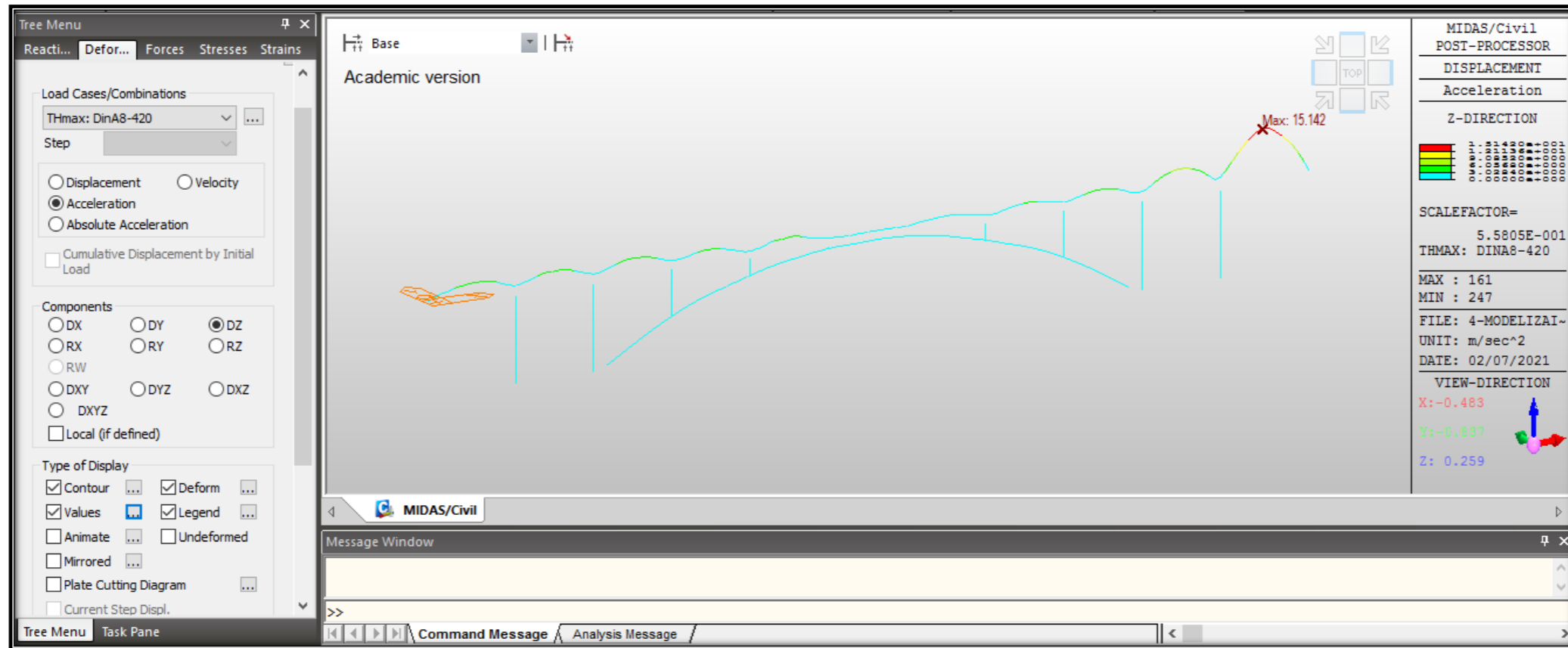


Figura 6.0.7 – Máximas aceleraciones arco de 100m de luz y relación  $f/l$  de 1/7.07

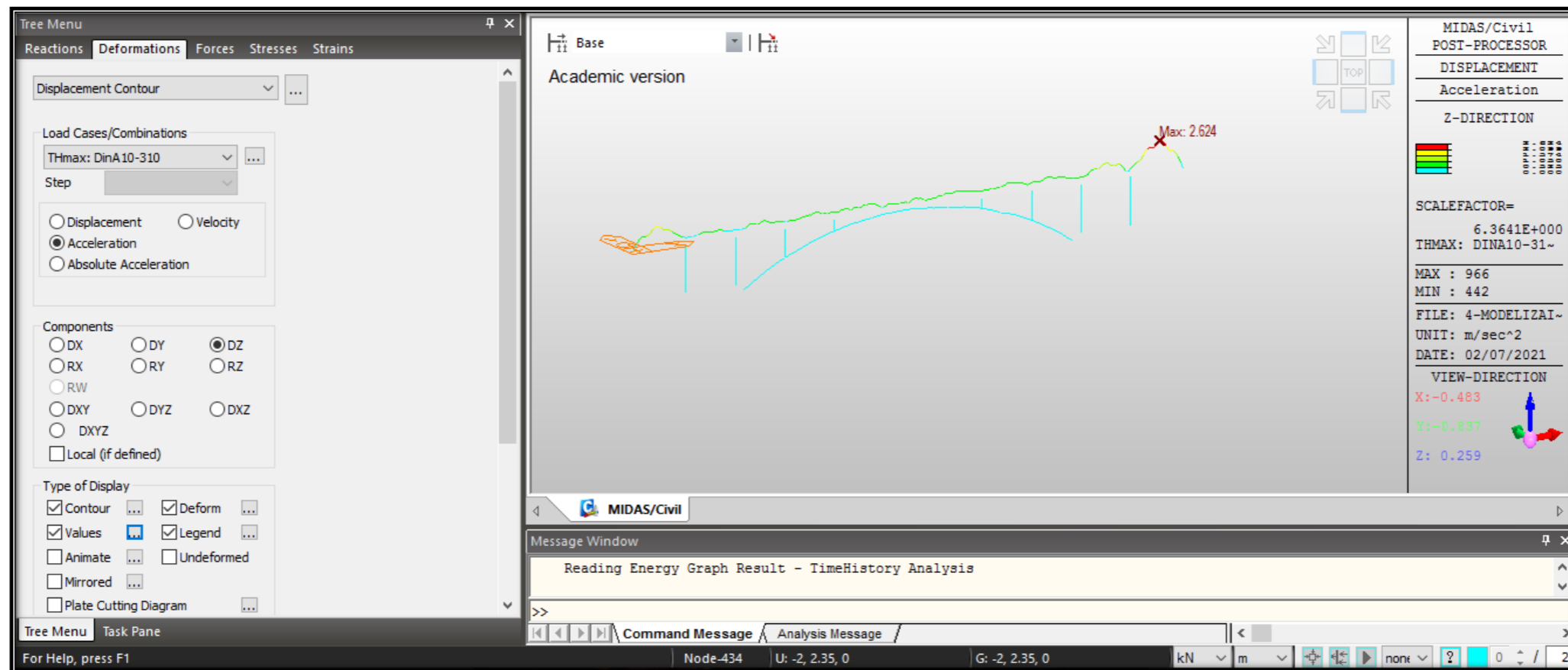


Figura 6.0.8 – Máximas aceleraciones arco de 200m de luz y relación  $f/l$  de 1/7.07

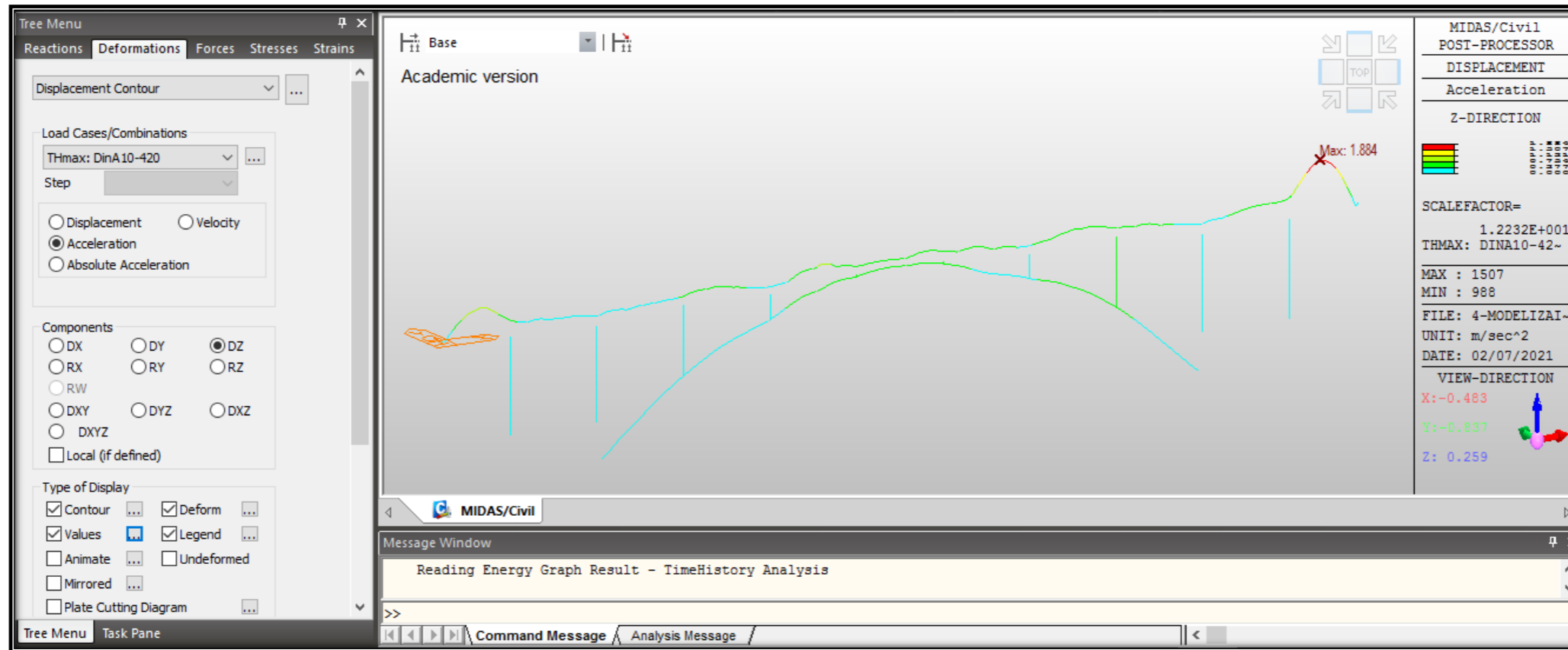


Figura 6.0.9 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/5

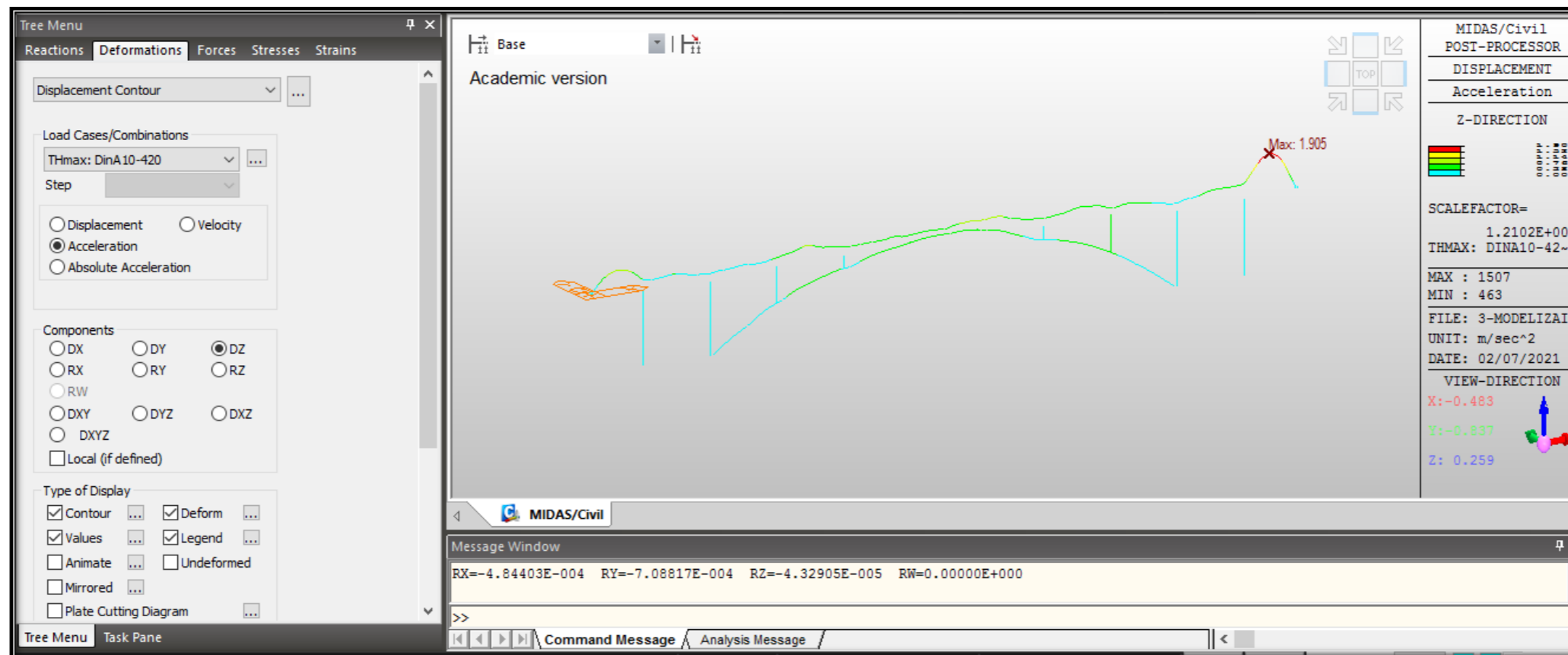


Figura 6.0.10 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/7.07

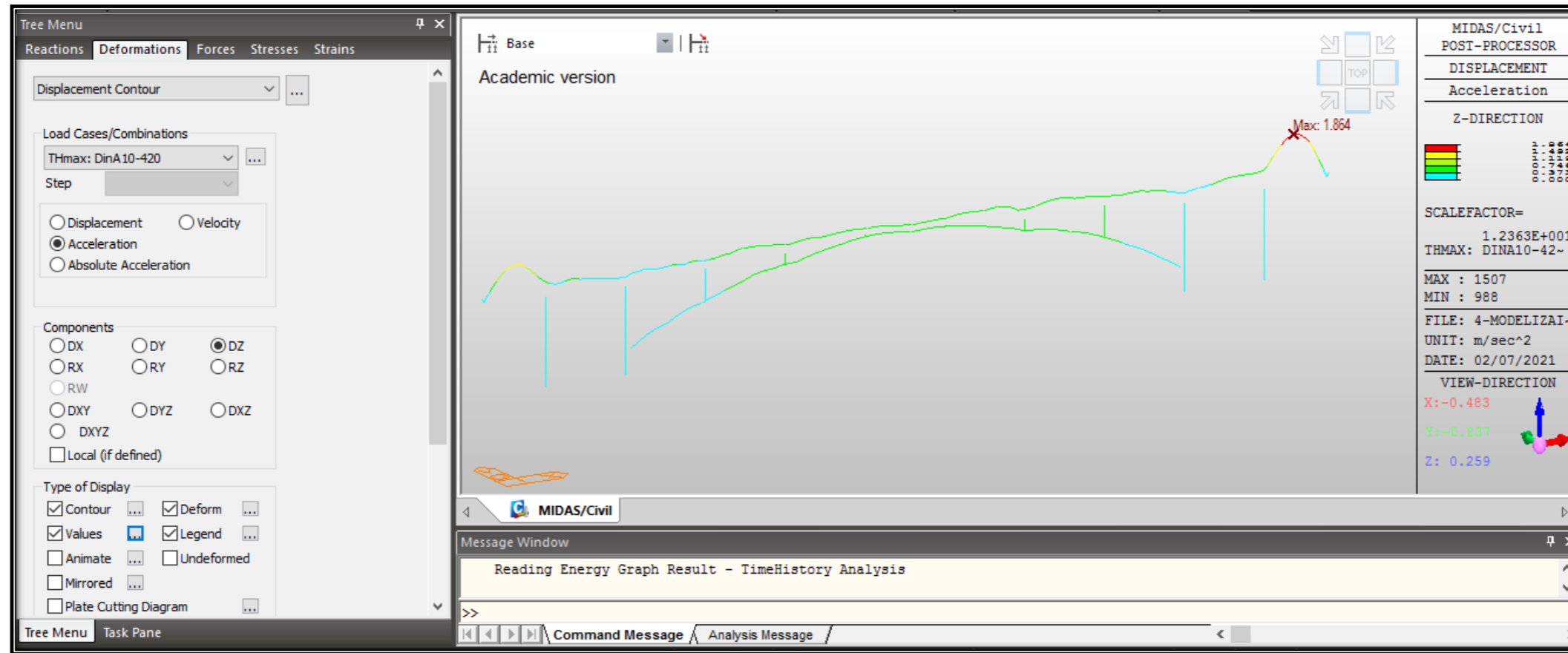


Figura 6.0.11 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/10

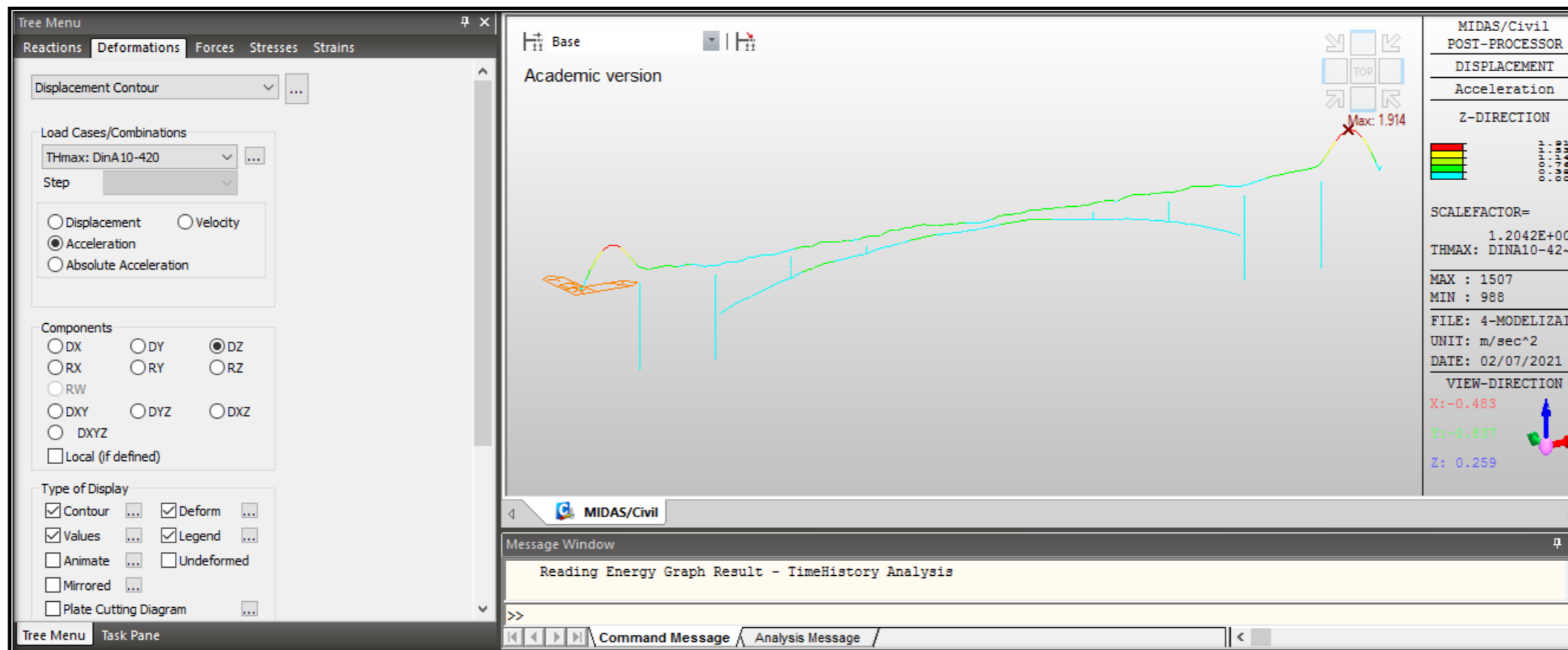


Figura 6.0.12 – Máximas aceleraciones arco de 300m de luz y relación f/l de 1/15