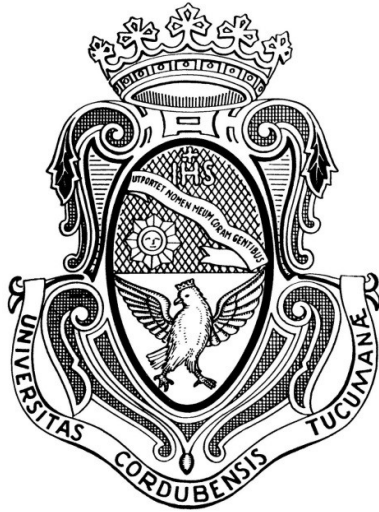


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FISICAS Y NATURALES

PRACTICA SUPERVISADA

“EVALUACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS SOBRE PUENTE
PASANTE SOBRE EL RIO SALADILLO EN SANTA FE, RUTA
NACIONAL 9”

Autor: Zahira Mariangeles Wassan
Tutor: Dr. Ing. Federico Pinto
Supervisor externo: Dr.Ing. Carlos A. Prato.
Fecha: 20/9/2019

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis padres, Marta y Osmar que me han dado la oportunidad de estudiar y recibirme de la carrera que elegí, además de apoyarme incondicionalmente cuando más los necesite, también a mi abuela Olga y mi abuelo Luis. Además, a mis hermanxs Pedro y Fátima que siempre han encontrado los momentos justos para incentivar mis estudios.

A mis amigxs más cercanos que me han ayudado a cursar y terminar esta etapa de mi vida aconsejándome y apoyándome siempre en todo momento.

Al Dr. Ing. Carlos A. Prato y quisiera destacar un especial agradecimiento al Dr. Ing. Federico Pinto que me ha dado la oportunidad de realizar mi práctica en su ámbito de trabajo, por su paciencia, dedicación y por haberme guiado y enseñado en el proceso de este trabajo.

Finalmente agradezco a la Universidad Nacional de Córdoba por proporcionar una educación gratuita de calidad, y brindar las herramientas necesarias para recibirme. Muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolla en el marco de la Practica Supervisada realizada por la alumna en calidad de Informe Técnico Final. Las actividades correspondientes consisten en diferentes tareas relacionadas a la actividad propuesta por el Dr. Ing. Federico Pinto respecto a la evaluación de la respuesta estructural de un puente que pasa sobre el Rio Saladillo en la ciudad de Santa Fe, sometido a la acción de cargas dinámicas.

El objetivo central planteado fue el de realizar aportes en términos de investigación al análisis y evaluación de puentes.

La práctica realizada está relacionada al Análisis de Estructuras, en donde se ha incursionado en los estudios de Cargas Dinámicas, además se ha estudiado las normas presentadas por Dirección Nacional de Vialidad para distinguir las tipologías de vehículos a los que se les permite circular por ciertos corredores en Rutas Nacionales, y definir si el puente analizado se encuentra dentro de la normativa vigente. Se realiza un modelo numérico computacional en SAP para calcular los esfuerzos y deformaciones correspondientes y así poder estudiar su comportamiento y obtener conclusiones.

INDICE

1. INTRODUCCION.....	11
1.1 Objetivo y alcance de la practica.....	11
1.2 Descripcion del proyecto y tareas realizadas	12
2. RELEVAMIENTO	13
2.1 Caracterizacion y descripcion de la zona de estudio.....	13
2.2 Descripción de la estructura	17
2.2.1 Documentación de referencia	17
2.2.2 Características de la estructura.....	17
2.3 Configuración del vehículo según la reglamentación vigente	24
3. ANALISIS ESTRUCTURAL.....	25
3.1 Dinamica estructural	26
3.1.1 Fuerzas internas en la estructura	26
3.1.2 Respuestas a cargas variables en el tiempo	27
3.1.3 Fuerzas de inercia	28
3.1.4 Fuerzas disipativas.....	29
3.1.5 Velocidad de reacción de una estructura	32
3.1.6 Integral de Duhamel	33
3.2 Analisis estructural del puente	38
3.2.1 Fuerzas dinámicas	40
4. MODELACION NUMERICA	46
4.1 Descripción del modelo.....	46
4.2 Procedimiento de modelación	47
4.2.1 Características de los materiales	47
4.2.1.1 <i>Modulo Elástico Instantáneo del Hormigón.....</i>	<i>50</i>
4.2.2 Características seccionales.....	50
4.2.3 Ensamble de barras	52
4.2.4 Condiciones de vinculo	52
4.2.5 Definición de los caminos.....	53
4.2.6 Configuración del vehículo	56
4.2.7 Cargas y solicitaciones.....	58
4.2.7.1 <i>Patrón de carga</i>	<i>58</i>
4.2.7.2 <i>Funciones</i>	<i>59</i>
4.2.7.3 <i>Casos de Carga.....</i>	<i>65</i>
4.2.8 Combinaciones de carga.....	67
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
5.1 Secciones analizadas	71
5.2 Resultados de analisis.....	73
5.2.1 Diagramas Obtenidos.....	75
5.2.2 Valores tabulados.....	79
6. CONCLUSIONES.....	85
7. ANEXOS	91

7.1	anexo 1. Modulo elastico instantaneo del hormigon.....	91
7.2	anexo 2. Archivo fotografico.....	96
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1. Imagen de la ubicación geográfica del puente analizado sobre el Rio Saladillo. (Vista Google maps).....	13
Figura 2.2. Imagen de la ubicación geográfica del puente analizado sobre el Rio Saladillo sobre la Ruta Nacional N°9 autopista Buenos Aires - Rosario. (Vista Google maps).....	14
Figura 2.3. Tramo de habilitación de bitrenes habilitados por la DNV, recorte del Anexo 1.....	15
Figura 2.4. Imagen del corredor donde se encuentra ubicado el puente, donde está permitido la circulación de bitrenes, obtenida de la página de Dirección Nacional de Vialidad.....	16
Figura 2.5. Imagen del corredor donde se encuentra ubicado el puente, donde está permitido la circulación de bitrenes, obtenida de la página de Dirección Nacional de Vialidad.....	16
Figura 2.6. Imagen del corredor donde se encuentra ubicado el puente, donde está permitido la circulación de bitrenes, obtenida de la página de Dirección Nacional de Vialidad.....	17
Figura 2.7. Vista general de los Puentes sobre el Río Saladillo, RN9.....	18
Figura 2.8. Vista general de uno de los Puentes.....	19
Figura 2.9. Vista de la calzada de uno de los puentes sobre la autopista de la Ruta Nacional N° 9.....	19
Figura 2. 10. Perfil longitudinal del puente sobre el Rio Saladillo desde el estribo hasta la primera unión con el tramo metálico.....	20
Figura 2.11. Perfil longitudinal del puente sobre el Rio Saladillo desde la segunda mitad del tramo metálico hasta el último estribo, se destacan todas partes, medidas y longitudes del tramo.....	20
Figura 2.12. Corte transversal en tramo de hormigón, se observan en corte las vigas cajón de sección variable de hormigón sobre la pila, también pueden verse las uniones de neopreno de la pila con las vigas.....	21
Figura 2.13. Apoyos de neopreno.....	21
Figura 2.14. Corte transversal en el tramo metálico, se observa las vigas I de acero que componen el tramo isostático separadas 1,5m de eje a eje.....	22
Figura 2.15. Vista de las vigas metálicas del puente sobre el Rio Saladillo, foto tomada desde parte inferior del puente.....	22
Figura 2.16. Foto del descenso en la unión de la parte de hormigón con la parte metálica, causante de la variación en la pendiente de la rasante del puente.....	23
Figura 2.17. Foto del descenso en la unión de la parte de hormigón con la parte metálica, causante de la variación en la pendiente de la rasante del puente.....	23
Figura 2.18. Bitren de 75 toneladas.....	24
Figura 2.19. Configuraciones autorizadas por el transporte automotor de cargas, Escalabilidad.....	24
Figura 3.1. La siguiente figura muestra la función de una carga que varía con el tiempo t , $F(t)$...	27
Figura 3.2. Fuerza que varía con el tiempo $F(t)$ sobre una viga simplemente apoyada, $U(t)$ desplazamiento de la viga.....	29
Figura 3.3. La imagen muestra una función de carga $F(t)$ que varía en función del tiempo, de corta duración.....	29
Figura 3. 4. Gráfico de carga y descarga de una barra elástica sometida a tracción por las fuerzas $F(t)$ actuando en sus extremos, en el eje de abscisas se encuentran los desplazamientos producidos por la barra gracias al esfuerzo externo aplicado, en el eje vertical se encuentra la fuerza aplicada, no inciden fuerzas disipativas, carga lenta.....	31
Figura 3.5. Gráfico de carga y descarga de una barra elástica sometida a tracción por las fuerzas $F(t)$ a una velocidad media, actuando en sus extremos, en el eje de abscisas se encuentran los desplazamientos producidos por la barra gracias al esfuerzo externo aplicado, en el eje vertical se encuentra la fuerza aplicada, teniendo en cuenta la incidencia del amortiguamiento, una elipse encierra un área proporcional a la energía disipada en cada ciclo de deformación completo de carga y descarga.....	31
Figura 3.6. Gráfico de carga y descarga de una barra elástica sometida a tracción por las fuerzas $F(t)$ a alta velocidad, actuando en sus extremos, en el eje de abscisas se encuentran los desplazamientos producidos por la barra gracias al esfuerzo externo aplicado, en el eje vertical se encuentra la fuerza aplicada, teniendo en cuenta la incidencia del amortiguamiento, una elipse encierra un área proporcional a la energía disipada en cada ciclo de deformación completo de carga y descarga.....	32
Figura 3.7. Se ilustra la parte elástica y la parte viscosa de la carga total aplicada para cada valor del desplazamiento.....	32

Figura 3.8. Se ilustra dos tipos de fuerzas que varían en función del tiempo, a la izquierda una carga de larga duración y con crecimiento lineal, a la derecha una carga de corta duración y un único impulso, siendo t_D el tiempo total de aplicación de la carga.	33
Figura 3.9. El efecto de una fuerza $P(t)$ puede ser representado como una superposición de impulsos infinitesimales en un tiempo dt , el área bajo la curva representa el impulso.	34
Figura 3.10. Se observa la respuesta a un impulso rectangular de muy corta duración, siendo t_i el tiempo inicial de aplicación de carga, t_f el tiempo final de aplicación de carga, en el eje vertical se observa $P(\tau)$, la carga en función del tiempo. Se adopta condiciones iniciales $U_i=0$ y $\dot{U}_i=0$, siendo U_i el desplazamiento en el tiempo inicial y \dot{U}_i la velocidad en el tiempo inicial.	34
Figura 3.11. El siguiente gráfico muestra la solución U en función del tiempo que representa el movimiento armónico amortiguado de un sistema que fue sacado de su equilibrio al aplicarle una carga externa directamente. Se observa que el sistema presenta un movimiento de oscilación amortiguado que decrece exponencialmente debido al amortiguamiento a medida que pasa el tiempo.	36
Figura 3.12. En el gráfico se muestra una carga externa que varía en función del tiempo arbitraria como la sumatoria de una sucesión de impulsos infinitesimales desde el tiempo inicial hasta el tiempo final.	37
Figura 3.13. Se muestra un gráfico representativo del perfil longitudinal del puente, el vector velocidad V junto con la masa en movimiento M , el cambio de dirección de la velocidad θ y la fuerza dinámica en el punto analizado Ft	39
Figura 3.14. Muestra la variación de la carga en función del tiempo.	40
Figura 3.15. Composición de ejes y cargas de un bitrén, en correspondencia con cada función impulso que depende del peso de cada eje.	41
Figura 3.16. Muestra la función $F(t)$ a una velocidad de 11,1 m/s.	44
Figura 3.17. Muestra la función $F(t)$ a una velocidad de 16,67 m/s.	45
Figura 3.18. Muestra la función $F(t)$ a una velocidad de 22,22 m/s.	45
Figura 4.1. Vista general de modelo numérico dibujado en el programa SAP 2000, se compone de 3 tramos, dos tramos de hormigón que corresponden a las líneas en negro y el tramo metálico isostático representado en rojo.	47
Figura 4.2. Muestra las propiedades del hormigón cargadas en el programa.	48
Figura 4.3. Muestra las propiedades del acero cargadas en el programa.	49
Figura 4.4. Propiedades de las secciones que componen la estructura, llamadas VC a las vigas transversales, VL a las longitudinales y V10 a las vigas de acero.	50
Figura 4.5. Propiedades generales de la sección.	51
Figura 4.6. Propiedades más específicas de cada sección.	51
Figura 4.7. Unión entre dos barras.	52
Figura 4.8. Vista lateral de los apoyos del puente.	52
Figura 4.9. Vista de las condiciones de vínculo ubicadas en cada apoyo.	53
Figura 4.10. Vista lateral del puente, las articulaciones se destacan en rojo.	53
Figura 4.11. Imagen de la función Definición de caminos (Paths).	54
Figura 4.12. Los caminos definidos se llaman PATH1 y PATH2 correspondiendo uno a cada trocha.	54
Figura 4.13. Se muestra los datos que se deben ingresar para definir cada camino, secciones, discretización y desplazamiento de la línea central.	55
Figura 4.14. Vista general de modelo numérico y los caminos definidos en el programa.	55
Figura 4.15. Definición del tipo de vehículo.	56
Figura 4.16. Datos del vehículo.	57
Figura 4.17. Modelo bitren 75 tn.	58
Figura 4.18. Se muestra Load Pattern Name (nombre del patrón de carga), Type (tipo de carga), Self Weight Multiplier (multiplicador de peso propio de la carga).	59
Figura 4.19. Patrón de carga con efectos dinámicos.	59
Figura 4.20. Ilustración de las cargas puntuales en la sección con desnivel.	60
Figura 4.21. Fuerzas asignadas a un punto para un análisis del ángulo $\theta = 0,02$	61
Figura 4.22. Fuerzas asignadas a un punto para un análisis del ángulo $\theta = 0,04$	62
Figura 4.23. Fuerzas asignadas a un punto para un análisis del ángulo $\theta = 0,06$	63
Figura 4.24. Definición de la función en el SAP.	64
Figura 4.25. Muestra las funciones cargadas impulso, impulso 1 e impulso 2, cada una corresponde a la velocidad $v_1= 11,1$ m/s, $v_2= 16,67$ m/s y $v_3= 22,2$ m/s respectivamente. ..	64

Figura 4.26. Definición de la función variable con el tiempo, que depende de las distancias que recorre el bitren, la velocidad adquirida y la carga por eje.....	65
Figura 4.27. Definición de los Casos de Carga.....	66
Figura 4.28. Datos de los Casos de Carga.....	66
Figura 4.29. Datos de la Combinación de carga $v=11,1$	68
Figura 4.30. Datos de la Combinación de carga $v=16,67$	69
Figura 4.31. Datos de la Combinación de carga $v=22,2$	70
Figura 5.1. Ubicación para máximo momento flector negativo (en azul) – Primer apoyo intermedio (vista).....	71
Figura 5.2. Ubicación para corte negativo (en azul) – en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico (vista).....	72
Figura 5.3. Se muestran en color verde las secciones de análisis de esfuerzos finales, siendo las mismas los lugares donde se producen los máximos esfuerzos.....	72
Figura 5.4. Muestra la opción “Display Frame Forces” en el programa.....	73
Figura 5.5. Muestra las múltiples opciones que presenta el programa para la visualización de esfuerzos para una Combinación de Carga de $v=11,1$	74
Figura 5.6. Visualización del diagrama de una viga (Objeto 35, viga VC6) para la Combinación de Carga $v=11,1$ y su momento y corte máximos.....	75
Figura 5.7. Deformada de la estructura sometida a la Combinación de Cargas $v=11,1$ vista en 3D.....	76
Figura 5.8. Deformada de la estructura sometida a la Combinación de Cargas $v=11,1$ vista lateralmente.....	76
Figura 5.9. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=11,1$	76
Figura 5.10. Diagrama de la envolvente de Corte máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=11,1$	76
Figura 5.11. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $11,1$ m/s.....	76
Figura 5.12. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $11,1$ m/s.....	77
Figura 5.13. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de $11,1$ m/s.....	77
Figura 5.14. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de $11,1$ m/s.....	77
Figura 5.15. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=16,67$	77
Figura 5.16. Diagrama de la envolvente de Corte máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=16,67$	77
Figura 5.17. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $16,67$ m/s.....	77
Figura 5.18. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $16,67$ m/s.....	77
Figura 5.19. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de $16,67$ m/s.....	78
Figura 5.20. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de $16,67$ m/s.....	78
Figura 5.21. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=22,2$	78
Figura 5.22. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=22,2$	78
Figura 5.23. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $22,2$ m/s.....	78
Figura 5.24. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $22,2$ m/s.....	78
Figura 5.25. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de $22,2$ m/s.....	78
Figura 5.26. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de $22,2$ m/s.....	78

Figura 6.1. Envolvente de momentos para cargas con efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 11,1 m/s.....	85
Figura 6.2. Diagrama de envolventes de momentos para cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 11,1 m/s.	85
Figura 6.3. Envolvente de momentos para la combinación de cargas $v=11,1$	85
Figura 6.4. Diagrama de envolvente de momentos para cargas con efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 16,67 m/s.	86
Figura 6.5. Diagrama de envolventes de momentos para cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 16,67 m/s.	86
Figura 6.6. Envolvente de momentos para la combinación de cargas $v=16,67$	86
Figura 6.7. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas con efectos dinámicos, a una velocidad de 40 Km/h.	87
Figura 6.8. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas con efectos dinámicos, a una velocidad de 60 Km/h.	88
Figura 6.9. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas con efectos dinámicos, a una velocidad de 80 Km/h.	88
Figura 6.10. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de 40 Km/h.	89
Figura 6.11. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de 60 Km/h.	89
Figura 6.12. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de 80 Km/h.	90
Figura 7.1. Registros de vibraciones en tramo sur.....	92
Figura 7.2. Densidad espectral de potencia en tramo sur	93
Figura 7.3. Registros de vibraciones en tramo norte	93
Figura 7.4. Densidad espectral de potencia en tramo norte	94
Figura 7.5. Modos evaluados mediante modelo numérico	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Datos que se tienen en cuenta para la determinación de la fuerza dinámica $F(t)$, siendo v las distintas velocidades propuestas, M los pesos por ejes, y θ el ángulo de pendiente.	42
Tabla 3.2. Muestra como varia la fuerza $F(t)$ en toneladas función del tiempo, siendo t acum el tiempo acumulado en segundos, utilizando una velocidad de 11,1 m/s.....	43
Tabla 3.3. Muestra como varia la fuerza $F(t)$ en toneladas función del tiempo, siendo t acum el tiempo acumulado en segundos, utilizando una velocidad de 16,67 m/s.....	43
Tabla 3.4. Muestra como varia la fuerza $F(t)$ en toneladas función del tiempo, siendo t acum el tiempo acumulado en segundos, utilizando una velocidad de 22,2 m/s.....	44
Tabla 5.1. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Flexión y Corte en apoyo.	80
Tabla 5.2. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.	80
Tabla 5.3. Resumen de esfuerzos y solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 4\%$ – Flexión y Corte en apoyo.	81
Tabla 5.4. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 4\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.	81
Tabla 5.5. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 6\%$ – Flexión y Corte en apoyo.	82
Tabla 5.6. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 6\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.	82
Tabla 5.7. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Flexión y Corte en apoyo.	83
Tabla 5.8. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 4\%$ – Flexión y Corte en apoyo.	83
Tabla 5.9. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 6\%$ – Flexión y Corte en apoyo.	83
Tabla 5.10. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.	84
Tabla 5.11. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 4\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.	84
Tabla 5.12. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 6\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.	84
Tabla 6.1. Desplazamiento de la estructura para la combinación de carga $v=11,1$, con un ángulo de deflexión del 2%.	86
Tabla 6.2. Desplazamiento de la estructura para la combinación de carga $v=16,67$ con un ángulo de deflexión del 4%.	86
Tabla 6.3. Desplazamiento de la estructura para la combinación de cargas $v=22,2$, con un ángulo de deflexión del 6%.	87
Tabla 6.4. Frecuencias asociadas al paso del tren de cargas.	90
Tabla 7.1. Propiedades del hormigón determinadas en el sitio.....	91
Tabla 7.2. Calibración de modelo.	94

1. INTRODUCCION

El interés en el análisis de cargas dinámicas ha ido creciendo constantemente, en parte debido a que el avance en la tecnología ha hecho posibles diseños más sofisticados y apropiados, y que las herramientas computacionales actuales permiten hacer con carácter rutinario cálculos que en otra época eran cuestiones reservadas para casos muy especiales. Estas herramientas han facilitado la simulación de muchas estructuras, entre ellas, los puentes, permitiendo obtener un panorama completo de esfuerzos y deformaciones debido a distintos tipos de cargas.

Hasta ahora en el análisis de puentes el paso de vehículos generalmente se evalúa de manera simplificada mediante un factor de impacto que solo depende de la luz y no se tienen en cuenta efectos de la rasante. Es de interés incluir estas variables para evaluar el impacto que producen los vehículos al pasar por un desnivel o un bache y realizar un análisis comparativo de la respuesta estructural del puente.

Con motivos de investigación se estudia el comportamiento de un puente ubicado en la ciudad de Santa Fe, sobre la Ruta Nacional 9, que comunica Rosario con Buenos Aires, siendo esta una zona de uso frecuente con grandes cargas de tránsito. Por medio de un modelo de simulación de la estructura en el programa SAP se simula las cargas dinámicas teniendo en cuenta las variantes en la rasante del tablero.

Dentro de los principales vehículos de gran porte que tienen permitido circular, se encuentran los bitrenes. Vialidad Nacional ha incorporado nuevas configuraciones de bitrenes de los cuales uno se seleccionó para usar en el modelo y así mediante los resultados obtenidos sacar las conclusiones adecuadas.

1.1 OBJETIVO Y ALCANCE DE LA PRACTICA

El objetivo de este informe es resumir las actividades realizadas en el marco del Convenio suscrito entre el Centro de Vinculación de Ensayos No Destructivos y de Evaluación de Obras de Infraestructura Civil de la Universidad Nacional de Córdoba (CV-UNC) y la Dirección Nacional de Vialidad (DNV), en el periodo de práctica supervisada.

El alcance de los estudios es realizar un informe respecto la evaluación de un puente frente a cargas dinámicas producidas por un quiebre en la rasante del tablero. Para realizar dicha evaluación se utiliza un modelo en SAP representativo de la estructura y se incorporan los tipos de cargas a analizar. Se simula el paso de un vehículo de gran porte sobre el puente y se analiza la respuesta estructural cuando este pasa por un quiebre en la rasante.

Las fuerzas dinámicas son representadas mediante una sucesión de cargas impulsivas proporcionales a los pesos por ejes de un modelo de bitren de 75 toneladas. El quiebre en la rasante del tablero provoca un cambio en la dirección de velocidad del vehículo que influye en los esfuerzos de momento y corte de la estructura.

Así, se estudia la respuesta del puente mediante un análisis de esfuerzos (momento y corte en las secciones más desfavorables) y se compara el efecto producido en términos porcentuales.

Como conclusión del presente estudio se realiza un análisis de los resultados obtenidos, diagramas y esfuerzos de diseño.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y TAREAS REALIZADAS

Luego de realizada la recopilación de datos y documentación existente de la estructura, se formula un modelo de cálculo que permite comparar los esfuerzos y deformaciones. Se desarrollan modelos de análisis numéricos, tablas, memorias y figuras para la confección de un informe final.

Las actividades realizadas comprenden:

- Análisis de tipología de tren de cargas para bitrenes de 75 toneladas considerados en el reglamento de la DNV.
- Desarrollo de un modelo de elementos finitos en SAP2000 para el análisis estructural de un puente bajo evaluación en el convenio de referencia.
- Adquirir destreza en el manejo del *software* de modelación específico para el tipo de problema analizado.
- Evaluar de manera crítica el comportamiento del modelo, a fin de establecer la confiabilidad de los resultados que se extraen del mismo.
- Evaluación de respuesta dinámica para bitren considerando irregularidades de rasante en el tablero.
- Comparación de resultados y desarrollo de conclusiones.

2. RELEVAMIENTO

2.1 CARACTERIZACION Y DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

El presente proyecto se realizó sobre el puente que se encuentra sobre el arroyo Saladillo "O" Kilometro 286,15 sobre la Ruta Nacional N°9, en la autopista Buenos Aires – Rosario progresiva 286,02. Cuyas coordenadas corresponden a Latitud -33.026889, Longitud -60.66364 (Figura 2.1 y Figura 2.2) ubicado en la periferia de la ciudad de Rosario en la provincia de Santa Fe.

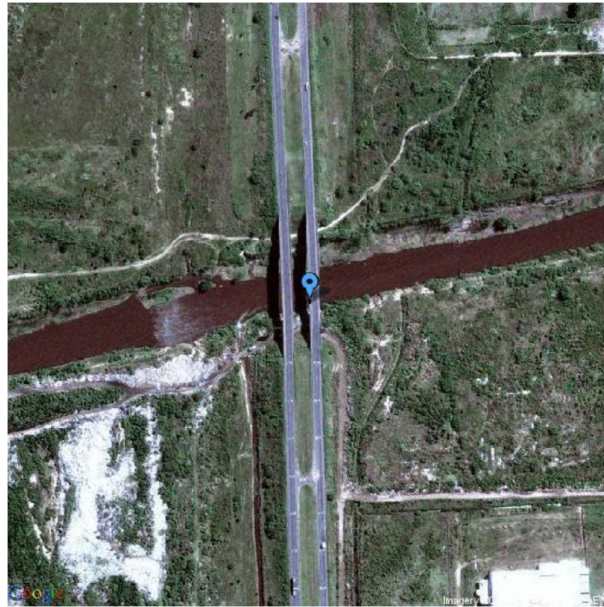


Figura 2.1. Imagen de la ubicación geográfica del puente analizado sobre el Rio Saladillo. (Vista Google maps).

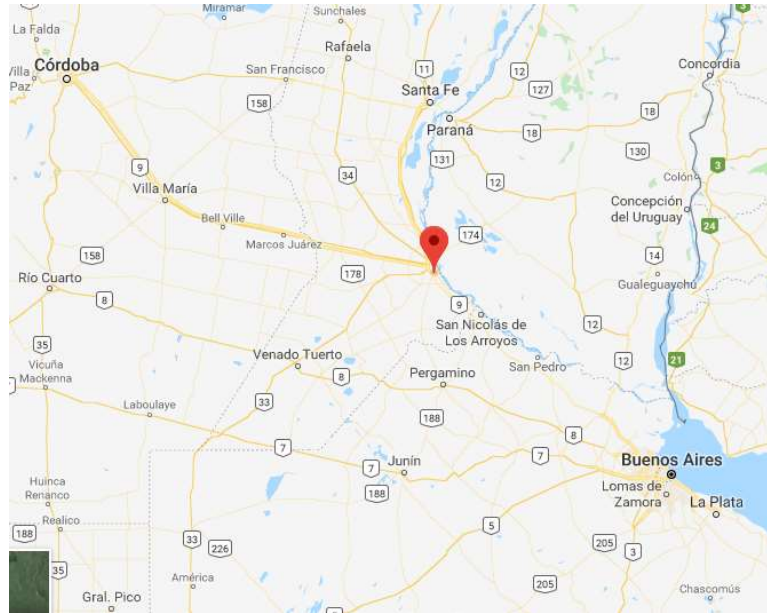


Figura 2.2. Imagen de la ubicación geográfica del puente analizado sobre el Río Saladillo sobre la Ruta Nacional N°9 autopista Buenos Aires - Rosario. (Vista Google maps).

El puente se encuentra ubicado sobre uno de los corredores principales de circulación de bitrenes según la normativa vigente. Los vehículos de gran porte solo pueden circular por corredores en Rutas Nacionales definidos por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) (Figura 2.3).

Los tramos habilitados se basan en la evaluación de la capacidad estructural de los puentes y obras de arte en la red de Rutas Nacionales, como así también en las valoraciones de los criterios vinculados a la Seguridad Vial donde se ha realizado un exhaustivo análisis de rutas a fin de considerar su aptitud como Corredores Viales.

Del estudio mencionado se diseñó un mapa de corredores que fue presentado a la Subsecretaría de Transporte Automotor, la Comisión Nacional de Tránsito y Seguridad Vial, la Secretaría de Transporte Automotor de Cargas y asesores del Ministerio de Transporte. En las Figuras 2.4, 2.5 y 2.6 se ilustra la ubicación del puente sobre el Río Saladillo en el mapa de corredores de la DNV.

ANEXO I **Tramos de habilitación de BITRENES**

Ruta	Distrito	Prog. Inicial	Prog. Final	Provincia
0003	1	43,5	61,87	Buenos Aires
0003	13	1509,35	1638,66	Chubut
0003	13	1822,2	1827,21	Chubut
0003	13	1838,47	1842,77	Chubut
0003	19	881,07	963,16	Buenos Aires
0003	20	1009,4	1139,17	Río Negro
0003	20	1174,14	1264,81	Río Negro
0003	23	1911,73	2372,21	Santa Cruz
0003	23	2381,41	2578,36	Santa Cruz
0003	23	2582,91	2607,86	Santa Cruz
0003	23	2622,89	2673,95	Santa Cruz
0003	24	2673,95	2781,79	Tierra del Fuego
0003	24	2823,01	2918,35	Tierra del Fuego
0007	2	586,56	658,94	Córdoba
0007	4	965,51	977,91	Mendoza
0007	4	997,41	1032,31	Mendoza
0007	14	658,94	865,52	San Luis
0008	1	60,03	97,43	Buenos Aires
0009	1	74,9	237,09	Buenos Aires
0009	7	237,09	695,53	Santa Fe
0012	1	80,7	112,6	Buenos Aires
0012	15	1501,452	1588,4	Misiones

Figura 2.3. Tramo de habilitación de bitrenes habilitados por la DNV, recorte del Anexo 1.

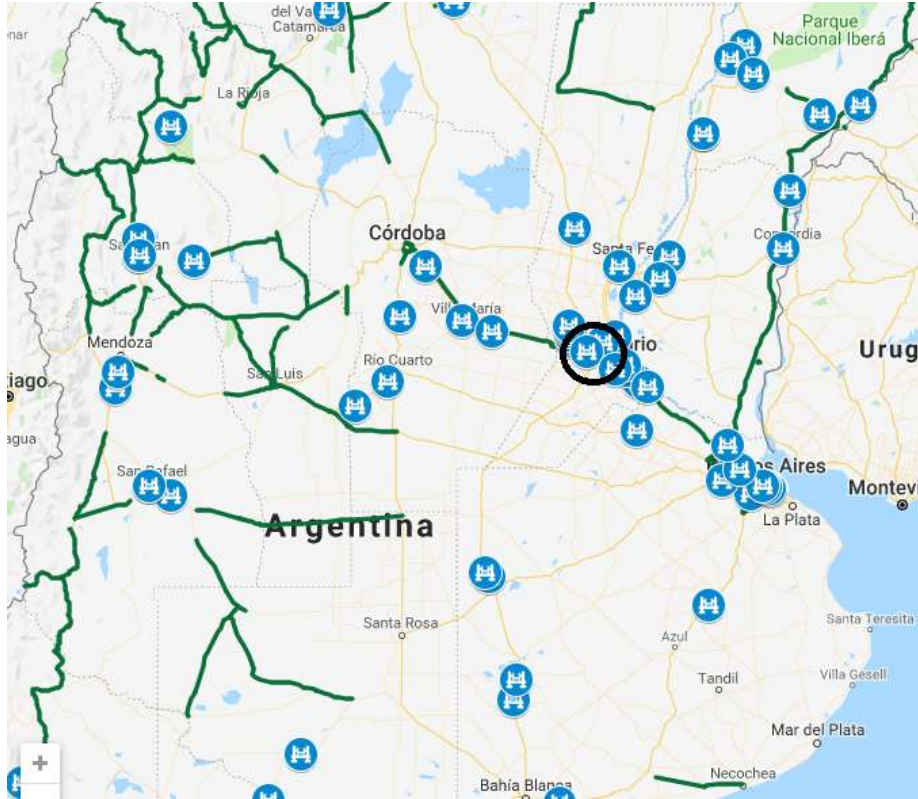


Figura 2.4. Imagen del corredor donde se encuentra ubicado el puente, donde está permitido la circulación de bitrenes, obtenida de la página de Dirección Nacional de Vialidad.

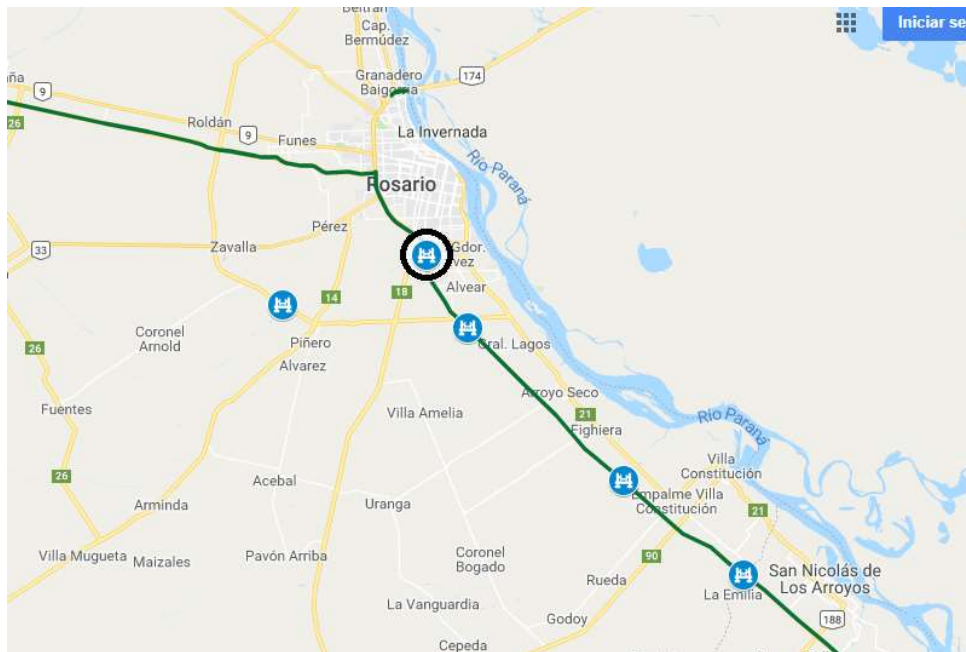


Figura 2.5. Imagen del corredor donde se encuentra ubicado el puente, donde está permitido la circulación de bitrenes, obtenida de la página de Dirección Nacional de Vialidad.

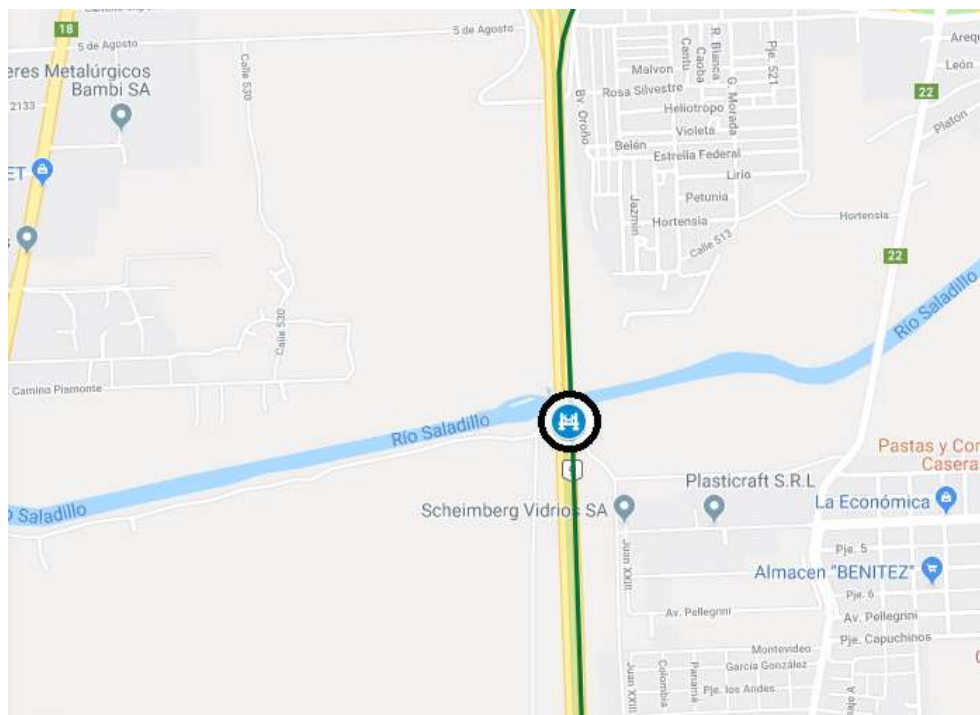


Figura 2.6. Imagen del corredor donde se encuentra ubicado el puente, donde está permitido la circulación de bitrenes, obtenida de la página de Dirección Nacional de Vialidad.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

2.2.1 Documentación de referencia

Las condiciones del puente son evaluadas sobre la base de la siguiente documentación de referencia:

- Plano general en planta y vista correspondiente al proyecto original.
- Plano con secciones transversales de viga cajón correspondiente al proyecto original.
- Nivelaciones de control desde el año 79 al 85.
- Memorias de cálculo del año 1981 sobre reparación mediante postesado adicional en ménsulas.
- Informes realizados por el estudio Del Carril-Fazio, en relación a estudios comparativos sobre solicitaciones debidas a bitrenes y aplanadoras reglamentarias.
- Informes de inventario, relevamiento y evaluación del sistema de gerencia de puentes SIGMA, del año 2012.
- Informes estructural, vial e hidráulico realizados por la DNV en el año 2012.
- Esquemas de perfil longitudinal y transversales realizados por la DNV (sin fecha).

2.2.2 Características de la estructura

La estructura se encuentra compuesta por dos puentes sobre el río Saladillo, que consisten en dos estructuras de idéntica configuración, dos tramos continuos tipo Gerber separados por un tramo isostático. Los dos tramos Gerber descansan sobre dos pilas, cuyo voladizo extremo apoya sobre los estribos y el otro le sirve de apoyo a la parte central isostática que se puede apreciar en las Figuras 2.7 y 2.8.

Cabe destacar que las pilas de hormigón han sido reforzadas en los años 80 mediante cables postensados.

Estos puentes cuentan con un ancho de cinta asfáltica de 7,6 m, teniendo un ancho de calzada de 10,0 m y finalmente un ancho total de 11,6 m (Figura 2.9).

La longitud total del puente consta de 142,94 metros mientras que la altura total será de 9,45 metros. Se materializa mediante dos tramos de hormigón de 60 metros de longitud, 35,1 metros desde el estribo hasta el primer apoyo y 24,9 metros desde el primer apoyo hasta el tramo metálico que cuenta con 22,5 metros en total, en las Figuras 2.10 y 2.11 se observa el Plano de Proyecto de la estructura con las dimensiones mencionadas.

El tablero en la zona de hormigón está compuesto por vigas cajón de sección variable con un ancho de 9 metros aproximadamente de extremo a extremo, las mismas varían verticalmente desde los 0,73 metros a los 3,10 metros de una sección a otra. Cuenta de 6 uniones de neopreno que descansan sobre las pilas para garantizar elasticidad a la estructura y disipar energía (Figuras 2.12 y 2.13).

Simultáneamente el tramo metálico se compone de 7 vigas "I" de acero de 1.0 metro de altura separadas 1,5 metros de eje a eje y vigas transversales de igual altura (Figura 2.14 y Figura 2.15).

En el presente proyecto se analiza una sección que presenta un descenso vertical, que corresponde a la unión entre el tramo metálico y el tramo tipo Gerber que se muestra en las Figuras 2.16 y 2.17. Se analizará el paso de camiones sobre esa sección para determinar el efecto que esta discontinuidad produce sobre los esfuerzos a los cuales está sometida la estructura para determinar el incremento de los mismos y de las deformaciones, así observar si se hace significativo para la seguridad estructural del puente.

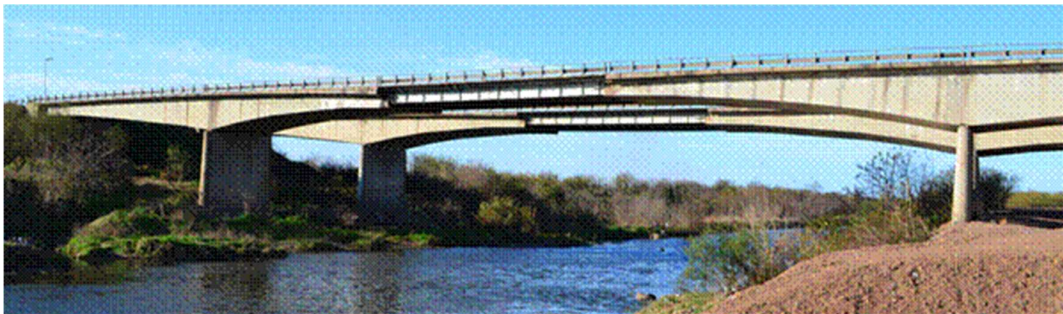


Figura 2.7. Vista general de los Puentes sobre el Río Saladillo, RN9.



Figura 2.8. Vista general de uno de los Puentes.



Figura 2.9. Vista de la calzada de uno de los puentes sobre la autopista de la Ruta Nacional N° 9.

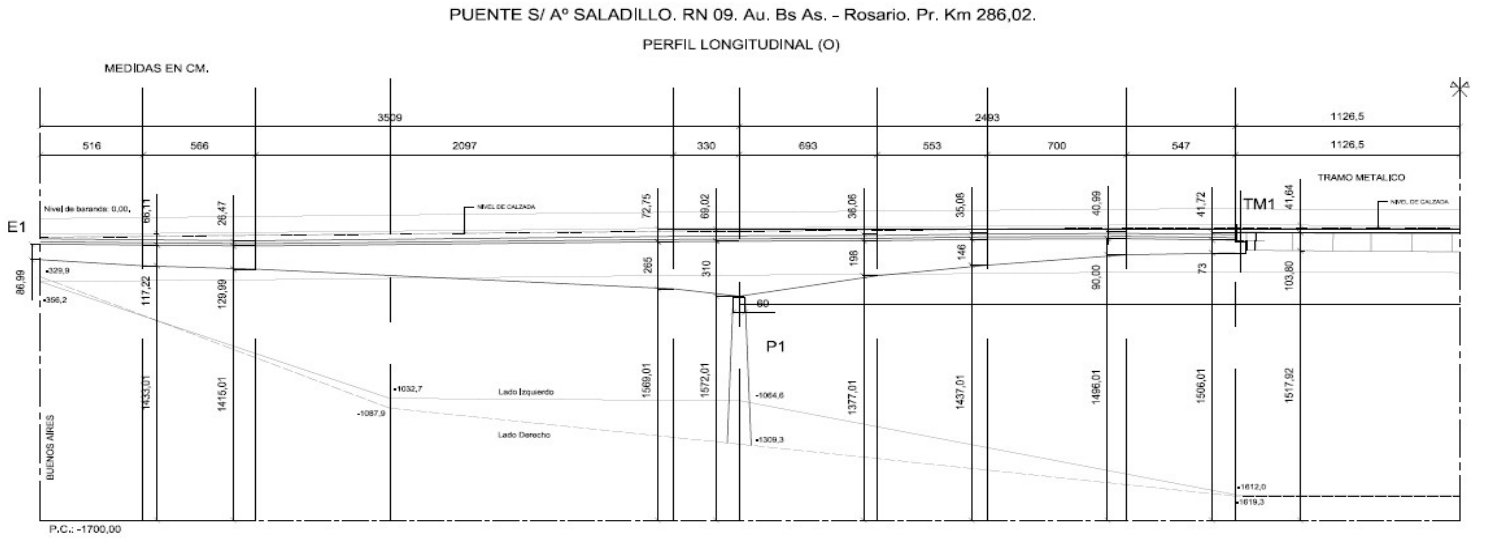


Figura 2. 10. Perfil longitudinal del puente sobre el Rio Saladillo desde el estribo hasta la primera unión con el tramo metálico.

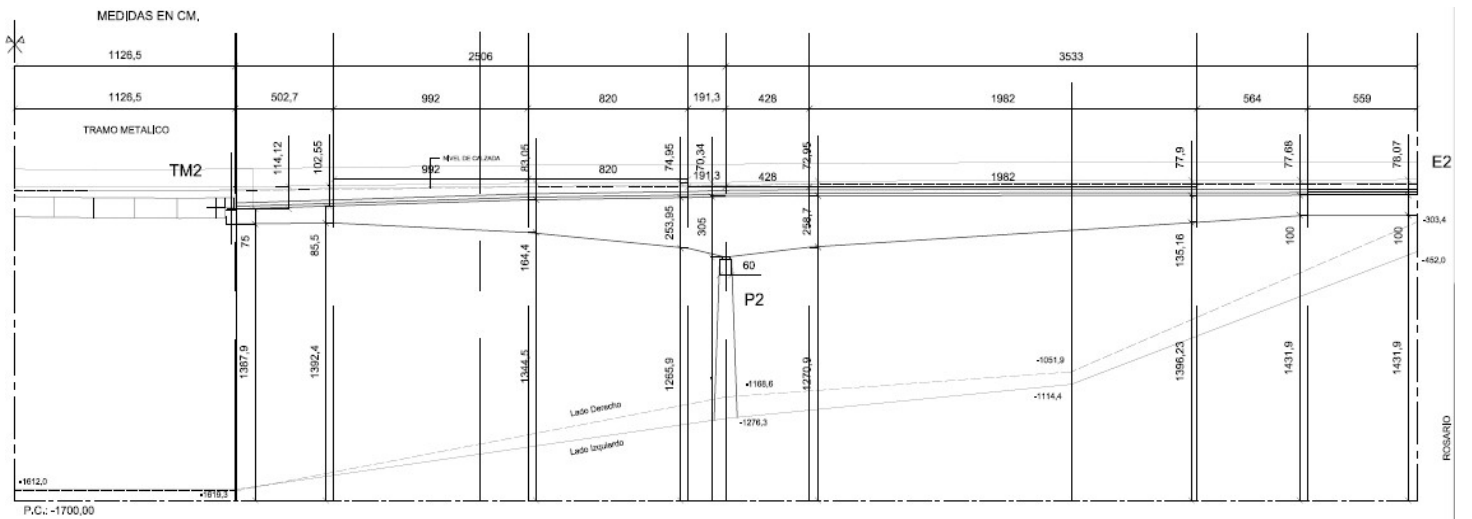


Figura 2.11. Perfil longitudinal del puente sobre el Rio Saladillo desde la segunda mitad del tramo metálico hasta el último estribo, se destacan todas partes, medidas y longitudes del tramo.

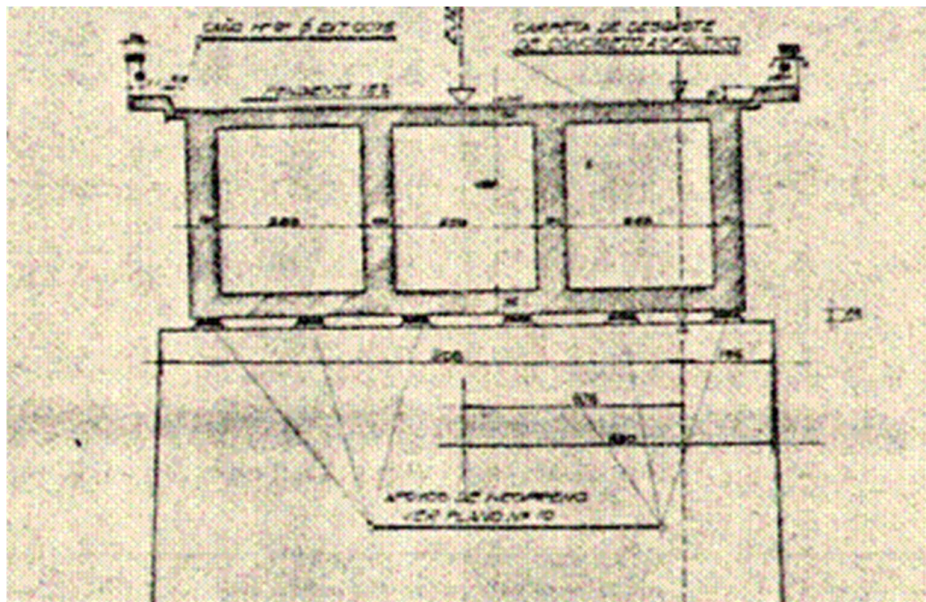


Figura 2.12. Corte transversal en tramo de hormigón, se observan en corte las vigas cajón de sección variable de hormigón sobre la pila, también pueden verse las uniones de neopreno de la pila con las vigas.

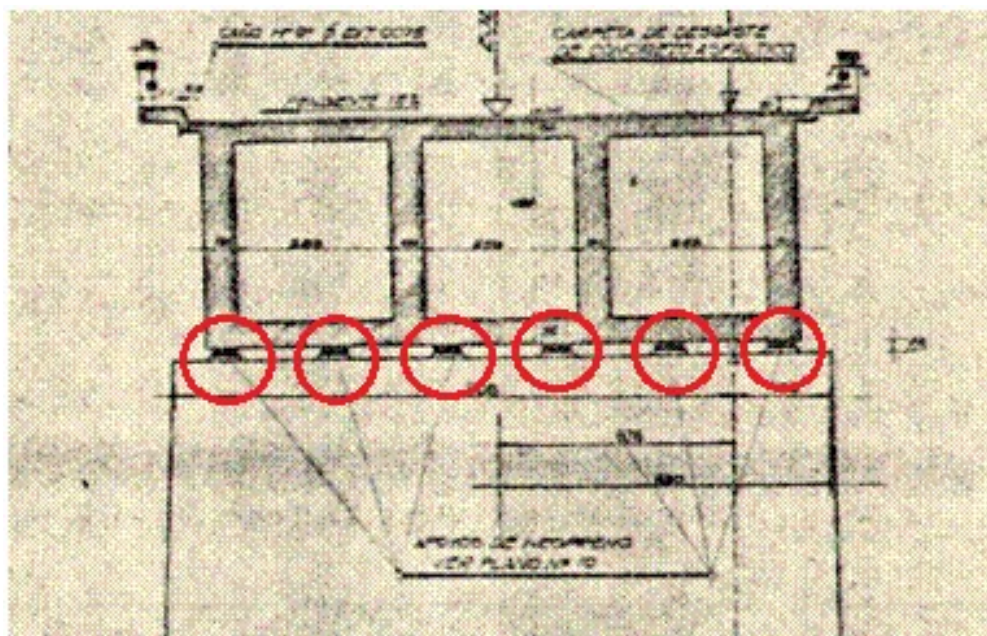


Figura 2.13. Apoyos de neopreno.

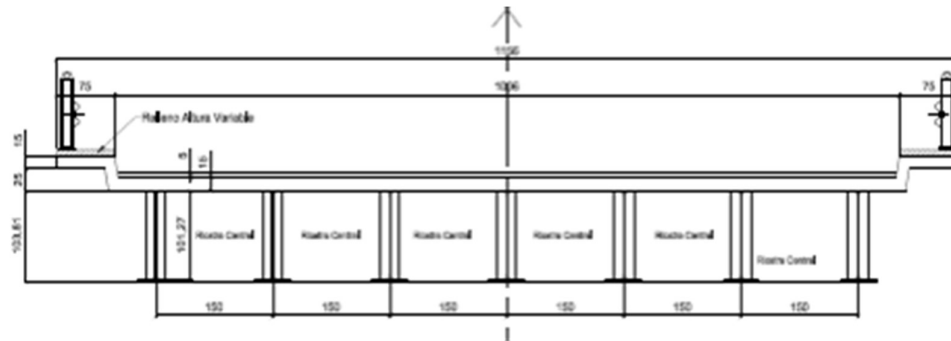


Figura 2.14. Corte transversal en el tramo metálico, se observa las vigas I de acero que componen el tramo isostático separadas 1,5m de eje a eje.



Figura 2.15. Vista de las vigas metálicas del puente sobre el Rio Saladillo, foto tomada desde parte inferior del puente.



Figura 2.16. Foto del descenso en la unión de la parte de hormigón con la parte metálica, causante de la variación en la pendiente de la rasante del puente.

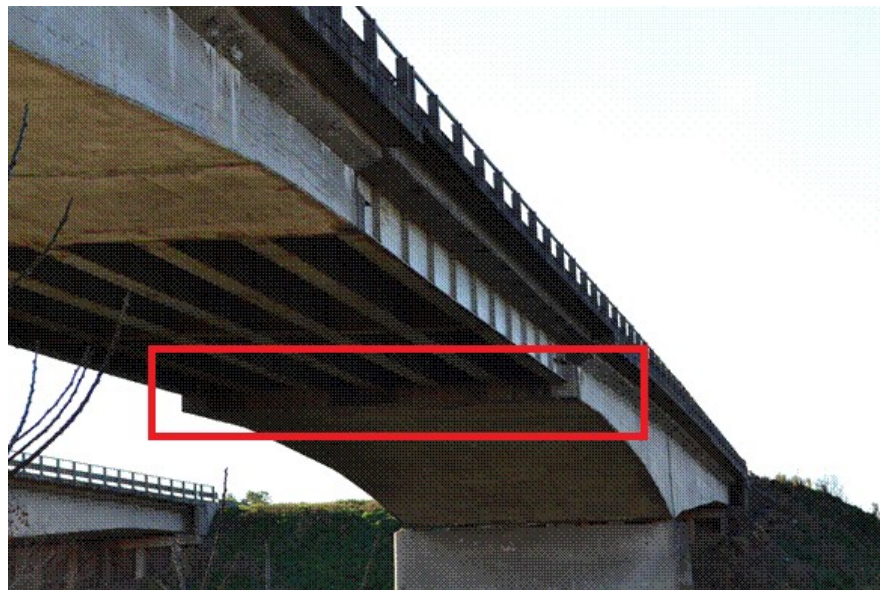


Figura 2.17. Foto del descenso en la unión de la parte de hormigón con la parte metálica, causante de la variación en la pendiente de la rasante del puente.

2.3 CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO SEGÚN LA REGLAMENTACIÓN VIGENTE

Para seleccionar la configuración del vehículo que se utiliza en el programa se revisa la reglamentación vigente presentada por la DNV. Recientemente se han agregado vehículos de transporte de cargas que no requieren permiso de tránsito, pero solo pueden circular por corredores en Rutas Nacionales.

Se utilizaron los siguientes decretos y artículos:

- Decreto 32/2018, Pesos máximos establecidos por la ley, Configuraciones Vehiculares Según Transmisión a calzada.
- Artículo 27 del Decreto 32/18, Configuraciones Autorizadas Por el transporte Automotor de Cargas, Escalabilidad.
- Artículo 57, Exceso de carga.

Se selecciona el bitren de 75 toneladas (Figuras 2.18, 2.19) que consta de un eje delantero simple de 6 tn de carga admisible, un eje tipo tándem de 18 tn, y finalmente dos ejes tipo tridem de 25 tn.

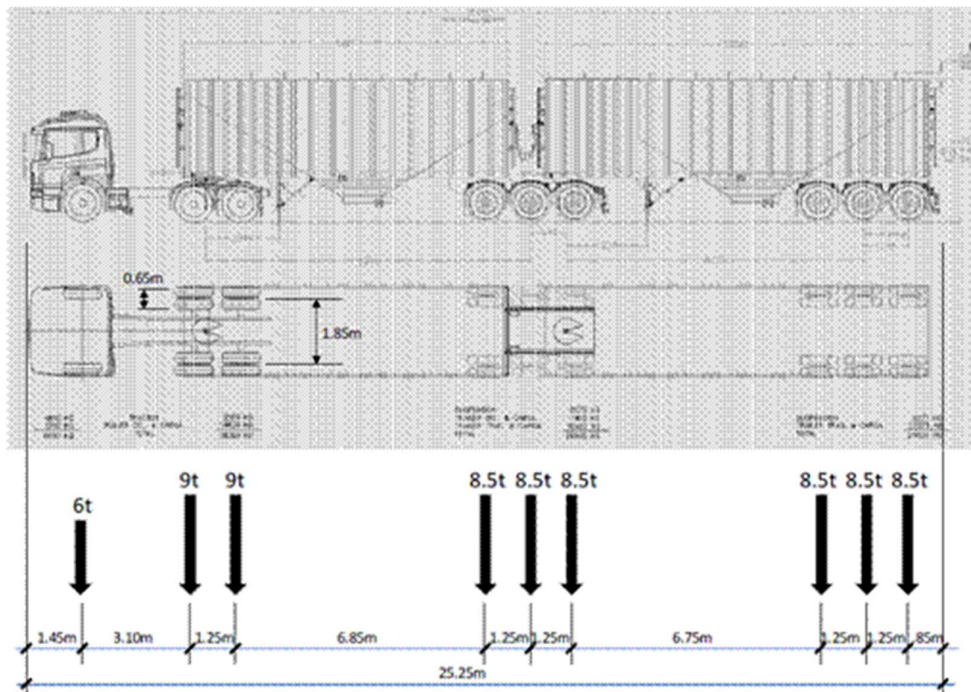


Figura 2.18. Bitren de 75 toneladas.

N°	TIPO DE VEHÍCULO	CONFIGURACIÓN N° DE EJES	DIMENSIONES MÁXIMAS			PESO MÁXIMO (t)	Relación POT/PESO (CV/t) mín.
			LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)		
28		S1 - D2 - D3 - D3	22,40<L<25,50	2,60	4,30	75,00	6,75

Figura 2.19. Configuraciones autorizadas por el transporte automotor de cargas, Escalabilidad.

3. ANALISIS ESTRUCTURAL

En las aplicaciones prácticas de la Mecánica Estructural se dan con frecuencia situaciones en las que la naturaleza de las acciones exteriores altera el carácter lineal de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de la estructura, aun cuando se pueda considerar que el material permanece en régimen elástico y que tanto los movimientos como las deformaciones del sistema son pequeños.

Un cálculo riguroso exige aplicar técnicas del análisis no lineal para la obtención de la respuesta. Ante situaciones de este tipo el criterio del analista conduce habitualmente a simplificaciones que tienden a linealizar el problema sin que se alteren demasiado los resultados. Esto permite, en general, aplicar las conocidas técnicas del análisis dinámico lineal: superposición modal, análisis en el dominio de la frecuencia, etc. Cuando se trata de estructuras sometidas al tráfico de vehículos la práctica tradicional utilizada en el diseño de puentes, y recogida en la normativa consiste en analizar la estructura desde el punto de vista estático con la carga situada en los puntos que se consideran más desfavorables. El carácter dinámico del problema se introduce a través de determinados "coeficientes de impacto" que mayoran los efectos de la carga estática.

De este modo se supone que las respuestas obtenidas corresponden a los valores máximos de las respuestas reales. Estos procedimientos simplificados, de indudable valor práctico a nivel de diseño, tienen el inconveniente de que no permiten acercarse mucho al detalle de la conducta estructural bajo las acciones reales. Así, en el caso de puentes, cuando se interpretan los resultados de pruebas de carga se hace necesario recurrir a modelos de cálculo más sofisticados que permitan reproducir con más fidelidad el comportamiento estructural real. El modelo trata de simplificar el impacto producido por vehículos que pasan sobre un desnivel sobre el puente ya que el campo habitual de aplicación de la integración explícita son los problemas de impacto, donde las altas frecuencias dominan la respuesta y se requieren pasos de integración suficientemente pequeños para representarla con precisión.

La metodología presentada en este trabajo permite, estudiar de manera totalmente acoplada las oscilaciones de los vehículos y las de la estructura, e introducir de forma muy sencilla la influencia de las irregularidades del pavimento.

Para el estudio de respuesta del puente respecto las cargas pasantes de gran porte se realizó un análisis de la dinámica estructural del mismo teniendo en cuenta conceptos básicos del funcionamiento de las cargas dinámicas y la respuesta estructural que el mismo presenta frente a ellas.

Las características dinámicas más relevantes de una estructura son los periodos naturales de vibración y el amortiguamiento. El periodo natural más alto llamado periodo fundamental resulta siempre importante e influye en todos los casos de cargas dinámicas, mientras que el amortiguamiento en algunos casos puede ser importante y en otros no. La respuesta dinámica depende además de otras propiedades como la capacidad de disipar energía por la velocidad con que se aplica la carga, éstos y otros factores pueden ser importantes. A continuación, se presentan los conceptos teóricos utilizados para el análisis realizado.

3.1 DINAMICA ESTRUCTURAL

El objetivo de la Dinámica Estructural es el análisis del comportamiento de estructuras bajo cargas dinámicas, dichas cargas son definidas como cargas que varían en función del tiempo.

Se intenta presentar una alternativa de análisis de puentes teniendo en cuenta las variaciones y cambios en la rasante del tablero del puente y, a modo comparativo, presentar los efectos producidos por el cambio de pendiente del vector velocidad que presentan los vehículos debido a las variaciones de la rasante del puente.

Las cargas móviles, a diferencia del peso propio, rara vez son estáticas, dado que su aplicación sobre la estructura requiere un cierto tiempo que debe ser analizado para establecer si se trata de una carga estática o dinámica, sin embargo, es válido aceptar que si la magnitud de la fuerza varía en forma suficientemente lenta no causará efectos dinámicos y podrá tratarse como estática.

A efectos de realizar esta determinación, el valor de referencia dado es el "Periodo natural de la estructura". El periodo natural puede definirse como el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, es decir, la vibración que ocurre después que finaliza la excitación externa, y se mantiene constante. El mismo depende de la masa, la rigidez y de las condiciones de vínculo, todas estas características intrínsecas de la estructura.

El análisis dinámico involucra dos tipos de fuerzas que no aparecen en el caso estático, las fuerzas inerciales asociadas a la propiedad de inercia de la masa de la estructura y de las componentes o partes no estructurales, y de las fuerzas de disipación de energía por diversos tipos de mecanismos (fricción viscosa, fricción seca en uniones estructurales, etc.). Apunta a determinar el primer término los desplazamientos de la estructura en función del tiempo, y a partir de ellos se determinan los esfuerzos en la forma habitual tal como si fueran cargas estáticas.

3.1.1 Fuerzas internas en la estructura

Las fuerzas internas que actúan sobre las componentes de una estructura dependen de los desplazamientos o deformaciones específicas. Si se desea conocer una fuerza en función de la deformación se procede en primer término a calcular dicha deformación y luego por medio de la ley de Hooke se obtienen los esfuerzos.

Se propone un proceso de deformación variable en el tiempo para el cual se cuenta con instantáneas fotográficas de las deformaciones de la estructura, es posible determinar las fuerzas elásticas internas en cada punto de la estructura a partir de las deformaciones en cada instante, independiente del estado de deformación en el instante anterior o posterior al considerado, las fuerzas elásticas solo dependen de los desplazamientos (y deformaciones) en cada instante y no de la velocidad o de la aceleración.

Para cada una de esas instantáneas fotográficas el cálculo de los esfuerzos (momento flector, corte, axial y momento torsor) requiere del cálculo para análisis estructural bajo cargas estáticas, a partir de desplazamientos y giros de los nudos se obtiene las deformaciones específicas (curvatura de flexión, deformación específica axial, giro en torsión por unidad de longitud) y se obtienen las fuerzas elásticas internas a través de las relaciones constitutivas.

Como una primera aproximación es posible decir que la esencia del problema dinámico consiste en evaluar los desplazamientos de la estructura en cada instante de tiempo, y a

partir de ellos proceder a determinar los esfuerzos mediante las expresiones de la ley de Hooke o la ley constitutiva material sin distinguir entre un problema dinámico de otro estático, pero en realidad la velocidad con que se deforma el material puede modificar en algunos casos el modulo elástico del material y consecuentemente las tensiones correspondientes para igual valor de las deformaciones. Cuando la velocidad de carga es elevada, el modulo elástico tiende a incrementarse por la viscosidad interna del material que no responde en forma instantánea.

3.1.2 Respuestas a cargas variables en el tiempo

El problema dinámico consiste en calcular los desplazamientos (y sus correspondientes deformaciones) de la estructura bajo un sistema de cargas exteriores variables con el tiempo $F(t)$. Este tipo de proceso de carga ocurre para el análisis en cuestión.

En un caso genérico la amplitud de carga $F(t)$ describe un diagrama como el de la siguiente figura (Figura 3.1), que se considera conocido y que constituye un dato del problema. Por lo general la valoración de la función carga $F(t)$ resulta ser compleja por la influencia de las múltiples variables involucradas, por lo que se suele recurrir a simplificaciones que permiten aproximar el problema.

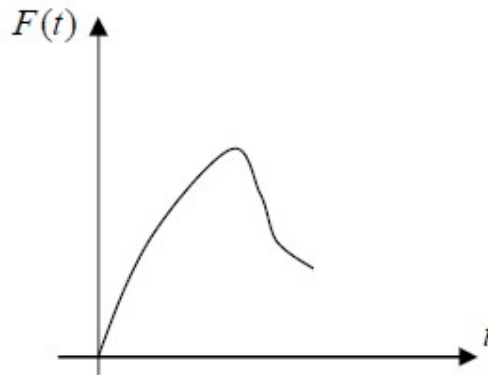


Figura 3.1. La siguiente figura muestra la función de una carga que varía con el tiempo t , $F(t)$.

En la mayoría de los distintos tipos de cargas dinámicas propias de las estructuras civiles, la determinación de la ley de variación de carga en función del tiempo se basa en datos experimentales que adecuadamente interpretados y analizados son incorporados a los reglamentos o normas de diseño, en el caso del puente, los reglamentos para diseño de puentes carreteros (DNV) o ferroviarios.

Con frecuencia ocurre que la magnitud de $F(t)$ depende de la respuesta de la estructura y la valoración de la carga requiere de cierta aproximación previa a la solución del problema dinámico.

En casos de cargas de muy baja duración en el tiempo, el efecto de la carga $F(t)$ se puede representar a través de la "Velocidad inicial equivalente" que recibe la estructura como consecuencia de la carga. La velocidad inicial será directamente proporcional al valor del impulso total de la carga que se define como el valor de la integral de la función de carga $F(t)$ entre el comienzo y final de la carga, denominamos esta clase como Cargas Impulsivas.

En efecto, la investigación en cuestión, está basada en representar el paso del bitren por una sección con cambio de pendiente, como una serie de cargas impulsivas que se producen debido al cambio de dirección del vector velocidad, y que son directamente proporcionales a los pesos por ejes del bitren, entonces una medida de la intensidad de la carga se puede expresar a través de la magnitud del impulso que dicha carga produce, y ese impulso puede transformarse directamente en una velocidad inicial en la zona afectada por la carga.

3.1.3 Fuerzas de inercia

Se considera una viga sobre la cual actúa una fuerza másica para analizar el comportamiento dinámico (Figura 3.2). Si el conjunto no tiene masa y además no hay fuerzas de disipación por fricción, la respuesta instantánea a cada valor de $F(t)$ es la misma que en el caso estático (sin inercia). Por lo tanto, el desplazamiento $u(t)$ sigue la variación de la carga, ya que $u(t)$ es proporcional a $F(t)$.

Cuando se introduce la masa, su propiedad de inercia tiende a retrasar la respuesta respecto la sollicitación exterior. La acción de la carga exterior introduce al sistema energía en forma de trabajo externo como consecuencia de la carga aplicada a través del desplazamiento que dicha carga provoca, energía que se almacena internamente en dos modalidades, en forma de energía cinética, y en forma de energía de deformación.

La masa adquiere velocidad, en este proceso absorbe parte de la energía externa que ofrece la carga exterior aplicada. Cuando deja de actuar la carga exterior, el trabajo exterior transferido se almacena parcialmente como energía de deformación, y como energía cinética, y en ausencia de fricción interna o externa la suma de ambas componentes permanece constantes en el tiempo.

En los problemas elásticos bajo cargas dinámicas la energía interna del sistema está constituida por la suma de las componentes de energía interna de deformación y la energía cinética, si no hay fricción, el total de la energía externa suministrada por la carga aplicada se transforma en energía interna de deformación y en energía cinética en proporciones que varían en función del tiempo.

La respuesta dinámica puede traer como consecuencia que su valor máximo represente una amplificación o una reducción respecto a la que se produciría si el sistema no tuviera inercia, es decir, para todas las restantes condiciones idénticas, no se puede decir que la respuesta dinámica necesariamente sea mayor que la elástica, el efecto de la inercia de las masas puede llevar a una amplificación o a una reducción de la respuesta respecto al mismo caso sin inercia. En el presente trabajo se analizará si el efecto de las fuerzas másicas aplicadas al puente (fuerzas referidas al bitren) produce una amplificación o una reducción de la respuesta sobre el mismo.

La evaluación de la respuesta dinámica de un sistema elástico se asocia a dos características importantes para la dinámica de la estructura, una controlada por la relación entre la inercia y la rigidez elástica de las componentes, expresada a través del "Periodo natural T_n " del sistema, o de su inversa la "Frecuencia Natural f_n " y la otra asociada a la capacidad de disipación de energía a través de las fuerzas de "fricción o amortiguamiento".

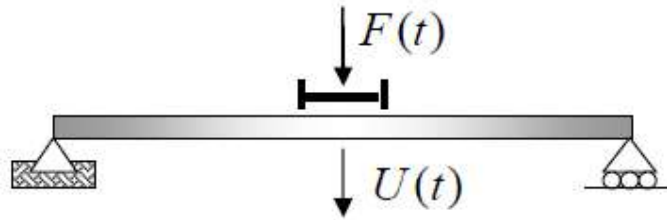


Figura 3.2. Fuerza que varía con el tiempo $F(t)$ sobre una viga simplemente apoyada, $U(t)$ desplazamiento de la viga.

3.1.4 Fuerzas disipativas

Se denomina “amortiguamiento” a la capacidad de disipar energía del sistema. Existen casos en donde las máximas tensiones no dependen del amortiguamiento mientras que en otros casos el amortiguamiento juega un papel muy importante en la amplitud de la respuesta dinámica.

Para cargas de corta duración y un único pulso (Figura 3.3), el amortiguamiento de la estructura no incide en gran medida en la magnitud de la máxima respuesta, por lo tanto, no se tiene en cuenta (la mayoría de las veces) para calcular el valor máximo de la respuesta.

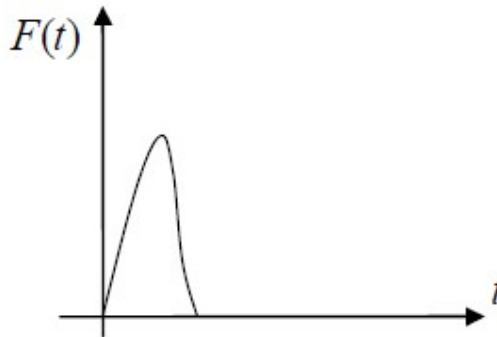


Figura 3.3. La imagen muestra una función de carga $F(t)$ que varía en función del tiempo, de corta duración.

En otros casos, como en movimientos vibratorios sostenidos de tipo periódico de larga duración en el tiempo, el amortiguamiento puede tener gran incidencia en la magnitud de la respuesta dependiendo de la frecuencia de excitación en comparación con la frecuencia natural del sistema, se puede demostrar que, para casos de cargas de baja frecuencia frente a la frecuencia natural, la respuesta es esencialmente estática y el amortiguamiento no afecta a la respuesta. Para cargas de alta frecuencia frente a la frecuencia natural, el amortiguamiento tampoco incide significativamente en la amplitud de la respuesta. Para el caso de cargas con frecuencias muy próximas a la frecuencia natural del sistema, el amortiguamiento es muy importante en la amplitud de la respuesta debido al fenómeno de “resonancia”. Por lo tanto, las fuerzas disipativas no siempre tendrán incidencia apreciable en la magnitud de la respuesta.

El proceso de disipación de energía puede observarse en el puente analizado, luego de la aplicación de las cargas del bitrén.

Finalizado el paso del vehículo, el puente tendrá un comportamiento de vibración libre donde predominan las frecuencias naturales de los modos excitados. Se podrá observar más adelante que gracias al amortiguamiento los desplazamientos verticales van disminuyendo con el tiempo exponencialmente, si se considera un amortiguamiento viscoso, hasta que las oscilaciones desaparecen.

Es posible explicar este fenómeno con un gráfico carga y descarga F-U (Figura 3.4) que relaciona fuerzas con desplazamientos, se observa que sigue una línea recta en el caso de que la ley de Hooke se cumpla durante el proceso de carga y descarga, la energía que se disipa en el proceso de carga es igual a cero, ya que la energía almacenada durante la carga se recupera en la descarga, resultando nula el área encerrada entre la curva de carga y descarga.

Cuando interviene el amortiguamiento (fuerzas disipativas) una primera aproximación habitual es considerar que F_D es proporcional a la velocidad \dot{U} a través de una constante positiva C , representando el “amortiguamiento viscoso”.

La constante C no necesariamente es constante e independiente de la amplitud del desplazamiento, pero es habitual tratarla como si lo fuera, con lo presentado obtenemos la expresión de F_D .

$$F_D = C\dot{U} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde F_D es la fuerza disipativa; C es la constante de disipación; y \dot{U} la velocidad de desplazamiento.

Considerando una barra elástica sometida a tracción por las fueras $F(t)$ y $-F(t)$ actuando en sus extremos, considerando que el material componente de la barra es visco elástico, es decir, las fuerzas aplicadas en sus extremos están equilibradas por dos tipos de mecanismos en paralelo, un mecanismo elástico descrito por la ley de Hooke y un mecanismo viscoso generador de la fuerza F_D .

Se supone que en cada instante una parte de la carga exterior $F(t)$ es equilibrada por las fuerzas elásticas y otra parte por las fuerzas viscosas, la variación del desplazamiento de los extremos de la barra como función de la carga total $F(t)$ seguirá la curva indicada en la Figura 3.5 a una elipse que encierra un área proporcional a la energía disipada en cada ciclo de deformación completo de carga y descarga.

Debe tenerse en cuenta que la energía disipada para el amortiguamiento viscoso no depende solo de la amplitud del desplazamiento máximo “A” sino que también varía con la velocidad de carga, si se incrementa la frecuencia de la excitación aplicada, se incrementara el área de la elipse y la energía disipada en cada ciclo es proporcional a la velocidad, la que a su vez es proporcional a la frecuencia de la excitación (para una amplitud dada del desplazamiento máximo en cada ciclo) (Figura 3.6).

La Figura 3.7 muestra la parte elástica y la parte viscosa de la carga total aplicada para cada valor del desplazamiento.

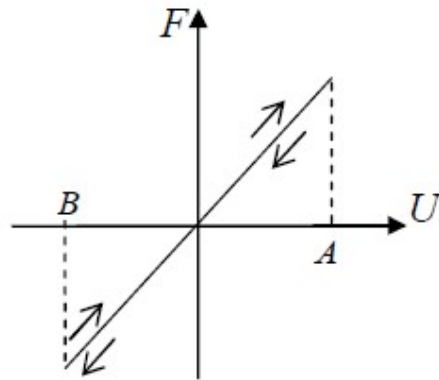


Figura 3. 4. Gráfico de carga y descarga de una barra elástica sometida a tracción por las fuerzas $F(t)$ actuando en sus extremos, en el eje de abscisas se encuentran los desplazamientos producidos por la barra gracias al esfuerzo externo aplicado, en el eje vertical se encuentra la fuerza aplicada, no inciden fuerzas disipativas, carga lenta.

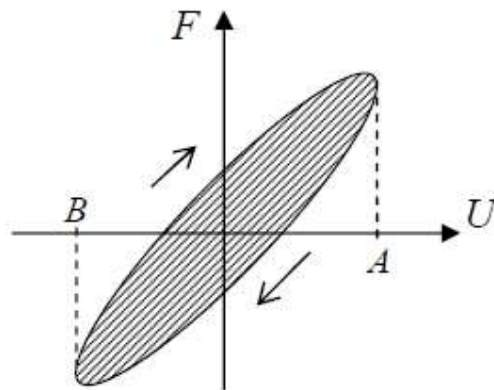


Figura 3.5. Gráfico de carga y descarga de una barra elástica sometida a tracción por las fuerzas $F(t)$ a una velocidad media, actuando en sus extremos, en el eje de abscisas se encuentran los desplazamientos producidos por la barra gracias al esfuerzo externo aplicado, en el eje vertical se encuentra la fuerza aplicada, teniendo en cuenta la incidencia del amortiguamiento, una elipse encierra un área proporcional a la energía disipada en cada ciclo de deformación completo de carga y descarga.

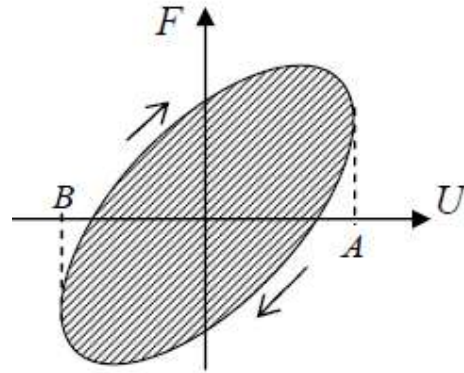


Figura 3.6. Gráfico de carga y descarga de una barra elástica sometida a tracción por las fuerzas $F(t)$ a alta velocidad, actuando en sus extremos, en el eje de abscisas se encuentran los desplazamientos producidos por la barra gracias al esfuerzo externo aplicado, en el eje vertical se encuentra la fuerza aplicada, teniendo en cuenta la incidencia del amortiguamiento, una elipse encierra un área proporcional a la energía disipada en cada ciclo de deformación completo de carga y descarga.

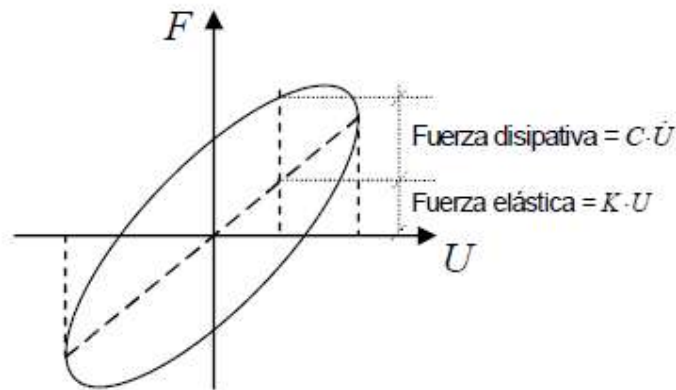


Figura 3.7. Se ilustra la parte elástica y la parte viscosa de la carga total aplicada para cada valor del desplazamiento.

3.1.5 Velocidad de reacción de una estructura

La velocidad de reacción de una estructura se define a través de los periodos naturales de vibración, que representa la capacidad de responder a una acción externa. Para explicar el fenómeno de los periodos naturales de vibración se supone una masa sustentada por un resorte elástico que es apartado de su posición de equilibrio y luego es liberada, la misma comienza a oscilar alrededor de la posición de equilibrio inicial con una cierta frecuencia propia f_n (o con su periodo natural $T_n = 1/f_n$) que permite caracterizar la capacidad del sistema masa/resorte para seguir la variación de la carga en el tiempo.

Según la variación en el tiempo de la función de carga con respecto a T_n se podrá establecer si la carga aplicada produce efectos dinámicos, y si no produce efectos dinámicos se dice que el comportamiento del sistema frente a la carga es estático. Como medida comparativa, se tiene en cuenta el tiempo en el que se introduce la carga t_D , si el mismo es muy inferior al periodo natural de la estructura se considera que la carga

se aplica en forma dinámica. Por lo tanto, la capacidad de la estructura para reaccionar frente a la carga está directamente asociada al valor del periodo natural T_n (Figura 3.8).

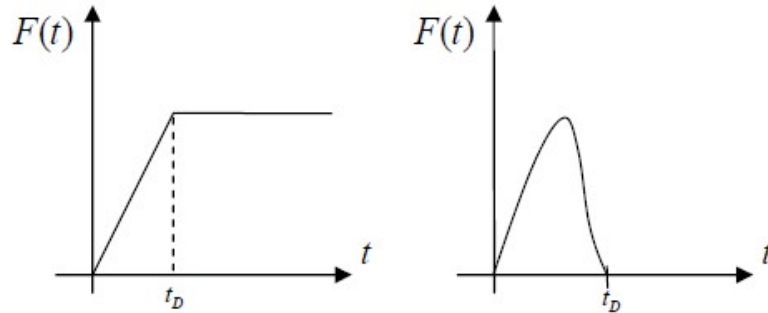


Figura 3.8. Se ilustra dos tipos de fuerzas que varían en función del tiempo, a la izquierda una carga de larga duración y con crecimiento lineal, a la derecha una carga de corta duración y un único impulso, siendo t_D el tiempo total de aplicación de la carga.

Se puede determinar si el problema será estático o dinámico según los valores del siguiente cociente: $\frac{t_D}{T_n}$.

Si $\frac{t_D}{T_n} \leq 1$ estamos tratando con un problema **dinámico**.

Si $\frac{t_D}{T_n} \gg 1$ estamos tratando con un problema **estático**.

Siendo t_D el tiempo total de aplicación de carga; y T_n el periodo natural de la estructura.

3.1.6 Integral de Duhamel

En el trabajo de investigación se considera que las cargas bitren que circulan sobre el puente son una serie de fuerzas impulsivas aplicadas en una sección, a modo explicativo se analiza la respuesta de desplazamientos en función del tiempo $U(t)$ de un oscilador simple sometido a una excitación $P(t)$ arbitraria, y luego se adaptaran las ecuaciones para el caso analizado en la presente investigación. Se puede suponer que el oscilador simple representa al puente y la carga de excitación representa las cargas impulsivas aplicadas sobre la sección del puente que a su vez representan el paso del bitren sobre dicha sección. El procedimiento consiste en considerar el efecto de la fuerza $P(t)$ como una superposición de impulsos infinitesimales como se indica en la siguiente figura (Figura 3.9).

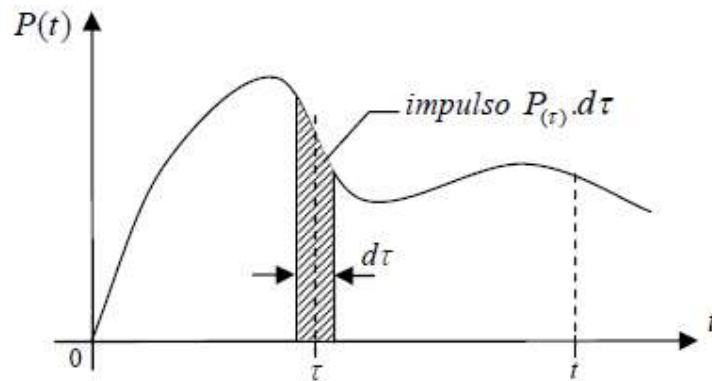


Figura 3.9. El efecto de una fuerza $P(t)$ puede ser representado como una superposición de impulsos infinitesimales en un tiempo $d\tau$, el área bajo la curva representa el impulso.

La respuesta al cabo de un instante genérico t será igual a la suma (o la integral) de los efectos producidos por los impulsos elementales $P(\tau)d\tau$ aplicados hasta ese instante. Se analiza la respuesta a un impulso rectangular de muy corta duración ilustrado en la Figura 3.10, adoptando como condiciones iniciales $U_i = 0$ y $\dot{U}_i = 0$; siendo U_i el desplazamiento inicial y \dot{U}_i la velocidad inicial.

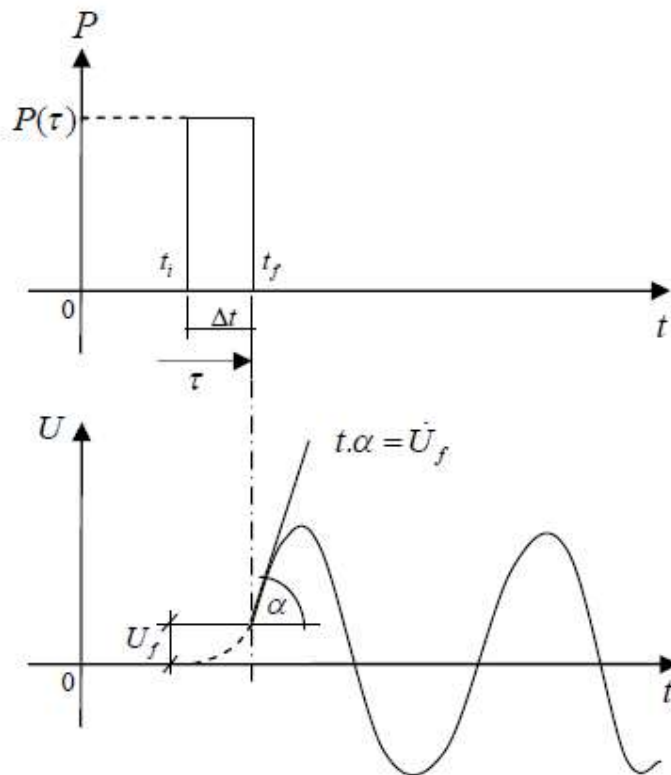


Figura 3.10. Se observa la respuesta a un impulso rectangular de muy corta duración, siendo t_i el tiempo inicial de aplicación de carga, t_f el tiempo final de aplicación de carga, en el eje vertical se observa $P(\tau)$, la carga en función del tiempo. Se adopta condiciones iniciales $U_i = 0$ y $\dot{U}_i = 0$, siendo U_i el desplazamiento en el tiempo inicial y \dot{U}_i la velocidad en el tiempo inicial.

Teniendo en cuenta la ecuación del movimiento:

$$KU + M \ddot{U} + C \dot{U} = P \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo K la rigidez de la estructura; M la masa; C la constante de amortiguamiento; y P un impulso de muy corta duración actuando directamente sobre la masa; KU representa la fuerza elástica; $M \ddot{U}$ expresa la fuerza inercial; y $C \dot{U}$ representa la fuerza disipativa. La ecuación para el instante inicial se reduce a:

$$M \ddot{U}_i = P_i \quad (\text{Ec. 3}) \text{ por lo tanto}$$

$$\ddot{U}_i = \frac{P_i}{M} = \frac{P_f}{M} \quad (\text{Ec. 4})$$

Siendo M la masa; \ddot{U}_i la aceleración al inicio de aplicación de carga; P_i la fuerza aplicada directamente sobre la masa en el tiempo inicial; P_f la fuerza aplicada directamente sobre la masa en el tiempo final.

La velocidad en el instante t_f es:

$$\ddot{U}_f = \dot{U}_i + \ddot{U}_i \Delta t \quad (\text{Ec. 5}) \text{ por lo tanto}$$

$$\dot{U}_f = \frac{P_f}{M} \Delta t \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo \ddot{U}_f la aceleración al final de la aplicación de la carga; P_f la fuerza aplicada en el tiempo final; Δt diferencial de tiempo; y M la masa.

El espacio recorrido resulta:

$$U_f = U_i + \dot{U}_i \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{U}_i \Delta t^2 \quad (\text{Ec. 7}) \text{ por lo tanto podemos expresar}$$

$$U_f = \frac{1}{2} \frac{P_f}{M} \Delta t^2 \quad (\text{Ec. 8})$$

La respuesta debida a un impulso de muy corta duración en un instante t corresponde a vibraciones libres regidas por la siguiente ecuación e ilustrada en la Figura 3.11:

$$U = e^{-\varepsilon \omega t} \left(\left(\frac{\dot{U}_0 + \varepsilon \omega U_0}{\omega_D} \right) \sin(\omega_D t) \right) + U_0 \cos(\omega_D t) \quad (\text{Ec. 9})$$

Siendo U el desplazamiento del objeto en movimiento; ε la relación o el cociente de amortiguamiento; ω la frecuencia circular del sistema no-amortiguado; \dot{U}_0 la velocidad inicial en el instante en que se retira al sistema de su posición de equilibrio; U_0 el desplazamiento correspondiente del sistema una vez sacado de su posición de equilibrio.

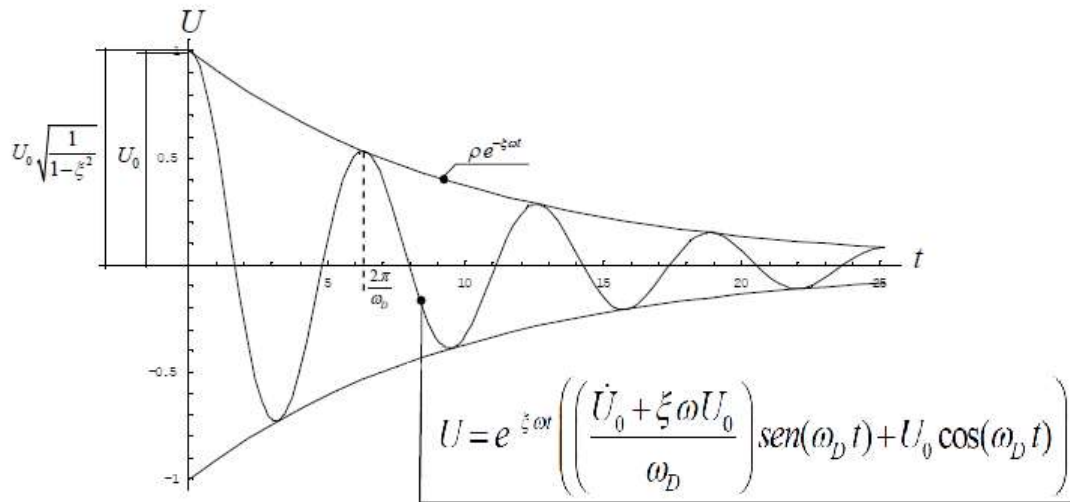


Figura 3.11. El siguiente grafico muestra la solución U en función del tiempo que representa el movimiento armónico amortiguado de un sistema que fue sacado de su equilibrio al aplicarle una carga externa directamente. Se observa que el sistema presenta un movimiento de oscilación amortiguado que decrece exponencialmente debido al amortiguamiento a medida que pasa el tiempo.

Si se tienen condiciones iniciales dadas por las Ecs. 6 y 8 aplicadas en cualquier instante τ se obtienen:

$$U = e^{-\xi \omega (t-\tau)} \left(\left(\frac{\dot{U}_{(\tau)} + \xi \omega U_{(\tau)}}{\omega_D} \right) \sin(\omega_D (t - \tau)) + U_{(\tau)} \cos(\omega_D (t - \tau)) \right) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde

$$U_{(\tau)} = U_f, \text{ dado por Ec. 8}$$

$$\dot{U}_{(\tau)} = \dot{U}_f, \text{ dado por Ec. 6}$$

Siendo

$$P_f = P(\tau)$$

Si se considera un tiempo infinitesimal $d\tau$ de duración del impulso, el valor de $U_{(\tau)}$ dado por la Ec. 8 resulta un infinitésimo de orden superior frente a $\dot{U}_{(\tau)}$ dado por la Ec. 6, por lo que puede desprejarse. Luego:

$$U(t)_{impulso} = e^{-\xi \omega (t-\tau)} \left(\frac{P(\tau)}{M \omega_D} d\tau \sin(\omega_D (t - \tau)) \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

La respuesta para una carga arbitraria se obtiene considerando que la misma es la integral de las respuestas correspondientes a una sucesión de impulsos infinitesimales (Figura 3.12):

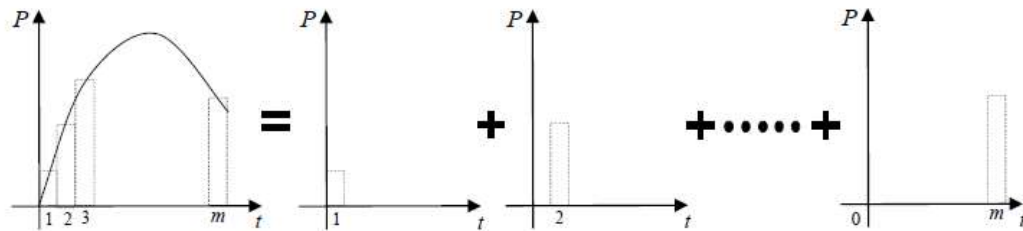


Figura 3.12. En el grafico se muestra una carga externa que varía en función del tiempo arbitraria como la sumatoria de una sucesión de impulsos infinitesimales desde el tiempo inicial hasta el tiempo final.

La respuesta total se obtiene integrando las respuestas para cada uno de los impulsos en que se divide la carga, dados por la Ec. 12.

$$U(t) = \frac{1}{M\omega_D} \int_0^t e^{-\varepsilon(t-\tau)} \left(\frac{P(\tau)}{M\omega_D} d\tau \sin(\omega_D(t-\tau)) \right) d\tau \quad (\text{Ec. 13})$$

Dicha ecuación se conoce como Integral de Duhamel.

Adicionalmente, debe agregarse a $U(t)$ dada por la Ec. 13, la respuesta transitoria debida a las condiciones iniciales en $t = 0$ ($U(0)$ y $\dot{U}(0)$) que son independientes de $P(t)$.

Es importante tener en cuenta que este procedimiento se basa en el principio de superposición y solo resulta valido para sistemas lineales.

La Integral de Duhamel resulta completamente general y puede aplicarse a cualquier tipo de carga, pero normalmente se la utiliza para tratar impulsos o efectos transitorios ya que para condiciones de una carga armónica en régimen se cuenta con la solución general analizada anteriormente. Dicha integral resulta un caso particular de la Integral de Convolución entre dos funciones: la de carga y la de la respuesta a un impulso unitario.

La solución de la Integral de Duhamel para diversas funciones de carga está dada por expresiones analíticas que se encuentran resueltas y tabuladas en la literatura, dado el caso en que la variación de la carga no sea una función sencilla como para aproximarla por alguno de los casos cuya solución se conoce, la solución puede obtenerse evaluando la Integral de Duhamel por algún procedimiento numérico.

La misma, se utiliza para calcular la respuesta en un instante dado perfectamente definido, es decir para un instante "t" dado. Partiendo de la expresión Ec. 13 se han desarrollado técnicas basadas en fórmulas de recurrencia que permiten obtener $U(t_i + \Delta t)$ a partir de $U(t_i)$, lo que equivale a calcular en forma numérica la Integral de Duhamel para todos los valores de la variable "t".

En el caso de cargas impulsivas, el valor máximo de la respuesta, que constituye el principal parámetro de interés practico, ocurre poco tiempo después de iniciada la aplicación de la carga, por lo que el amortiguamiento no alcanza a desarrollar significativamente su efecto de reducción de la respuesta. Si no se considera amortiguamiento, la expresión Ec. 13 se simplifica y toma la siguiente forma:

$$U(t) = \frac{1}{M\omega} \int_0^t (P(\tau) \sin(\omega(t - \tau)) d\tau) \text{ (Ec. 14)}$$

La integral Ec.14 está resuelta en forma analítica exacta para una cantidad de casos típicos de cargas impulsivas en donde no entraremos en detalle en este apartado.

3.2 ANALISIS ESTRUCTURAL DEL PUENTE

Se evalúa el comportamiento del puente frente a las cargas de impacto que se producen cuando un vehículo pasa por una sección que presenta un quiebre en la rasante del tablero. Para el análisis se realiza un modelo en SAP del puente y se presenta dos alternativas de cargas, el paso de un vehículo sin los efectos del quiebre de rasante y el paso de un vehículo con los efectos del quiebre en la rasante del tablero. Para representar los efectos del quiebre, el paso del bitren se presenta como una sucesión de fuerzas impulsivas proporcionales a la velocidad del vehículo, el ángulo de quiebre (θ) y los pesos de los ejes. El impacto producido por el paso del vehículo queda definido en tres funciones de impulsos. El quiebre produce un cambio en la dirección de la velocidad de circulación del vehículo en un diferencial de tiempo Δt , que da lugar a una componente vertical de velocidad produciendo un efecto adicional sobre el puente aumentando considerablemente los esfuerzos. En el impulso generado por el quiebre de la rasante sólo se considera la componente vertical, que es la más relevante, aunque también se produce una componente horizontal que finalmente no es importante a los fines prácticos.

Como el cambio de dirección se da en un tiempo muy pequeño, el efecto que este produce se asemeja a un impulso ideal, $F(t)$, que depende de la carga por eje M , la velocidad V y el ángulo de cambio de dirección θ (Figura 3.13).

El impulso generado por la fuerza dinámica $F(t)$ en un diferencial de tiempo se expresa de la siguiente manera:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \text{ (Ec. 15)}$$

Donde I corresponde al impulso; t_1 al tiempo inicial; t_2 al tiempo final; $F(t)$ es la fuerza externa; dt corresponde al diferencial de tiempo.

Dado que el impulso es igual al cambio de cantidad de movimiento, para pequeños ángulos se tiene que:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = MV\theta \text{ (Ec. 16)}$$

Siendo M las cargas por grupos de ejes; V la velocidad y θ el ángulo de variación de la pendiente.

Expresamos la aceleración de la forma siguiente:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V\theta}{\Delta t} \text{ (Ec. 17)}$$

a es la aceleración; ΔV variación de la velocidad; Δt la variación del tiempo; θ el ángulo de cambio de pendiente.

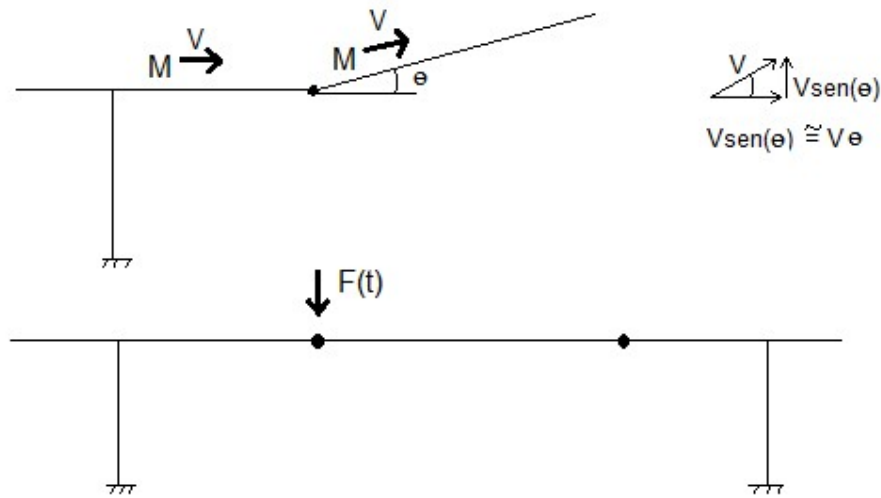


Figura 3.13. Se muestra un gráfico representativo del perfil longitudinal del puente, el vector velocidad V junto con la masa en movimiento M , el cambio de dirección de la velocidad θ y la fuerza dinámica en el punto analizado $F(t)$.

La historia de cargas $F(t)$ se define de manera simplificada mediante una variación triangular, dado que al ser una duración muy breve respecto al período natural del puente no importa la forma precisa de la variación sino el impulso total. El instante inicial 0 representa el ingreso del vehículo al puente, el máximo de la carga representa el instante en que el vehículo se encuentra al medio del vano del puente, y punto final t_D a la salida del vehículo (Figura 3.14).

Se define el impulso como el área debajo de la curva Fuerza-Tiempo (Figura 3.14) que en este caso corresponde con el área de un triángulo. Para determinar el valor pico de la fuerza dinámica, se considera la igualdad entre impulso y cambio de cantidad de movimiento:

$$I = MV\theta = \frac{\Delta t F_o}{2} \text{ (Ec. 19)}$$

Despejando la fuerza:

$$F_o = \frac{MV\theta^2}{\Delta t} \text{ (Ec. 20)}$$

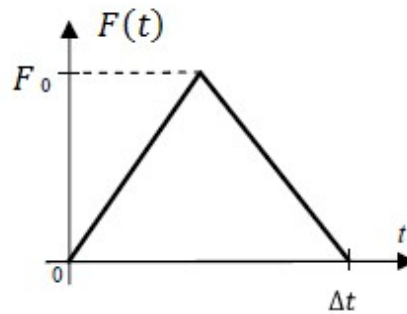


Figura 3.14. Muestra la variación de la carga en función del tiempo.

3.2.1 Fuerzas dinámicas

Las fuerzas definidas consideran tres ángulos de quiebre, con el objetivo de analizar su variación.

Se definen tres funciones y se proponen tres velocidades diferentes de circulación que se asemejan a las velocidades que tienen los vehículos en la actualidad.

Los ángulos utilizados corresponden a los distintos quiebres de rasantes considerados:

- $e = 0,02 = 2\%$
- $e = 0,04 = 4\%$
- $e = 0,06 = 6\%$

Las velocidades de circulación son:

- $V1 = 40 \text{ Km/h} = 11,1 \text{ m/s}$
- $V2 = 60 \text{ Km/h} = 16,7 \text{ m/s}$
- $V3 = 80 \text{ Km/h} = 22,2 \text{ m/s}$

La masa, necesaria para la definición de las fuerzas, varía en función de la composición del bitren:

- 1 eje simple con ruedas simples
- 1 eje tándem dual
- 2 ejes tridem con ruedas duales.

El análisis y la correspondencia de cada carga con su función se ilustran en la Figura 3.15.

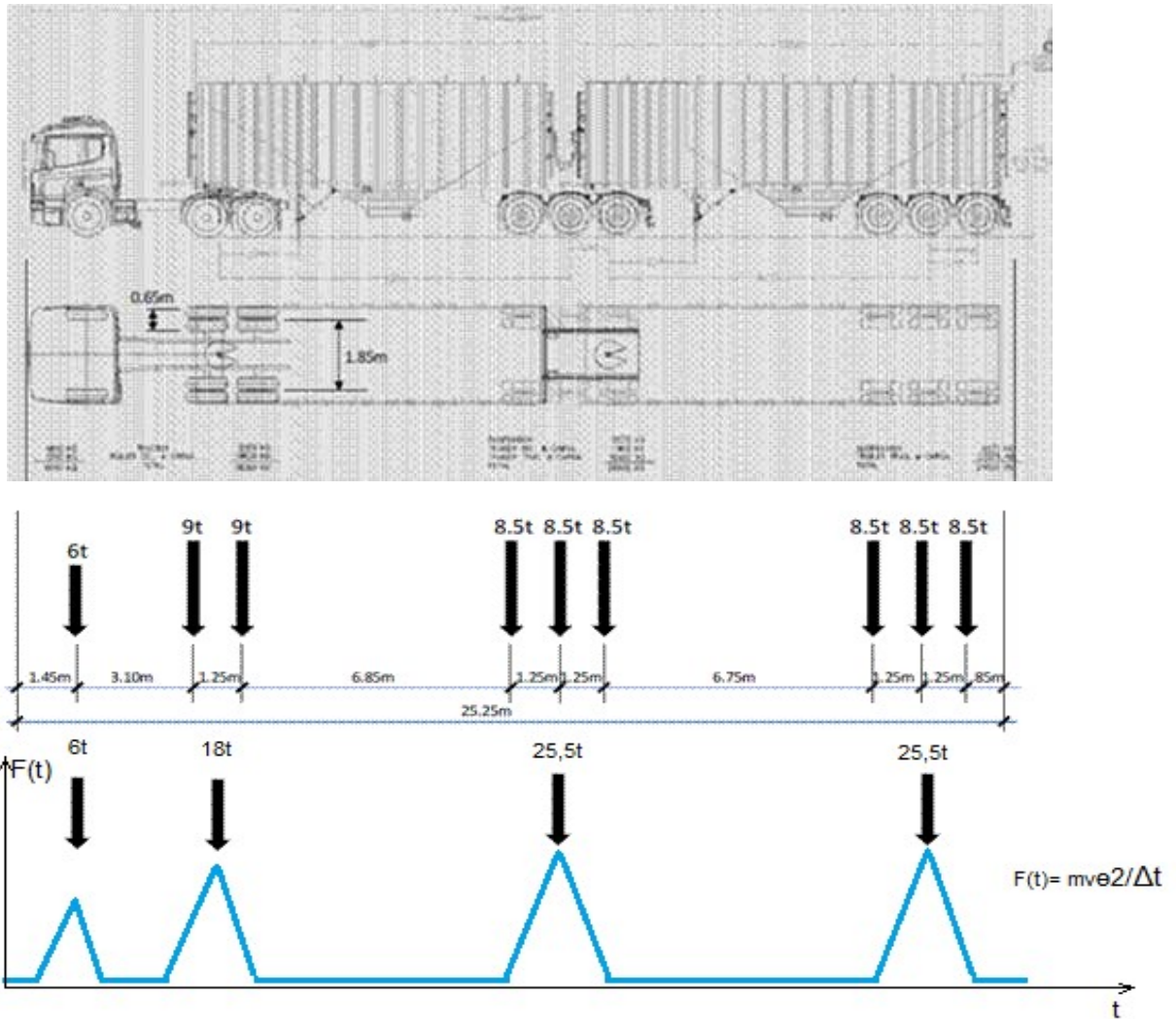


Figura 3.15. Composición de ejes y cargas de un bitrén, en correspondencia con cada función impulso que depende del peso de cada eje.

Las cargas para cada eje son:

- M1= 6tn (Eje simple)
- M2= 18tn (Eje tándem con ruedas duales)
- M3= 25,5tn (Eje tridem con ruedas duales)
- M4= 25,5tn (Eje tridem con ruedas duales)

Finalmente se define el tiempo de duración de la carga, donde se tiene en cuenta la cantidad de ejes que pasan, la distancia que los separan y la velocidad.

El tiempo t_1 corresponde al eje simple, t_2 al eje tándem y t_3 al eje tridem. Todos los valores se encuentran en el orden de la décima de segundo.

A mayor velocidad, menos será el tiempo de duración de la carga.

- $V_1 = 11,1 \text{ m/s}$ $t_1 = 0.06\text{s}$
 $t_2 = 0.1\text{s}$

$$t_3 = 0.2s$$

- $V_2 = 16,7 \text{ m/s}$

$$t_1 = 0.06s$$

$$t_2 = 0.07s$$

$$t_3 = 0.1s$$

- $V_3 = 22,2 \text{ m/s}$

$$t_1 = 0.04s$$

$$t_2 = 0.06s$$

$$t_3 = 0.1s$$

Con la definición de velocidad como:

$$v = \frac{d}{t} \text{ (Ec. 21)}$$

$$t = \frac{d}{v} \text{ (Ec. 22)}$$

Mediante la ecuación Ec. 22 se define el tiempo de recorrido del bitren.

Mediante una planilla de cálculo se definieron las funciones de carga a ser incorporadas en el modelo. En las siguientes tablas se detallan las funciones consideradas (Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4), las cuales se encuentran ilustradas en las Figuras 3.16, 3.17 y 3.18).

Datos de entrada:

$\theta =$	0,02
$v_1 \text{ (m/s)} =$	11,1
$v_2 \text{ (m/s)} =$	16,67
$v_3 \text{ (m/s)} =$	22,22
$M_1 \text{ (tn)} =$	6
$M_2 \text{ (tn)} =$	18
$M_3 \text{ (tn)} =$	25,5
$M_4 \text{ (tn)} =$	25,5

Tabla 3.1. Datos que se tienen en cuenta para la determinación de la fuerza dinámica $F(t)$, siendo v las distintas velocidades propuestas, M los pesos por ejes, y θ el ángulo de pendiente.

$v1 \text{ (m/s)} = 11.1$

t acum(s)	F(t)(tn)
0	0
5.360	0
5.405	3.014
5.450	0
5.730	0
5.786	7.234
5.842	0
6.459	0
6.572	5.124
6.685	0
7.293	0
7.405	5.124
7.518	0
14.950	0

Tabla 3.2. Muestra como varia la fuerza F(t) en toneladas función del tiempo, siendo t acum el tiempo acumulado en segundos, utilizando una velocidad de 11,1 m/s.

$v2 \text{ (m/s)} = 16.67$

tacum(s)	F(t)(tn)
0	0
3.569	0
3.599	6.799
3.629	0
3.815	0
3.853	16.316
3.890	0
4.301	0
4.376	11.557
4.451	0
4.856	0
4.931	11.557
5.006	0
9.955	0

Tabla 3.3. Muestra como varia la fuerza F(t) en toneladas función del tiempo, siendo "tacum" el tiempo acumulado en segundos, utilizando una velocidad de 16,67 m/s.

tacum(s)	F(t)(tn)
0	0
2.678	0
2.700	12.079
2.723	0
2.862	0
2.890	28.990
2.919	0
3.227	0
3.283	20.534
3.339	0
3.643	0
3.699	20.534
3.756	0
7.468	0

Tabla 3.4. Muestra como varia la fuerza F(t) en toneladas función del tiempo, siendo "tacum" el tiempo acumulado en segundos, utilizando una velocidad de 22,2 m/s.

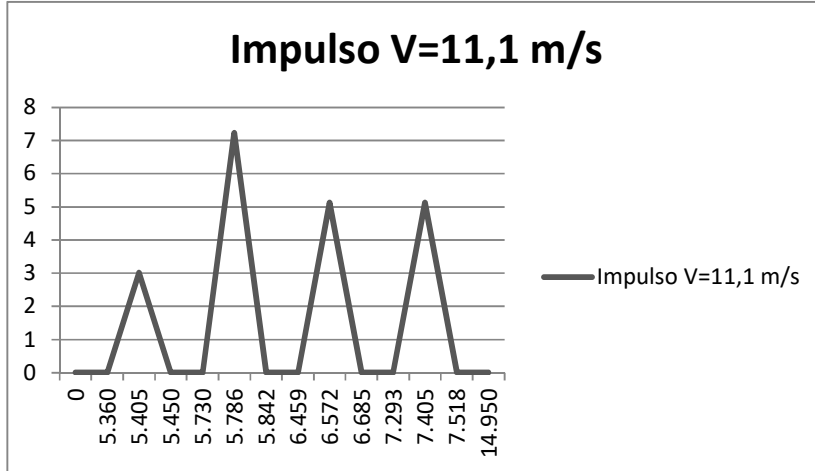


Figura 3.16. Muestra la función F(t) a una velocidad de 11,1 m/s.

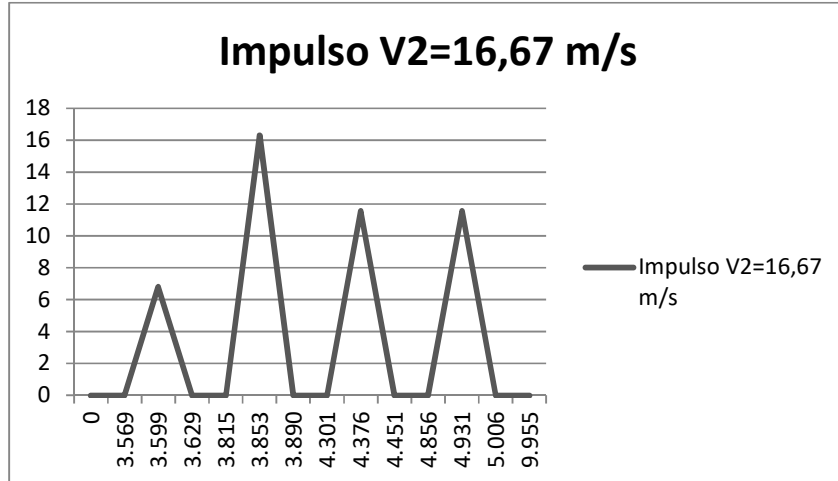


Figura 3.17. Muestra la función F(t) a una velocidad de 16,67 m/s.

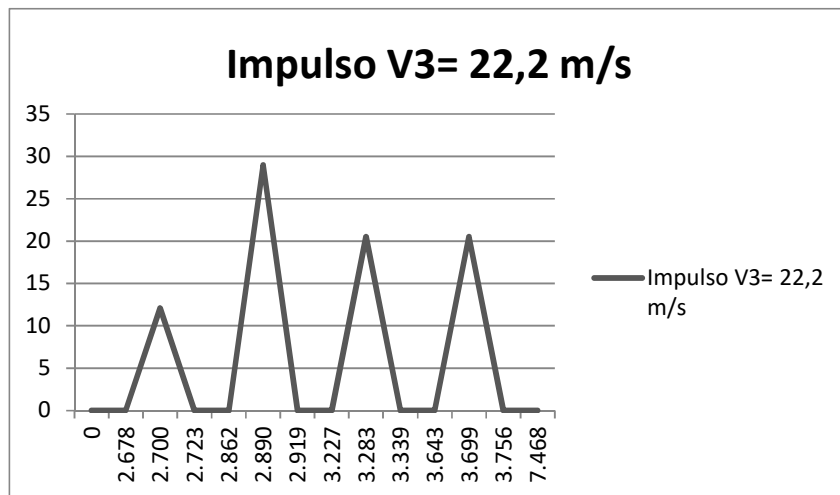


Figura 3.18. Muestra la función F(t) a una velocidad de 22,22 m/s.

4. MODELACION NUMERICA

Para elaborar el modelo computacional de la estructura se consideran sus propiedades materiales (como hormigón, acero, dimensiones, etc.), la configuración del vehículo (cargas por eje, separación entre ejes, etc.), y las variaciones en la rasante del tablero (con las funciones impulso).

Como todo modelo numérico, se trata de una abstracción de la realidad, pero que se construye para que produzca resultados con un grado de aproximación satisfactorio. Son muchas las posibles maneras de generar un modelo numérico que reproduzca el comportamiento de una estructura. Cada una de ellas tendrá un determinado grado de complejidad, que varía de acuerdo a múltiples factores y que es apropiado en diferentes circunstancias, de acuerdo con el nivel de precisión que se pretenda alcanzar y la flexibilidad existen numerosas formas de modelar la estructura, cada una de ellas con sus correspondientes ventajas y desventajas.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para la modelación del puente se tienen en cuenta varios factores. Las tensiones y deformaciones del tablero dependerán, por un lado, de los parámetros relacionados con su rigidez; es decir, de las características propias de la estructura, considerando las propiedades materiales del hormigón evaluadas in-situ y realizando una calibración final del modelo completo.

Por otro lado, se considera la naturaleza y configuración de las cargas a las que estará sometido.

Dentro sus características propias se establecen:

- Características mecánicas de los materiales empleados
- Características seccionales de los distintos elementos
- Conectividad entre los distintos elementos
- Condiciones de vínculo globales

El tramo de viga cajón de hormigón armado se representa mediante cuatro vigas con propiedades globales equivalentes, rigidizadas mediante elementos transversales. Estas barras, al igual que en el tramo isostático, se ubican en dos direcciones ortogonales interceptándose en ciertos puntos llamados “nodos”, obteniendo así un “emparrillado” que simula, de manera adecuada, el tablero de la estructura. De esta manera, se representa muy aproximadamente la forma de trabajo de todos los elementos.

El tramo isostático central ha sido representado mediante 7 vigas longitudinales y la losa de hormigón superior. Este tramo se encuentra articulado en los extremos. Las pilas han sido representadas mediante apoyos puntuales rígidos.

En la sección tipo Gerber las barras longitudinales están separadas 3m unas de otras, mientras que las barras transversales están ubicadas cada 10m aproximadamente.

El tramo metálico se compone por barras longitudinales separadas 1,5m y las barras transversales se ubican cada 2,25m.

Cada tramo está representado con las dimensiones reales de la estructura, que cuenta con 60 metros desde el primer apoyo hasta la unión con el tramo metálico, seguido del mismo que cuenta con 22,5 metros de longitud, y finalmente continúa con el tramo de hormigón

de 60 metros de largo. La longitud total de la estructura resulta entonces de 142,5 metros (Figura 4.1).

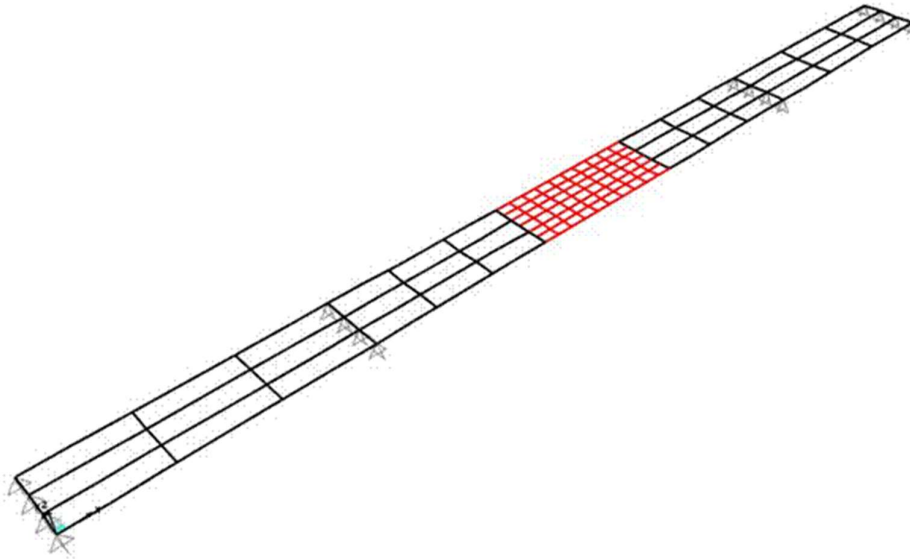


Figura 4.1. Vista general de modelo numérico dibujado en el programa SAP 2000, se compone de 3 tramos, dos tramos de hormigón que corresponden a las líneas en negro y el tramo metálico isostático representado en rojo.

4.2 PROCEDIMIENTO DE MODELACIÓN

Inicialmente, se detallan las unidades utilizadas. Para las longitudes la unidad correspondiente es “metros (m)”, para la fuerza, “toneladas (tn)”, y para la temperatura se designa el “grado Celsius (°C)”.

Las unidades restantes serán derivadas de estas tres unidades fundamentales. Luego, se realizan, ordenadamente, las siguientes determinaciones:

- Características de los materiales
- Secciones transversales de los elementos
- Construcción y ubicación de barras y nodos
- Asignación de las condiciones de vínculo
- Definición de los caminos.
- Definición de la configuración del vehículo
- Cargas y solicitaciones
- Determinación de las combinaciones de estados de carga
- Análisis del modelo

4.2.1 Características de los materiales

Se determinan los parámetros físicos relacionados con su comportamiento de deformaciones (relaciones constitutivas) frente a solicitaciones de diferente naturaleza. En el caso particular del puente analizado, todos los componentes estructurales son de hormigón armado con secciones cajón de altitud variable, a excepción de los componentes del tramo isostático que corresponden a perfiles “I”. Por lo tanto, se define las características seccionales en el programa.

Las vigas longitudinales de la sección Gerber se definieron como VL y un número correspondiente, mientras que las vigas transversales se definieron con VC, finalmente las vigas de acero se definieron como V10, que corresponden a la sección isostática.

Respecto las características del hormigón, se utiliza el módulo elástico obtenido gracias a los ensayos realizados que se detallan en el siguiente apartado.

En la Figura 4.2 se observan las características necesarias cargadas en el programa:

- Peso por Unidad de Volumen
- Unidades
- Módulo de Elasticidad (E)
- Módulo de Poisson (U)
- Coeficiente Térmico (A)
- Módulo de corte (G)
- Resistencia a la compresión máxima especificada (f_c)

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Hormigón

Material Type: Concrete

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2.4

Mass per Unit Volume: 0.2447

Units: Tonf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 3630000.

Poisson, U: 0.2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 1512500.

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 2812.2785

Expected Concrete Compressive Strength: 2812.2785

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 4.2. Muestra las propiedades del hormigón cargadas en el programa.

En la Figura 4.3 se determinan las características necesarias para definir el acero:

- Peso por Unidad de Volumen
- Unidades
- Módulo de Elasticidad (E)
- Módulo de Poisson (U)
- Coeficiente Térmico (A)
- Módulo de corte (G)
- Resistencia a la tracción (Fy)
- Resistencia a la tracción ultima (Fu)
- Resistencia a la tracción esperado (Fye)
- Resistencia a la tracción ultima esperada (Fue)

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Acero

Material Type: Steel

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.849

Mass per Unit Volume: 0.8004

Units: Tonf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 21000000.

Poisson, U: 0.3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 8076923.

Other Properties For Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 35153.48

Minimum Tensile Stress, Fu: 45699.53

Expected Yield Stress, Fye: 38668.83

Expected Tensile Stress, Fue: 50269.48

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 4.3. Muestra las propiedades del acero cargadas en el programa.

4.2.1.1 Modulo Elástico Instantáneo del Hormigón

El módulo del hormigón considerado en el análisis resulta $E = 363 \text{ t/cm}^2$. Se obtiene de calibrar del modelo numérico con los resultados de ensayos realizados en una visita al sitio de emplazamiento para un relevamiento visual de las condiciones de la estructura. Los ensayos se encuentran en el Anexo 1.

4.2.2 Características seccionales

Se define las características de cada sección con la opción “Define” seguida de la opción “Section Properties” en donde se puede encontrar las características vistas en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6. Nótese las denotaciones de las vigas transversales, longitudinales, y la losa. A modo de ejemplo se enseña las propiedades de una viga transversal VC1 en las Figuras 4.5 y 4.6.

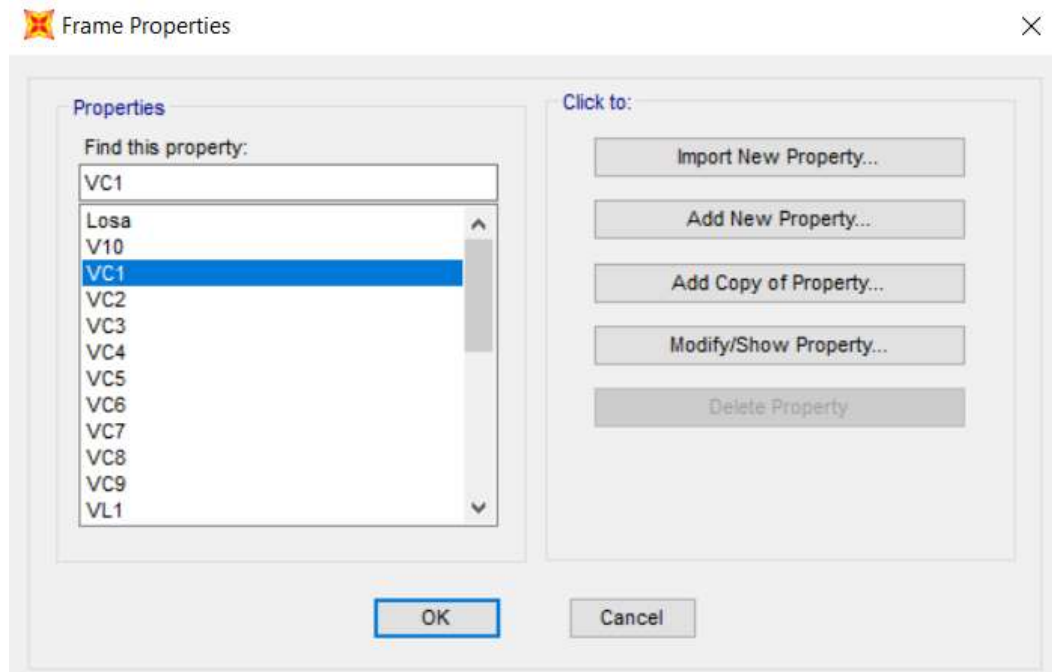


Figura 4.4. Propiedades de las secciones que componen la estructura, llamadas VC a las vigas transversales, VL a las longitudinales y V10 a las vigas de acero.

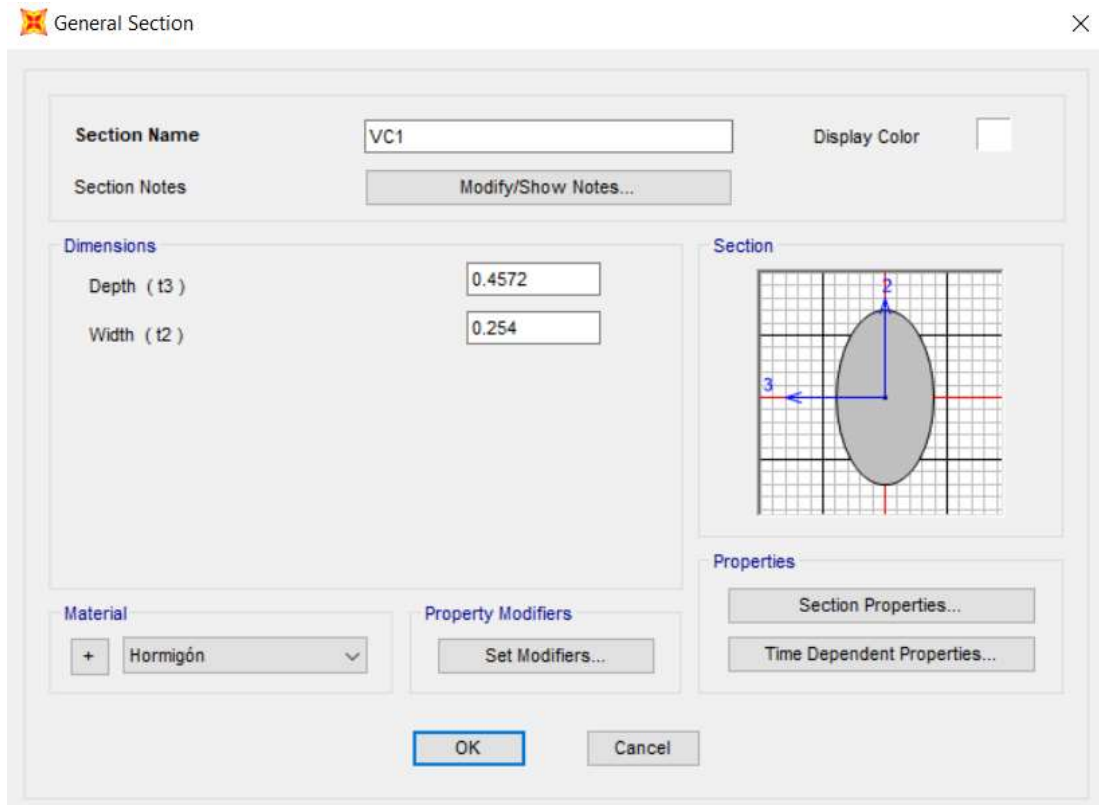


Figura 4.5. Propiedades generales de la sección.

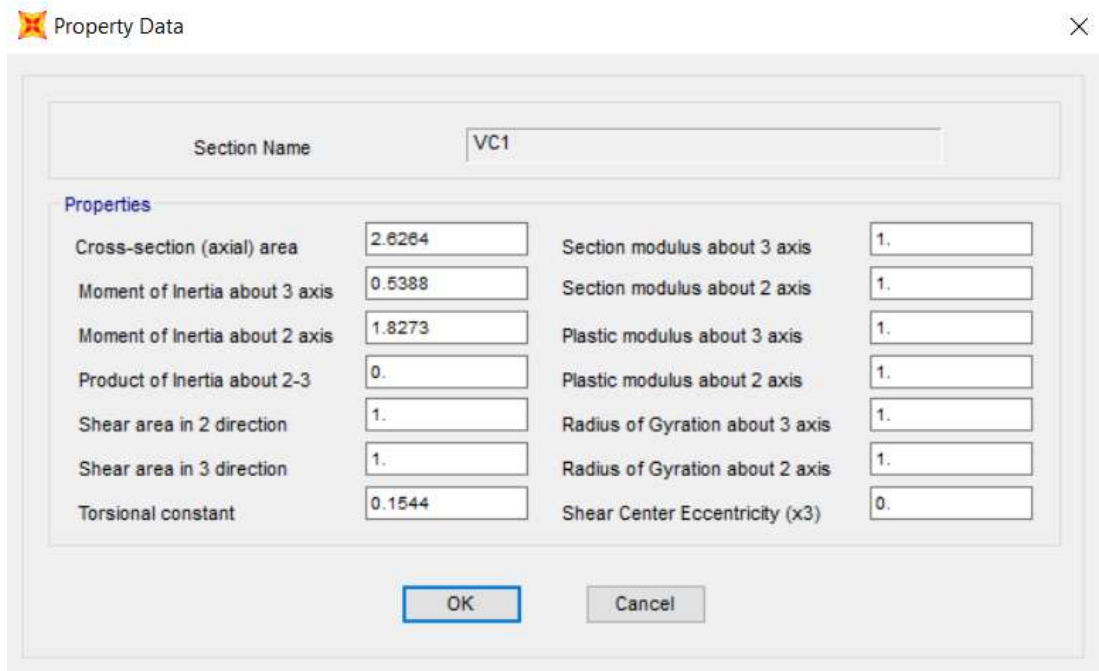


Figura 4.6. Propiedades más específicas de cada sección.

4.2.3 Ensamble de barras

Las barras longitudinales se definen según la coordenada X en el modelo. En la intersección de dos barras se define un punto denominado “nodo” (Figura 4.7), indicando que ese punto pertenece a ambas barras, por lo que los desplazamientos que sufra este serán idénticos para ambos elementos.

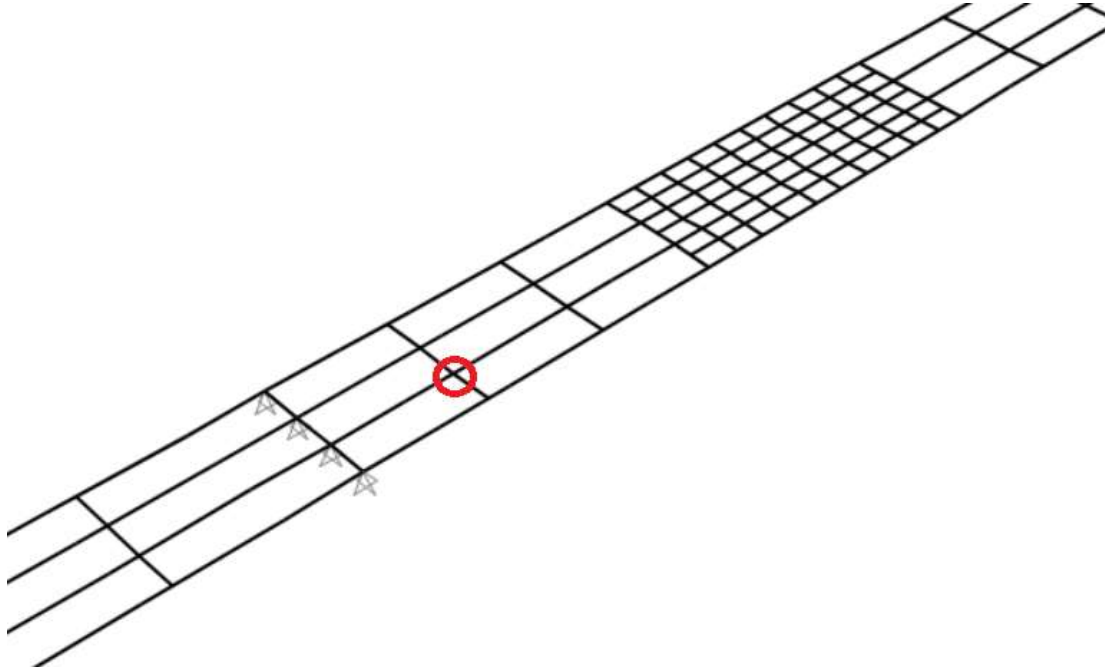


Figura 4.7. Unión entre dos barras.

4.2.4 Condiciones de vinculo

El tablero se encuentra sobre cuatro apoyos puntuales rígidos (Figuras 4.8 y 4.9) y en el tramo central hay 2 articulaciones (Figura 4.10).



Figura 4.8. Vista lateral de los apoyos del puente.

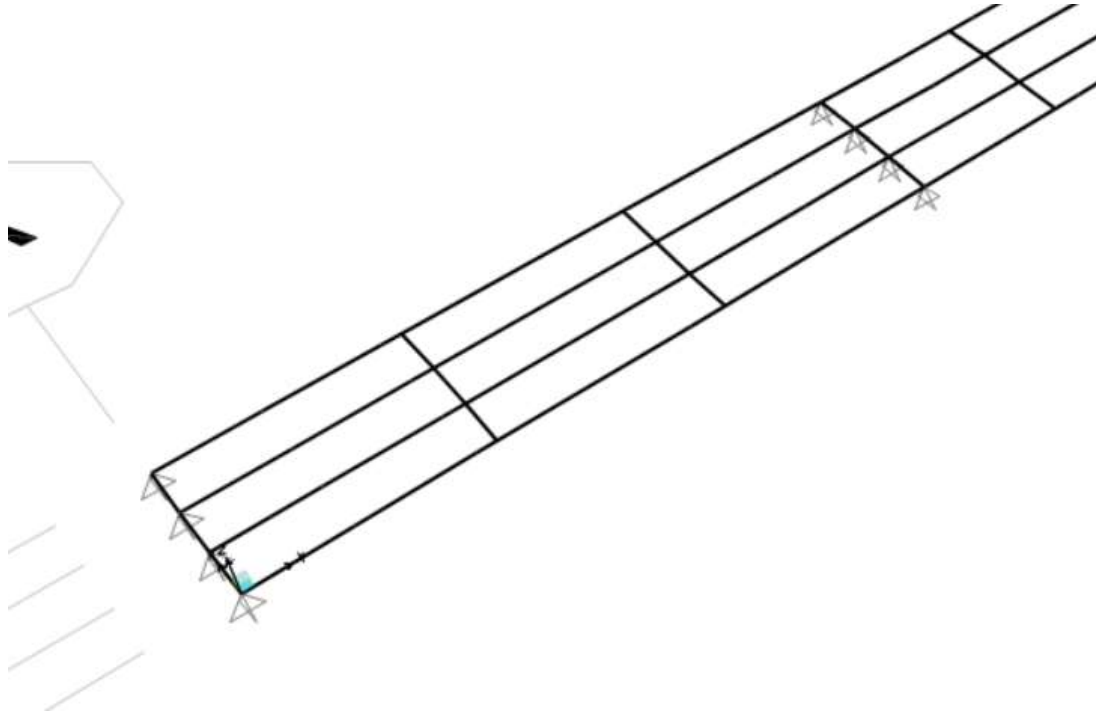


Figura 4.9. Vista de las condiciones de vínculo ubicadas en cada apoyo.



Figura 4.10. Vista lateral del puente, las articulaciones se destacan en rojo.

4.2.5 Definición de los caminos

Teniendo en cuenta que la estructura cuenta con dos trochas indivisas con la misma dirección de circulación, se definen dos caminos para determinar el paso de dos camiones en simultáneo, paralelamente, y a velocidades iguales. La herramienta que se utiliza se denomina "Paths" (caminos en inglés) (Figuras 4.11, 4.12 y 4.13).

Se selecciona el camino que recorrerá el vehículo en el modelo, mediante la selección de los tramos que corresponden al camino y la discretización que se requiera. En la Figura 4.14 se ilustran los caminos resaltados en color verde.

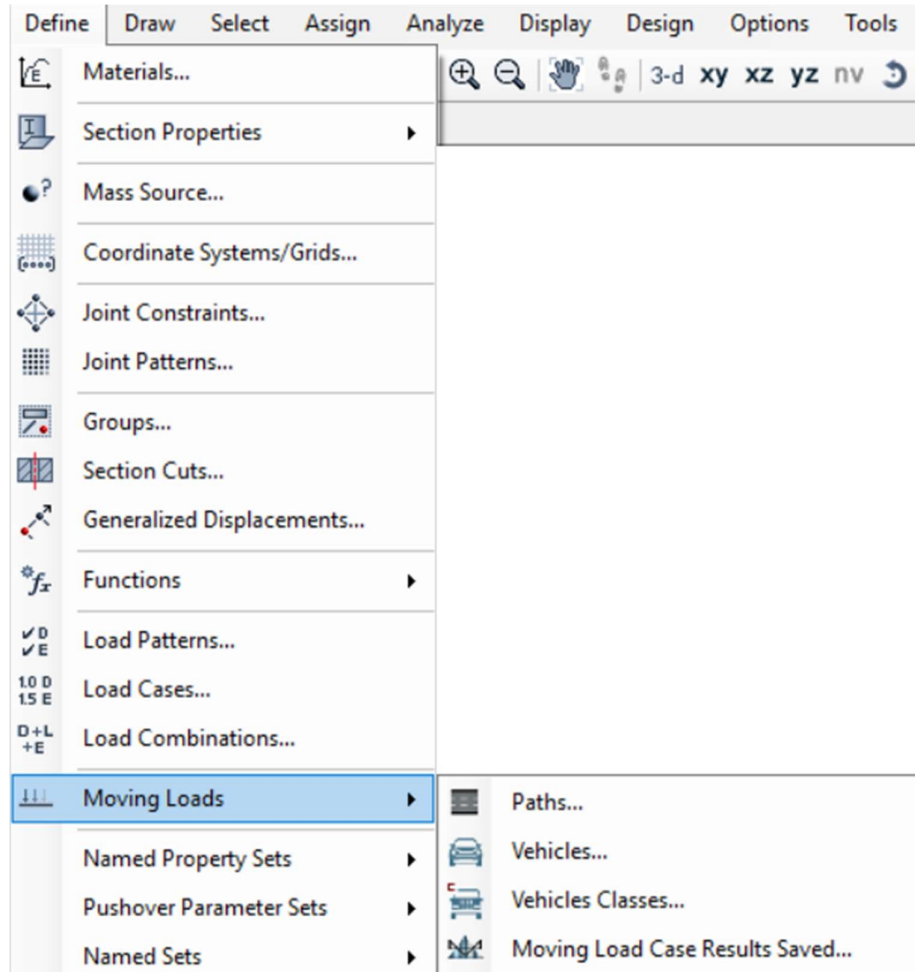


Figura 4.11. Imagen de la función Definición de caminos (Paths).

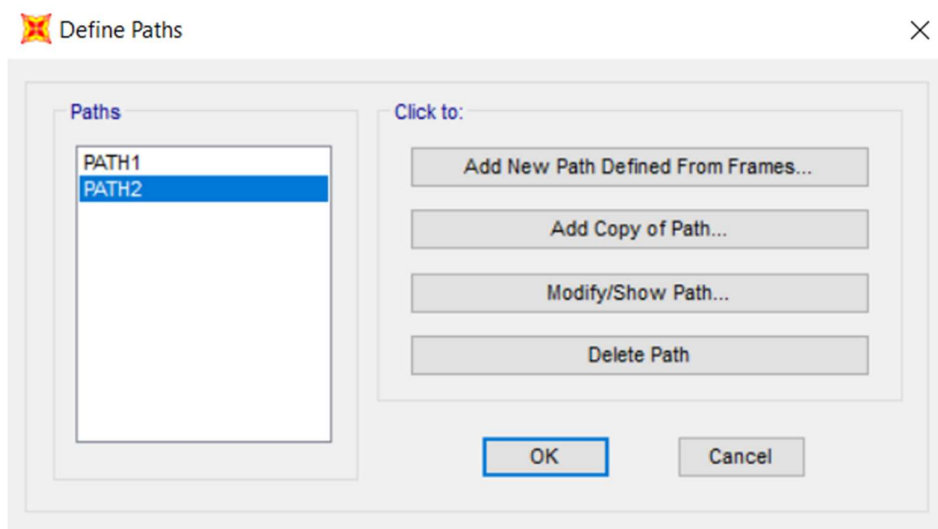


Figura 4.12. Los caminos definidos se llaman PATH1 y PATH2 correspondiendo uno a cada trocha.

Frame	Centerline Offset
31	0
31	0
32	0
39	0
33	0
34	0
35	0

Figura 4.13. Se muestra los datos que se deben ingresar para definir cada camino, secciones, discretización y desplazamiento de la línea central.

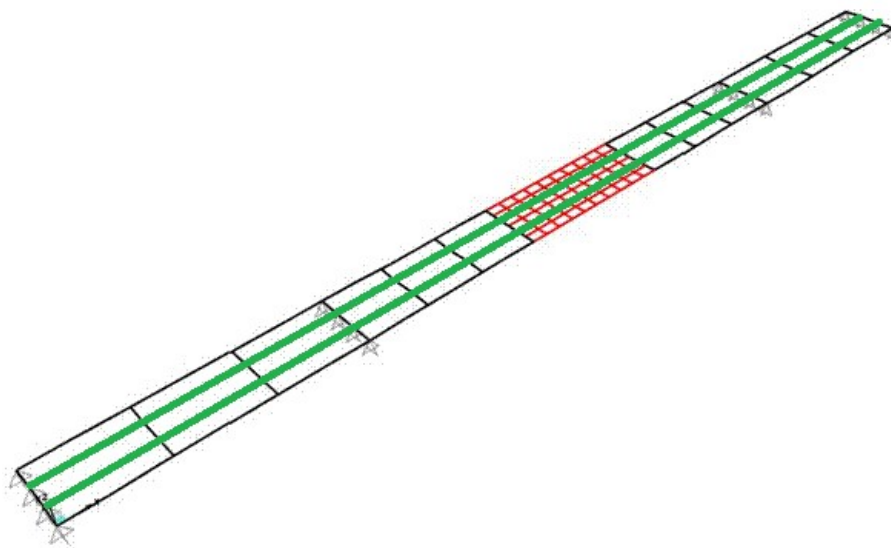


Figura 4.14. Vista general de modelo numérico y los caminos definidos en el programa.

4.2.6 Configuración del vehículo

Para definir el tipo de vehículo a utilizar en el modelo, se deberá cargar la configuración del bitren de 75 tn en el programa utilizando la herramienta “Define Vehicle” (Definir Vehículo) en donde se definen las características del bitren. En el presente caso se denominó al vehículo BITREN75 (Figura 4.15) y se colocaron las características necesarias para definir su configuración de cargas por eje. En la Figura 4.16 se muestra el nombre del vehículo, las unidades utilizadas, y las características referidas a las cargas que serán, el tipo de carga, la separación entre ellas, y los pesos dependiendo de si es carga uniformemente distribuida (tn/m) o si son cargas puntuales (tn). Nótese que en el presente trabajo se utilizan solo cargas puntuales.

Esta definición de cargas sólo considera la acción del bitren debido al peso propio, mientras que los efectos dinámicos por quiebre de rasante son considerados de manera independiente.

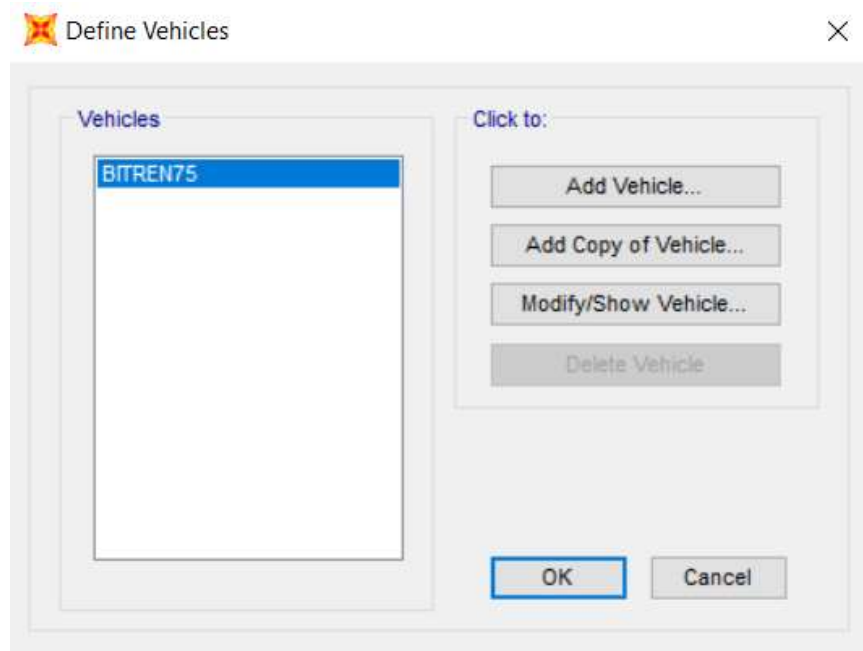
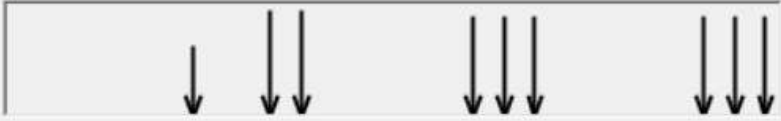


Figura 4.15. Definición del tipo de vehículo.

Vehicle Data ×

Vehicle name: BITREN75 Units: Tonf, m, C

Load Elevation



Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Leading Load	infinite		0.	6.
Leading Load	infinite		0.	6.
Fixed Length	3.1		0.	9.
Fixed Length	1.25		0.	9.
Fixed Length	6.85		0.	8.5
Fixed Length	1.25		0.	8.5
Fixed Length	1.25		0.	8.5
Fixed Length	6.75		0.	8.5

Vehicle Remains Fully In Path

Figura 4.16. Datos del vehículo.

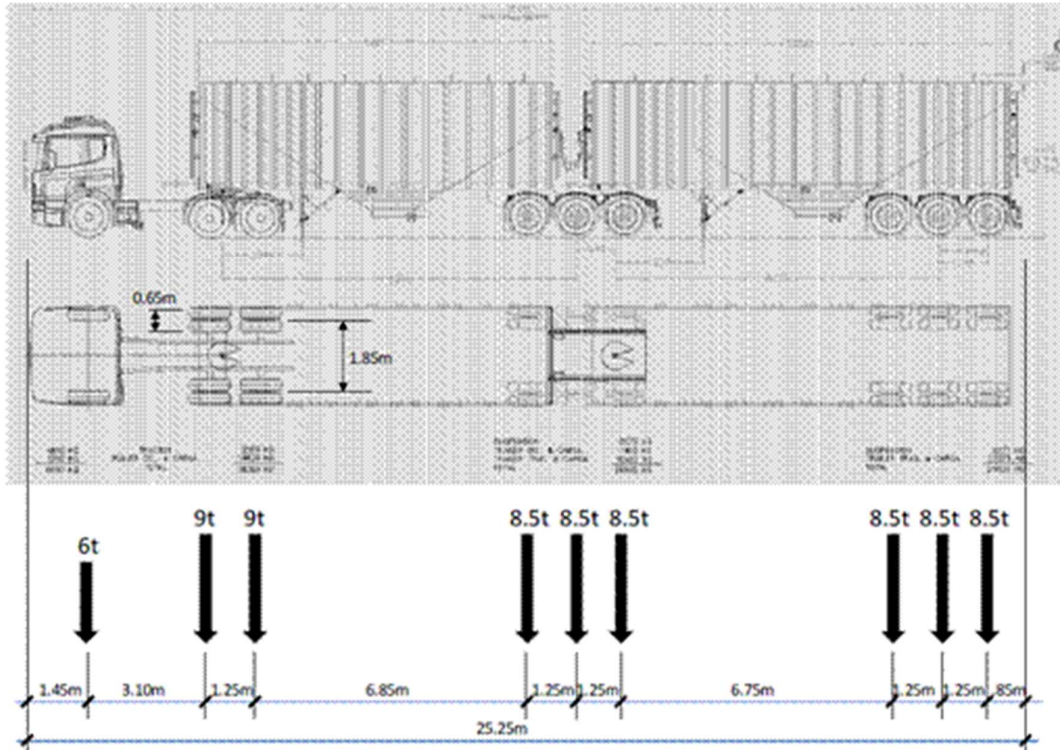


Figura 4.17. Modelo bitren 75 tn.

4.2.7 Cargas y solicitaciones

4.2.7.1 Patrón de carga

Para definir cada tipo de acción se define un “Patrón de Carga” (Load Pattern), que permite caracterizar cada tipo de carga, para luego generar diferentes combinaciones.

En este caso se designa “Bitren sin quiebre”, “Bitren sin quiebre 1” y “Bitren sin quiebre 2” a las cargas sin efectos dinámicos. Se designa “Bitren con quiebre”, “Bitren con quiebre 1” y “Bitren con quiebre 2” a las cargas vivas que representan los bitrenes con efectos dinámicos (Figura 4.18). Nótese que en la definición de las cargas dinámicas deberá introducirse algunos datos adicionales (Figura 4.19):

- Vehículo, indica la composición de vehículo bitren de 75 tn ya cargado.
- Definición de los caminos, Path 1 y Path 2, por donde circulara el vehículo.
- Distancia inicial.
- Tiempo inicial.
- Dirección de circulación del vehículo, en este caso “Forward” (hacia adelante, de izquierda a derecha).
- Velocidad de circulación.
- Duración de aplicación de carga y la discretización.
- Unidades.

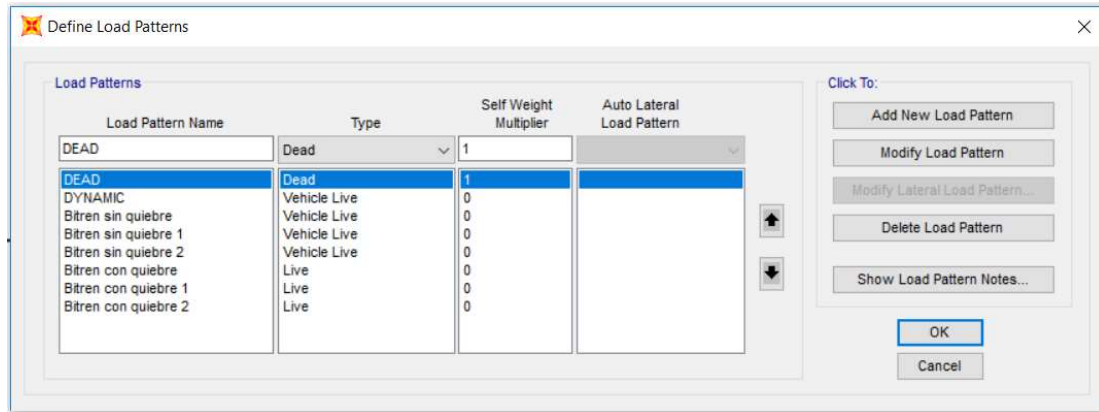


Figura 4.18. Se muestra Load Pattern Name (nombre del patrón de carga), Type (tipo de carga), Self Weight Multiplier (multiplicador de peso propio de la carga).

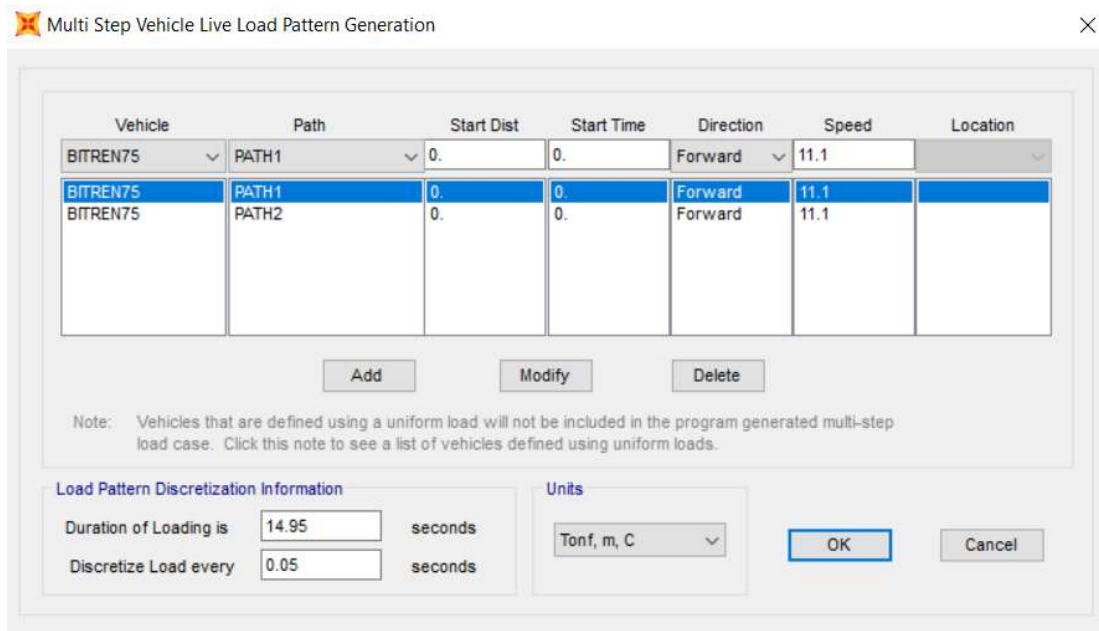


Figura 4.19. Patrón de carga con efectos dinámicos.

4.2.7.2 Funciones

Se definen fuerzas puntuales (Figura 4.20) a las cuales se les asigna el comportamiento del impacto que se produce cuando pasa el vehículo por el quiebre.

Por lo tanto, se asocia cada función impulso definida en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4. a las fuerzas puntuales, para que adquieran el comportamiento de fuerzas dinámicas sobre el puente. Así, las fuerzas puntuales se comportan de acuerdo a las funciones asociadas. Para tener en cuenta la variación del ángulo θ se multiplican las cargas puntuales por 2 y por 3 ya que son directamente proporcionales a las fuerzas.

En la Figura 4.21 se encuentra la fuerza asociada al ángulo $\theta = 0,02$ rad y se le asigna una fuerza unitaria de -1 tn.

En la Figura 4.22 se encuentra la fuerza asociada al ángulo $\theta = 0,04$ rad, por lo tanto se le asigna una fuerza unitaria de -2 tn para tener en cuenta que $\theta = 0,02 * 2 = 0.04$ rad.

En la Figura 4.23 se encuentra la fuerza asociada al ángulo $\theta = 0,06$ rad, por lo tanto se le asigna una fuerza unitaria de -3 tn para tener en cuenta que $\theta = 0,02 * 3 = 0.06$ rad.

Las funciones de las fuerzas impulsivas en el programa se designan "Impulso", "Impulso 1" e "Impulso 2", y corresponden a velocidades $v1=11,1\text{m/s}$, $v2=16,67\text{m/s}$ y $v3=22,2\text{ m/s}$ respectivamente. Para definir las funciones en el programa, se selecciona la opción "Define", seguidamente de "Functions" y por último el tipo de función a definir, en este caso, "Time History" para poder colocar su historia fuerzas en el tiempo (Figura 4.24, 4.25, 4.26). Se colocan las magnitudes que adquieren las fuerzas en un tiempo determinado, que dependen de la configuración del bitren y la distancia que deberá recorrer hasta llegar al punto de quiebre.

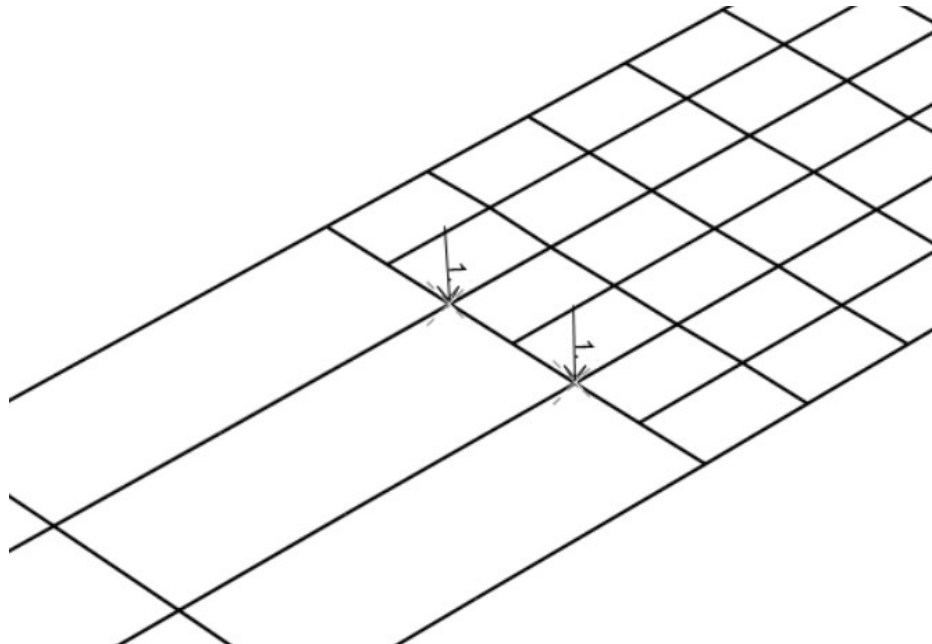


Figura 4.20. Ilustración de las cargas puntuales en la sección con desnivel.

Assign Joint Forces

General

Load Pattern: Bitren con quiebre

Coordinate System: GLOBAL

Forces

Force Global X: 0 tonf

Force Global Y: 0 tonf

Force Global Z: -1 tonf

Moment about Global X: 0 tonf-m

Moment about Global Y: 0 tonf-m

Moment about Global Z: 0 tonf-m

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Figura 4.21. Fuerzas asignadas a un punto para un análisis del ángulo $\theta = 0,02$.

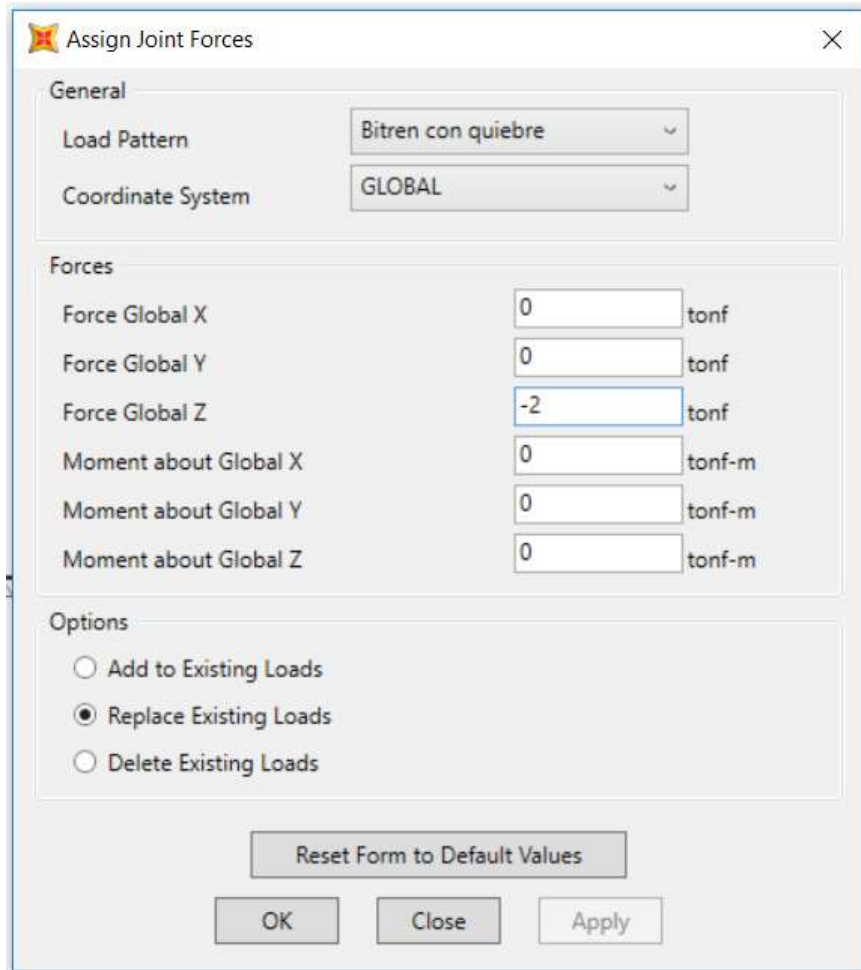


Figura 4.22. Fuerzas asignadas a un punto para un análisis del ángulo $\theta = 0,04$.

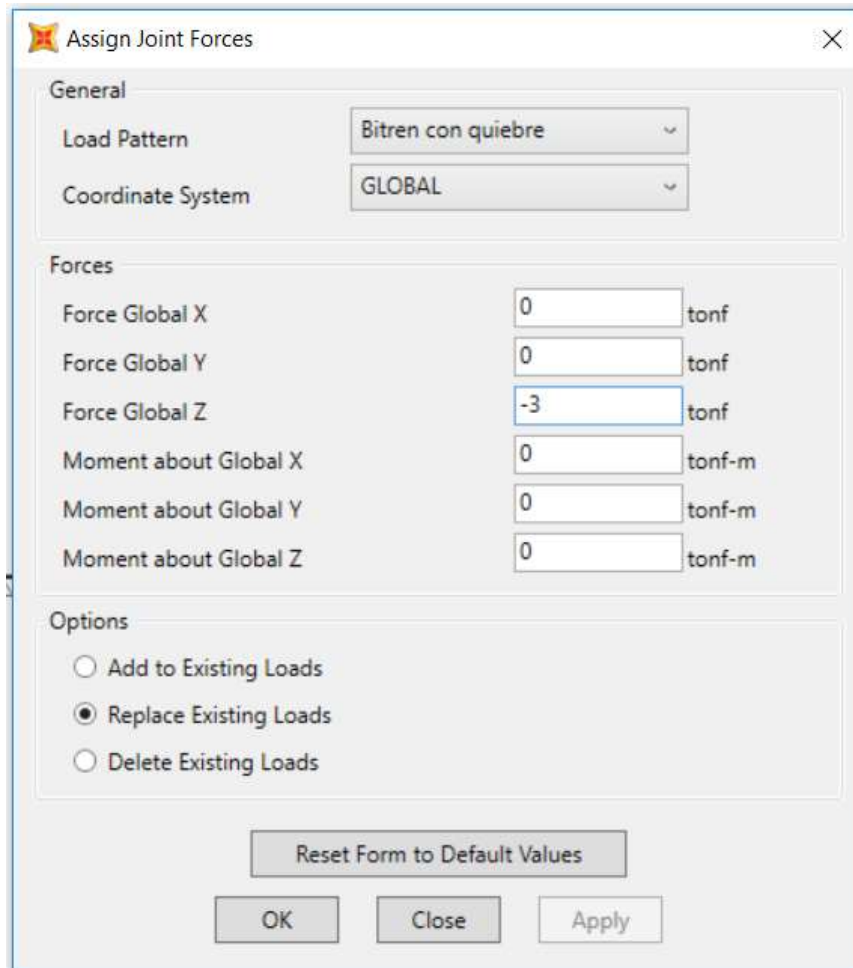


Figura 4.23. Fuerzas asignadas a un punto para un análisis del ángulo $\theta = 0,06$.

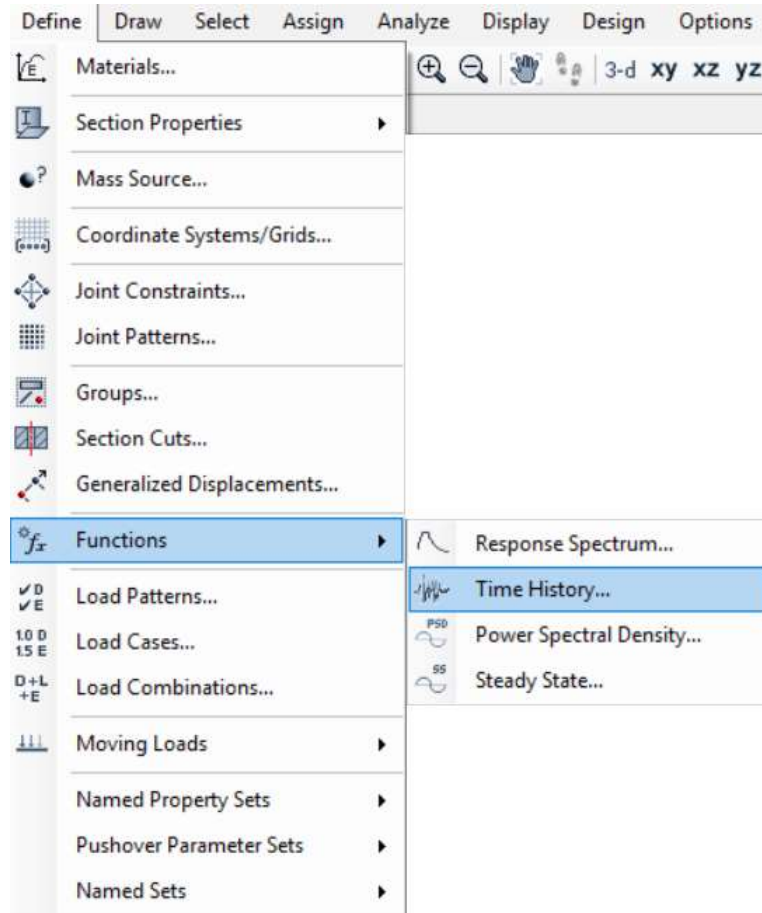


Figura 4.24. Definición de la función en el SAP.

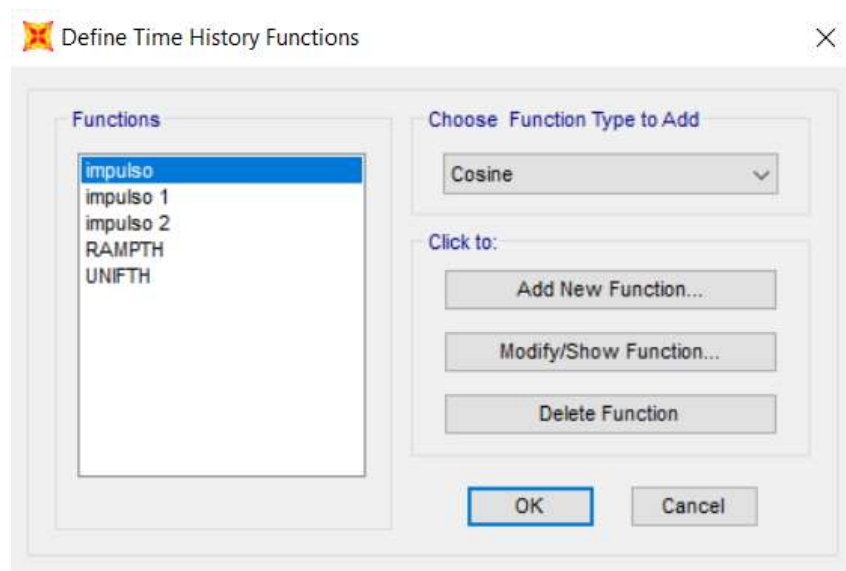


Figura 4.25. Muestra las funciones cargadas impulso, impulso 1 e impulso 2, cada una corresponde a la velocidad $v_1= 11,1$ m/s, $v_2= 16,67$ m/s y $v_3= 22,2$ m/s respectivamente.

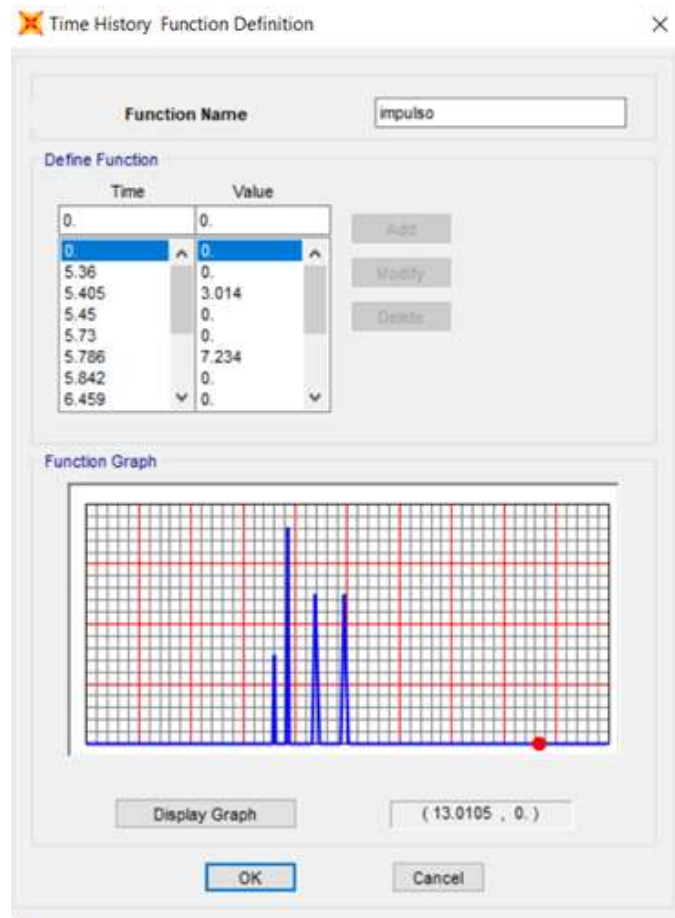


Figura 4.26. Definición de la función variable con el tiempo, que depende de las distancias que recorre el bitren, la velocidad adquirida y la carga por eje.

4.2.7.3 Casos de Carga

En el caso de cargas dinámicas se debe generar una función representativa de la carga impulsiva que se quiere modelar, definirla en el programa y realizar un análisis lineal con integración directa. Para realizar este análisis es necesario definir “Casos de carga” (Load Cases), y seleccionar las características de análisis que se desea para cada carga.

En la Figura 4.27 se puede ver los diferentes Casos de Carga con integración directa. Se aplican las características de las cargas aplicadas. Se incluye la función, nombre de la carga, y un factor de escala que es igual a la unidad (Figura 4.28).

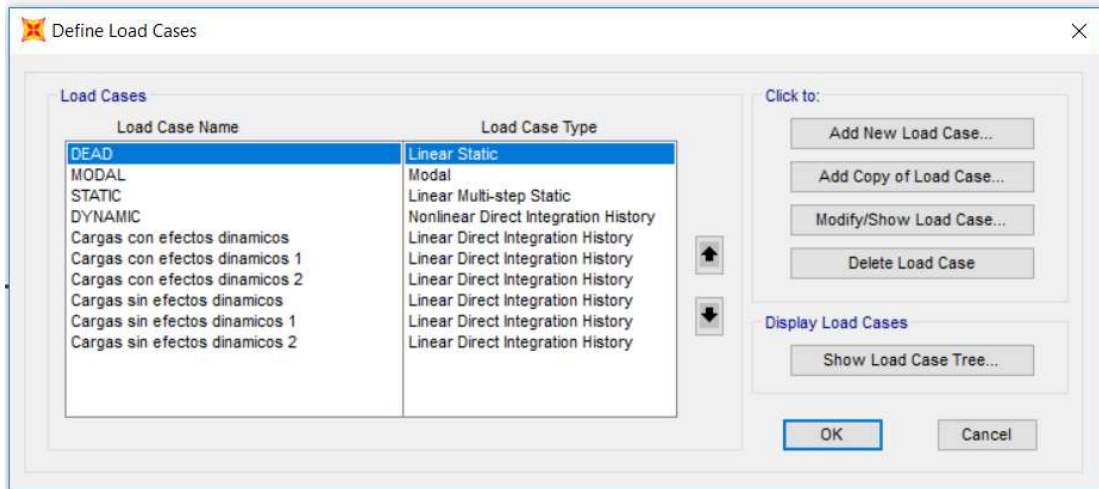


Figura 4.27. Definición de los Casos de Carga.

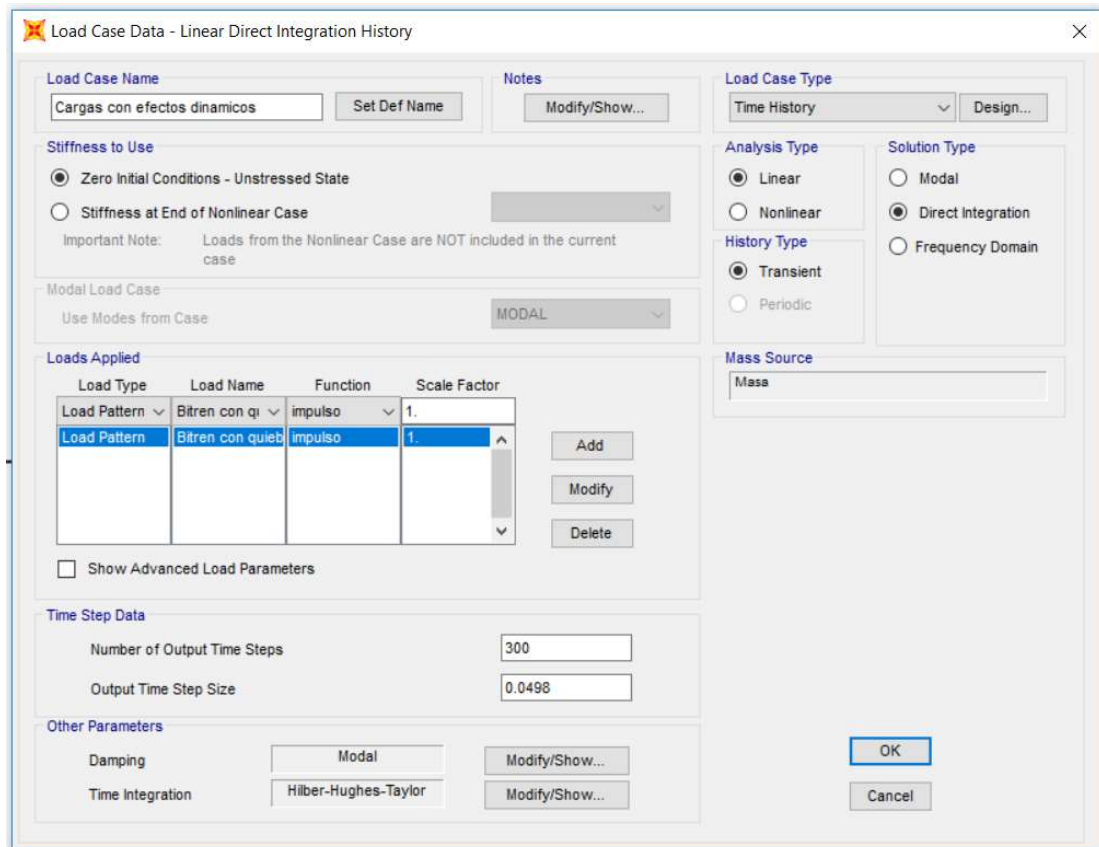


Figura 4.28. Datos de los Casos de Carga.

4.2.8 Combinaciones de carga

Se simula la circulación de las dos cargas conjuntas, en donde coexisten uno o más "Load Patterns", lo que permite suponer diferentes acciones y se evalúan los diferentes efectos en forma simultánea.

Se definen tres combinaciones de carga, llamadas $v=11$, $v=16,7$ y $v=22,2$. Cada una presenta características correspondientes a la velocidad de análisis y vehículos (en m/s). Se analiza entonces el efecto de las cargas por separado y luego las combinaciones de carga para comparar los resultados de análisis obtenidos.

La Combinación de Carga $v=11,1$ incluye los siguientes Estados de Cargas que corresponden con el vehículo pasando a una velocidad de 11,1 m/s (Figura 4.29):

- > Cargas con efectos dinámicos
- > Cargas sin efectos dinámicos

Todas las cargas tendrán un factor de escala de 1.

La Combinación de Carga $v=16,67$ incluye las siguientes cargas que corresponden con el vehículo pasando a una velocidad de 16,67 m/s (Figura 4.30):

- > Cargas con efectos dinámicos 1
- > Cargas sin efectos dinámicos 1

Finalmente, la Combinación de Carga $v=22,2$ incluye las siguientes cargas que corresponden con el vehículo pasando a una velocidad de 22,2 m/s (Figura 4.31):

- > Cargas con efectos dinámicos 2
- > Cargas sin efectos dinámicos 2

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
Cargas con efectos dinamic	Linear Direct Integration	1.
Cargas con efectos dinamicos	Linear Direct Integration History	1.
Cargas sin efectos dinamicos	Linear Direct Integration History	1.

Figura 4.29. Datos de la Combinación de carga v=11,1

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated) v=16,67

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
Cargas con efectos dinamic	Linear Direct Integration	1.
Cargas con efectos dinamicos	Linear Direct Integration History	1.
Cargas sin efectos dinamicos 1	Linear Direct Integration History	1.

Add
Modify
Delete

OK Cancel

Figura 4.30. Datos de la Combinación de carga v=16,67

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
Cargas con efectos dinamic	Linear Direct Integration	1.
Cargas con efectos dinamicos 2	Linear Direct Integration History	1.
Cargas sin efectos dinamicos 2	Linear Direct Integration History	1.

Figura 4.31. Datos de la Combinación de carga v=22,2

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de concluir la modelación del puente, se realiza el análisis de resultados ejecutando el programa. El mismo arroja información muy extensa, por lo que solo se utilizarán los resultados de interés al proyecto, que es evaluar los esfuerzos de corte y momento, y las deformaciones de la estructura bajo las cargas actuantes propuestas. Se extrae la información referente al momento, corte y desplazamiento en las secciones críticas presentadas, donde se supone que se obtendrán los mayores valores.

Se consideran combinaciones de carga nominales; es decir, sin factores de mayoración para los estados básicos. Se establece una relación entre las solicitaciones con efectos dinámicos y las solicitaciones sin efectos dinámicos con el fin de visualizar el incremento producido en los esfuerzos por el quiebre de rasante.

En tablas se resumen los resultados obtenidos para cada ángulo de quiebre de rasante seleccionado (θ) y se comparan los esfuerzos de momentos negativos (M (-)), Corte (V) y se hace la relación entre los resultados en los distintos estados de carga.

5.1 SECCIONES ANALIZADAS

Mediante un análisis de líneas de influencia, se determinaron las posiciones más desfavorables de la sobrecarga móvil de bitren para cada una de las secciones críticas mencionadas y esfuerzos considerados en el punto anterior.

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran en vista y planta las distintas posiciones críticas encontradas para esfuerzos de flexión y corte en las secciones a verificar. Finalmente, en la Figura 5.3 se muestran las secciones elegidas en una vista 3D.

- Momento negativo en pila (Figura 5.1)
- Corte en pila (Figura 5.1)
- Momento en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico (Figura 5.2)
- Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico (Figura 5.2)

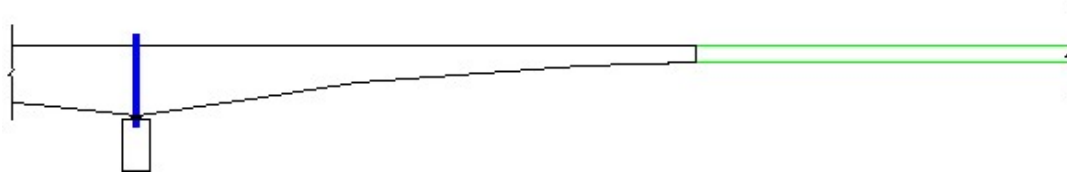


Figura 5.1. Ubicación para máximo momento flector negativo (en azul) – Primer apoyo intermedio (vista)

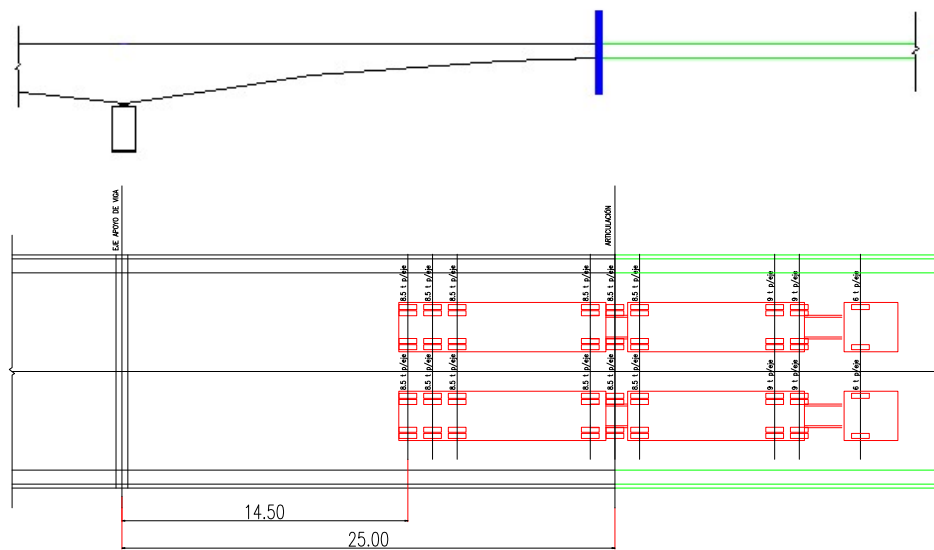


Figura 5.2. Ubicación para corte negativo (en azul) – en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico (vista)

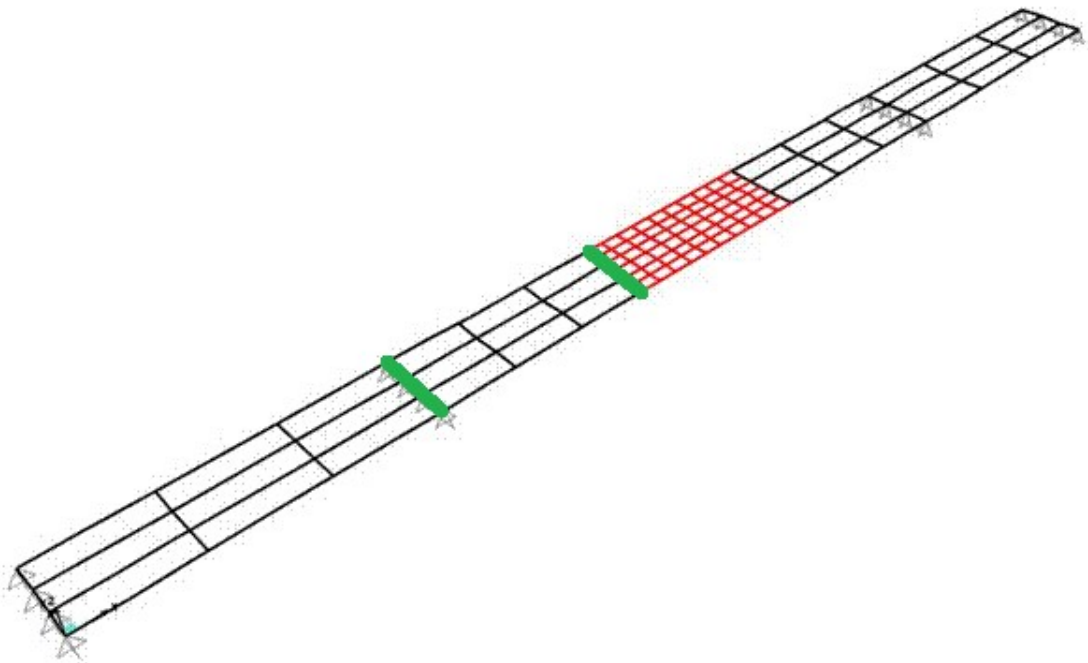


Figura 5.3. Se muestran en color verde las secciones de análisis de esfuerzos finales, siendo las mismas los lugares donde se producen los máximos esfuerzos.

5.2 RESULTADOS DE ANALISIS

Se pueden visualizar los resultados obtenidos con la herramienta “Display Frame Forces” (visualizar fuerzas en los tramos) (Figura 5.4 y 5.5).

En esta opción se puede ver las fuerzas obtenidas de cada Caso de Carga incluyendo las Combinaciones de Cargas. Para cada una se tienen múltiples opciones de visualización de datos y diagramas, como las preferencias de los valores presentados, envolventes de máximos y mínimos o por cada paso, esfuerzos o tensiones. En caso de seleccionar la opción para visualizar fuerzas, se debe seleccionar las componentes necesarias, momento, corte, torsión y axial, todas en sus múltiples ejes. Por último, se puede elegir si mostrar el diagrama o mostrar también los valores.

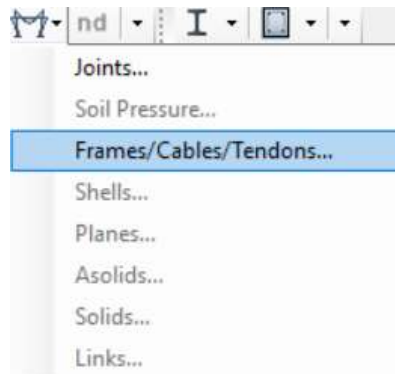


Figura 5.4. Muestra la opción “Display Frame Forces” en el programa.

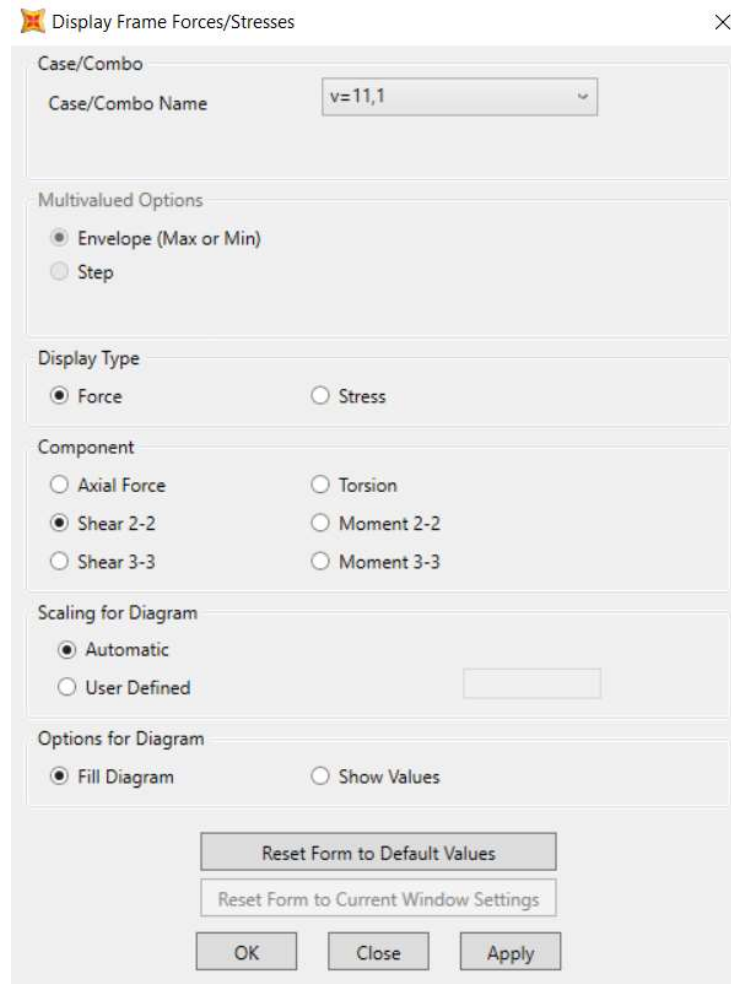


Figura 5.5. Muestra las múltiples opciones que presenta el programa para la visualización de esfuerzos para una Combinación de Carga de $v=11,1$.

Una vez seleccionadas las opciones de visualización, se obtienen los diagramas de corte y momento para toda la estructura. Puede observarse que cada sección de viga posee un valor de esfuerzo al cual está siendo sometido. Se muestra en la Figura 5.6 los diagramas por sección seleccionada de la viga VC6, y los valores de corte y momento máximos.

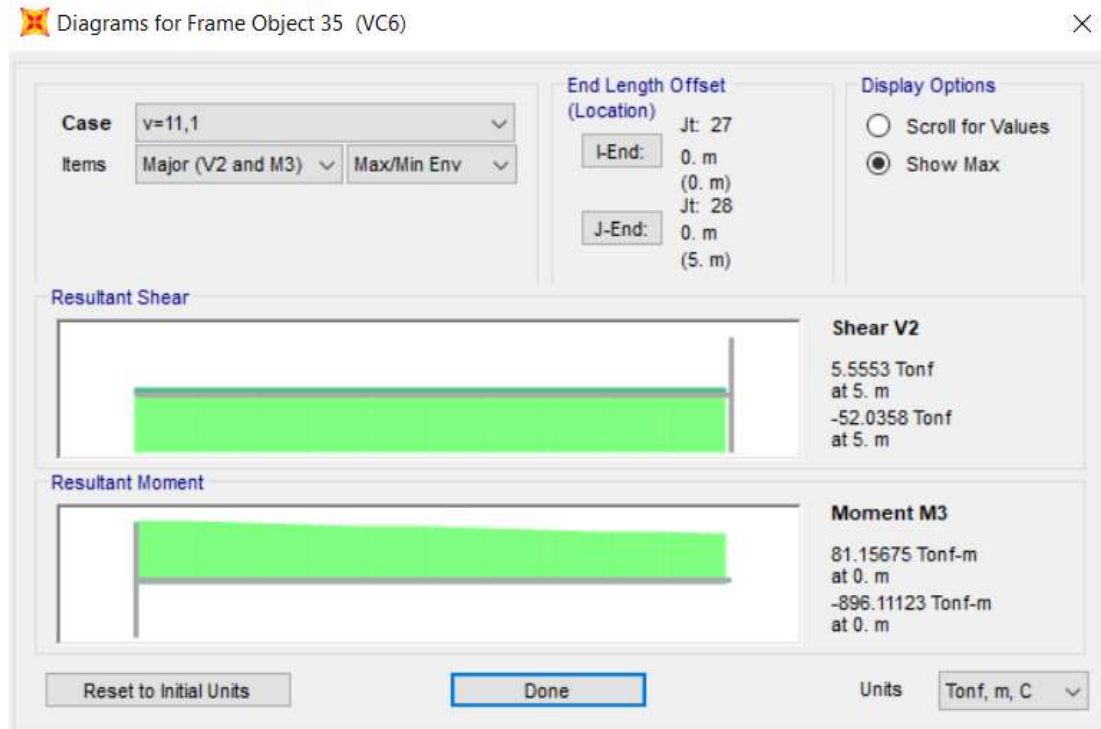


Figura 5.6. Visualización del diagrama de una viga (Objeto 35, viga VC6) para la Combinación de Carga v=11,1 y su momento y corte máximos.

5.2.1 Diagramas Obtenidos

Se obtienen diagramas debido a las distintas sollicitaciones de carga, y se compara cada uno de ellos.

Las Figuras 5.7 y 5.8 muestran la deformada de la estructura sometida a los efectos de cargas dinámicas más las cargas sin efectos dinámicos. Las Figuras 5.9 a la 5.26 muestran los diagramas obtenidos de las distintas cargas analizadas.

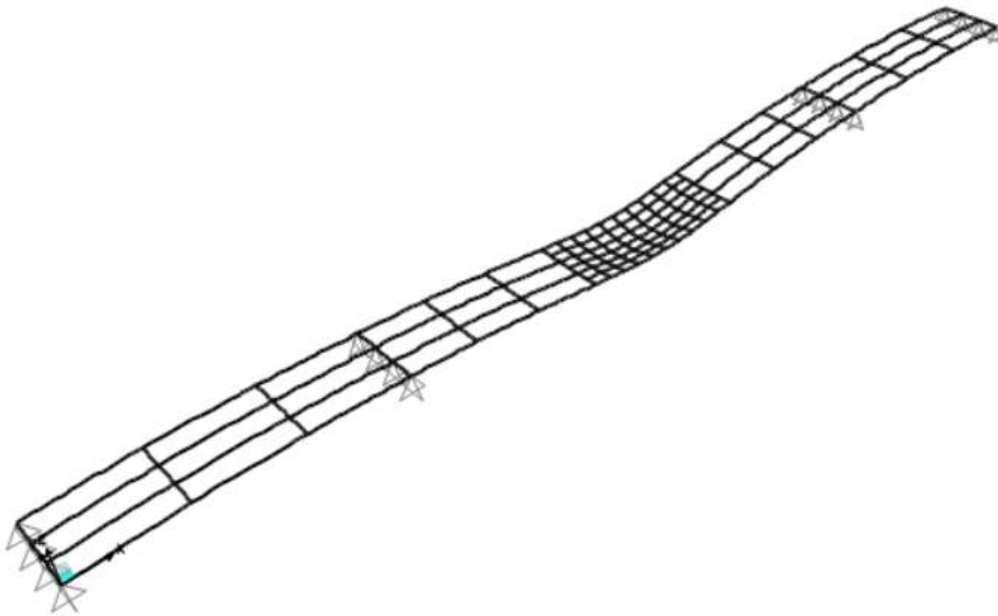


Figura 5.7. Deformada de la estructura sometida a la Combinación de Cargas $v=11,1$ vista en 3D.



Figura 5.8. Deformada de la estructura sometida a la Combinación de Cargas $v=11,1$ vista lateralmente.

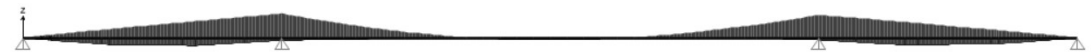


Figura 5.9. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=11,1$

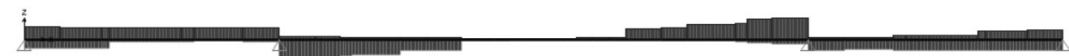


Figura 5.10. Diagrama de la envolvente de Corte máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=11,1$



Figura 5.11. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de $11,1$ m/s.

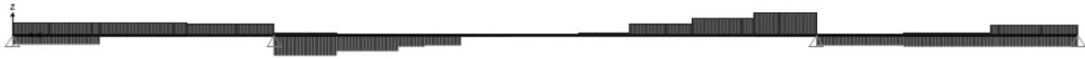


Figura 5.12. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de 11,1 m/s.

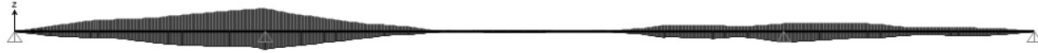


Figura 5.13. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de 11,1 m/s.

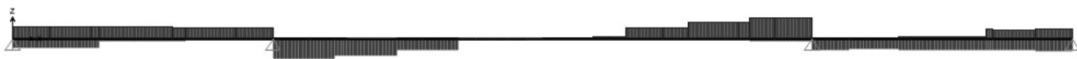


Figura 5.14. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de 11,1 m/s.



Figura 5.15. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=16,67$.

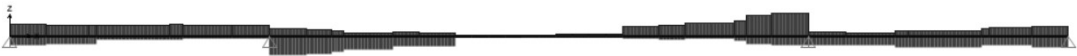


Figura 5.16. Diagrama de la envolvente de Corte máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=16,67$.



Figura 5.17. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de 16,67 m/s.

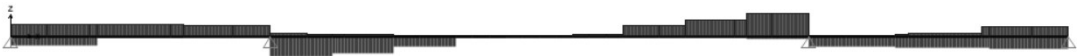


Figura 5.18. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de 16,67 m/s.

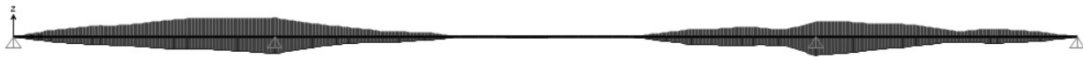


Figura 5.19. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de 16,67 m/s.



Figura 5.20. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de 16,67 m/s.

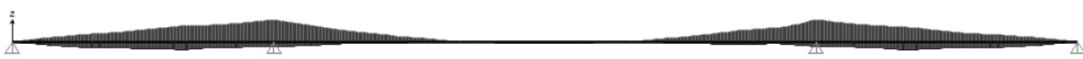


Figura 5.21. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=22,2$.

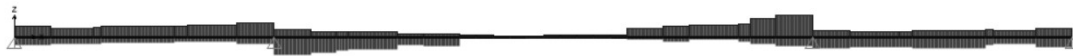


Figura 5.22. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a la Combinación de Cargas $v=22,2$.

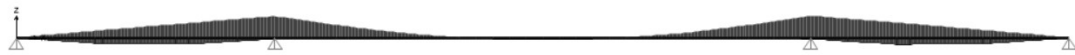


Figura 5.23. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de 22,2 m/s.

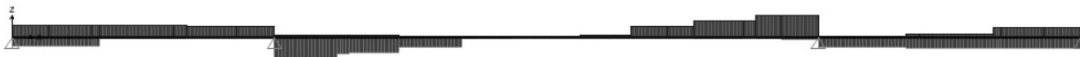


Figura 5.24. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas sin efectos dinámicos a la velocidad de 22,2 m/s.

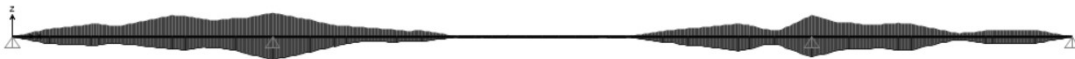


Figura 5.25. Diagrama de la envolvente de Momentos máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de 22,2 m/s.



Figura 5.26. Diagrama de la envolvente de Cortes máximos y mínimos debido a las cargas con efectos dinámicos a la velocidad de 22,2 m/s.

5.2.2 Valores tabulados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis del programa en las siguientes tablas, con el objetivo de poder visualizar y analizar los distintos incrementos producidos por las cargas con efectos dinámicos respecto las cargas sin efectos dinámicos.

$\theta = 2\%$

Primer apoyo intermedio

Velocidad	M (-)			V (-)		
	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación
Km/h	tnm	tnm	%	tn	tn	%
40	-804.1	-896.1	111.0	-46	-52.04	113.0
60	-803	-977.1	121.7	-45.8	-64.8	141.5
80	-787.6	-993.5	126.1	-45.6	-66	144.7

Tabla 5.1. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Flexión y Corte en apoyo. $\theta = 2\%$

Primer articulación

Velocidad	V (-)		
	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación
Km/h	tn	tn	%
40	-25.2	-29.3	116.3
60	-25.2	-34	134.9
80	-25	-35.8	143.2

Tabla 5.2. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.

$\epsilon = 4\%$

Primer apoyo intermedio

Velocidad	M (-)			V (-)		
	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación
Km/h	tnm	tnm	%	tn	tn	%
40	-804.1	-980.4	121.9	-46	-56.3	122.4
60	-803	-1151.1	143.3	-45.8	-83.8	183.0
80	-787.6	-1199.4	152.3	-45.6	-86.4	189.5

Tabla 5.3. Resumen de esfuerzos y solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\epsilon = 4\%$ – Flexión y Corte en apoyo.

$\epsilon = 4\%$

Primer articulación

Velocidad	V (-)		
	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación
Km/h	tn	tn	%
40	-25.2	-33.3	132.1
60	-25.2	-42.8	169.8
80	-25	-46.6	186.4

Tabla 5.4. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\epsilon = 4\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.

$\epsilon = 6\%$

Primer apoyo intermedio

Velocidad	M (-)			V (-)		
	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación
Km/h	tnm	tnm	%	tn	tn	%
40	-804.1	-1068.6	132.9	-46	-61.5	133.7
60	-803	-1325.2	165.0	-45.8	-102.8	224.5
80	-787.3	-1405.4	178.5	-45.5	-106.7	234.5

Tabla 5.5. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\epsilon = 6\%$ – Flexión y Corte en apoyo.

$\epsilon = 6\%$

Primer articulación

Velocidad	V (-)		
	Sin efectos dinámicos	Con efectos dinámicos	Relación
Km/h	tn	tn	%
40	-25.2	-37.4	148.4
60	-25.2	-51.6	204.8
80	-25	-57.4	229.6

Tabla 5.6. Resumen de esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\epsilon = 6\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.

A continuación, se presenta un resumen del incremento producido en las solicitaciones en las siguientes tablas.

Apoyo intermedio		
$\theta = 2\%$		
Velocidad	M(-)	V(-)
	Incremento	Incremento
Km/h	%	%
40	11	11
60	22	41
80	26	45

Tabla 5.7. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Flexión y Corte en apoyo.

Apoyo intermedio		
$\theta = 4\%$		
Velocidad	M(-)	V(-)
	Incremento	Incremento
Km/h	%	%
40	21	22
60	43	83
80	52	90

Tabla 5.8. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 4\%$ – Flexión y Corte en apoyo.

Apoyo intermedio		
$\theta = 6\%$		
Velocidad	M(-)	V(-)
	Incremento	Incremento
Km/h	%	%
40	32	34
60	65	124
80	78	134

Tabla 5.9. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 6\%$ – Flexión y Corte en apoyo.

Articulación	
$\theta = 2\%$	
Velocidad	V(-)
	Incremento
Km/h	%
40	16
60	35
80	43

Tabla 5.10. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 2\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.

Articulación	
$\theta = 4\%$	
Velocidad	V(-)
	Incremento
Km/h	%
40	32
60	70
80	86

Tabla 5.11. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 4\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.

Articulación	
$\theta = 6\%$	
Velocidad	V(-)
	Incremento
Km/h	%
40	48
60	105
80	130

Tabla 5.12. Resumen de los incrementos en los esfuerzos solicitantes para distintas combinaciones de cargas para un ángulo $\theta = 6\%$ – Corte en sección de transición entre sección cajón y tramo central metálico.

6. CONCLUSIONES

Durante la vida útil de las estructuras, las incertidumbres en los materiales y los estados tensionales debido a las distintas cargas a las que se encuentran expuestos pueden llevar a la reducción de la integridad estructural de sus elementos.

Resulta muy interesante representar conceptualmente y numéricamente el efecto que producen las irregularidades de la rasante en el tablero como desniveles o baches sobre el estado tensional de la estructura.

Haciendo un análisis comparativo se observa que el efecto de las cargas dinámicas produce un gran incremento en las solicitaciones obtenidas de la estructura.

Se presume que el mayor incremento se produce en los esfuerzos de Corte en las secciones analizadas obteniendo valores de hasta 134% mayores a los obtenidos del análisis en ausencia de efectos dinámicos. Se aprecia además que los desplazamientos producidos por la estructura debido a las cargas del bitren sin efectos dinámicos mucho más pequeños que los desplazamientos producidos por el paso del bitren considerando efectos dinámicos.

- Diagramas de Momento: se observa que los diagramas que corresponden a las cargas sin efectos dinámicos presenta los mayores momentos positivos en el primer apoyo, mientras que en los diagramas que corresponden a las cargas con efectos dinámicos presentas grandes momentos tanto negativos como positivos en la misma sección (Figura 6.1, 6.2, 6.3).



Figura 6.1. Envolvente de momentos para cargas con efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 11,1 m/s.



Figura 6.2. Diagrama de envolventes de momentos para cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 11,1 m/s.



Figura 6.3. Envolvente de momentos para la combinación de cargas $v=11,1$.

- Los valores de momentos se incrementan proporcionalmente a los ángulos de deflexión y a la velocidad, obteniendo un aumento máximo del 78 % para un ángulo del 6% a una velocidad de 80 Km/h.
- Diagramas de Corte: los diagramas de corte debido a las cargas impulsivas presentan valores altos tanto positivos como negativos en el primer apoyo, aunque los mayores valores de corte para el paso de cargas no impulsivas se

dan en el corte negativo en la sección del primer apoyo. Por lo tanto, en las combinaciones de cargas los mayores valores se obtienen para el corte negativo (Figura 6.4, 6.5, 6.6).

- Los valores de corte se incrementan proporcionalmente a los ángulos de deflexión y a la velocidad, obteniendo un aumento máximo del 134 % para un ángulo del 6% a una velocidad de 80 Km/h en el primer apoyo. Y un incremento máximo del 130% para un ángulo de deflexión de 6% para una velocidad de 80 Km/h en la articulación.



Figura 6.4. Diagrama de envolvente de momentos para cargas con efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 16,67 m/s.

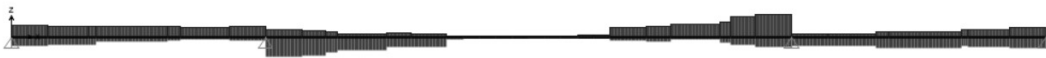


Figura 6.5. Diagrama de envolventes de momentos para cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de circulación de 16,67 m/s.

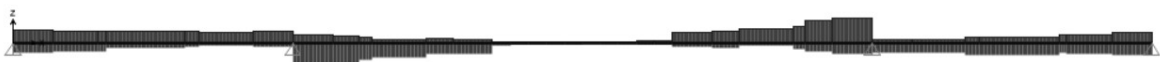


Figura 6.6. Envlovente de momentos para la combinación de cargas v=16,67

- Desplazamientos: nótese que los mayores desplazamientos del puente no se dan en la máxima velocidad de circulación si no a 60 Km/h en los 3 casos de deflexión. Aunque, son directamente proporcionales al ángulo. (Tablas 6.1,6.2 y 6.3).

$\theta = 0.02$	
Velocidad (Km/h)	Desplazamiento (mm)
40	53.8
60	60.28
80	57

Tabla 6.1. Desplazamiento de la estructura para la combinación de carga v=11,1, con un ángulo de deflexión del 2%.

$\theta = 0.04$	
Velocidad (Km/h)	Desplazamiento (mm)
40	58
60	70.5
80	65

Tabla 6.2. Desplazamiento de la estructura para la combinación de carga v=16,67 con un ángulo de deflexión del 4%.

$\theta = 0.06$

Velocidad (Km/h)	Desplazamiento mm
40	62.4
60	80.7
80	72.8

Tabla 6. 3. Desplazamiento de la estructura para la combinación de cargas $v=22,2$, con un ángulo de deflexión del 6%.

- Las funciones respuesta de la estructura para cada tipo de carga por separado se muestran en las Figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, las tres primeras corresponden a cargas considerando el quiebre en la rasante del tablero y las últimas tres no consideran el quiebre. Las fuerzas de impacto producen desplazamientos adicionales que se suman a los producidos por las cargas sin efectos del quiebre de la rasante. Se puede ver que los máximos valores de la función respuesta debido a las cargas dinámicas se produce a una velocidad de 60 Km/h.

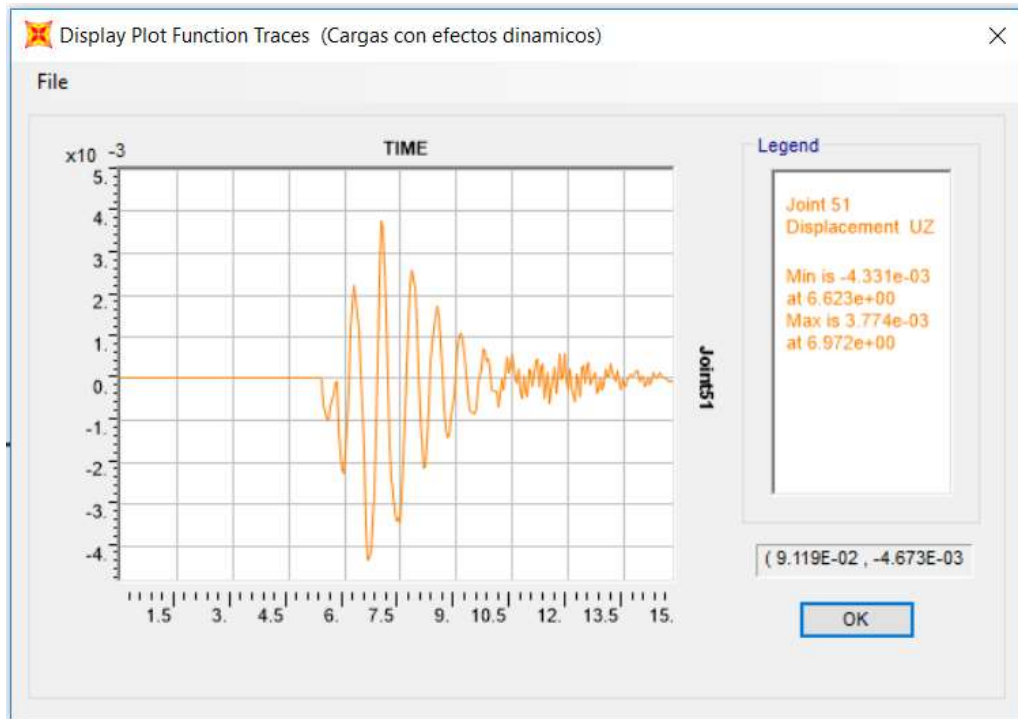


Figura 6. 7. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas con efectos dinámicos, a una velocidad de 40 Km/h.

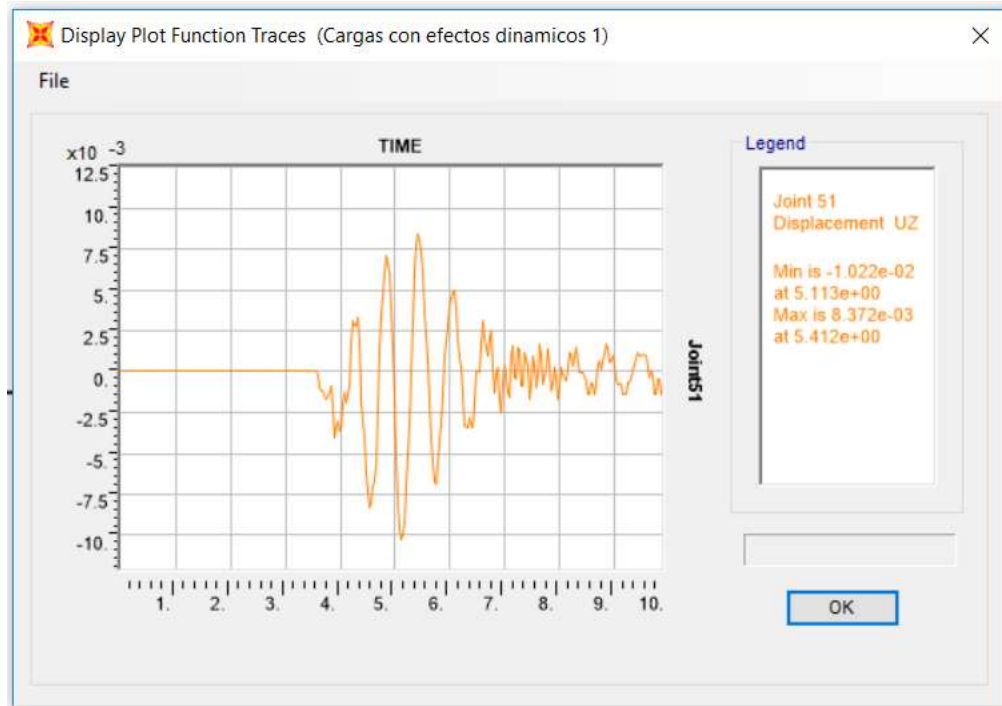


Figura 6.8. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas con efectos dinámicos, a una velocidad de 60 Km/h.

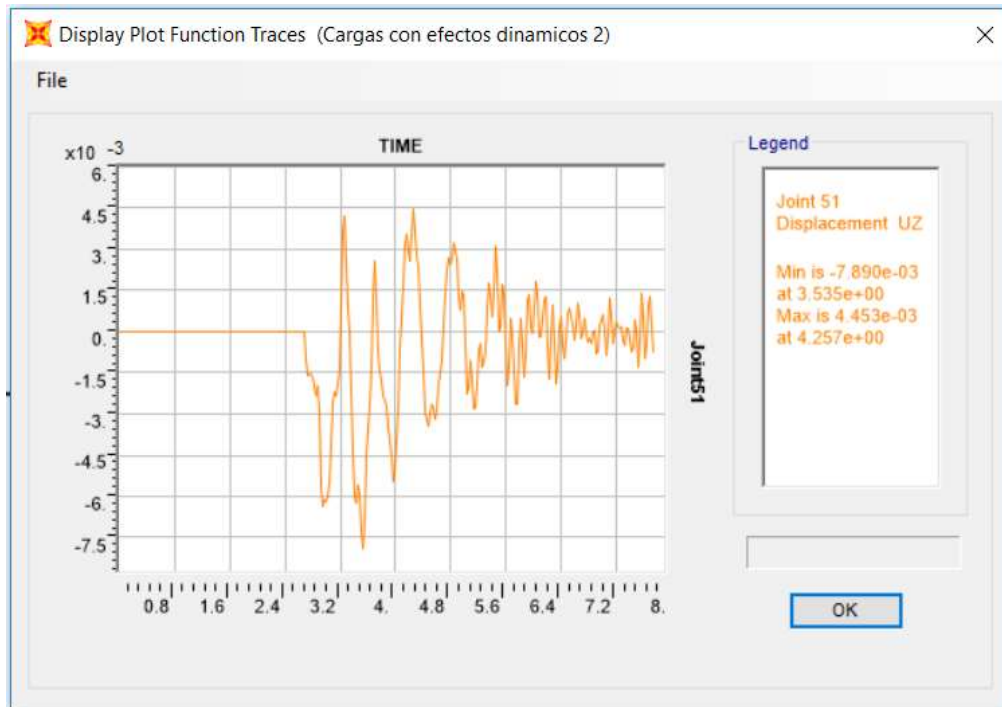


Figura 6.9. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas con efectos dinámicos, a una velocidad de 80 Km/h.

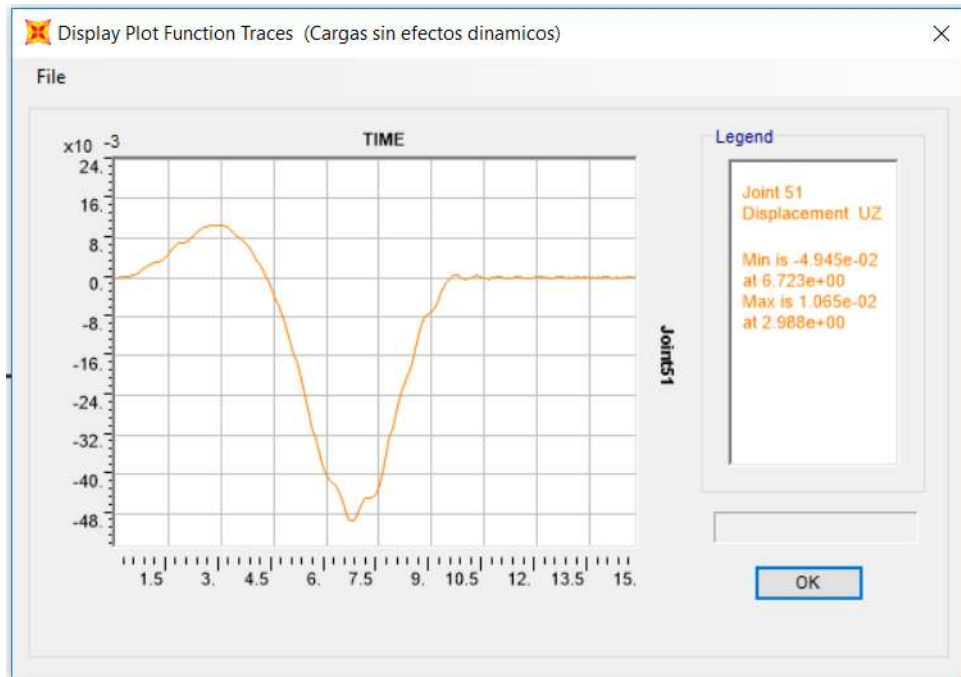


Figura 6. 10. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de 40 Km/h.

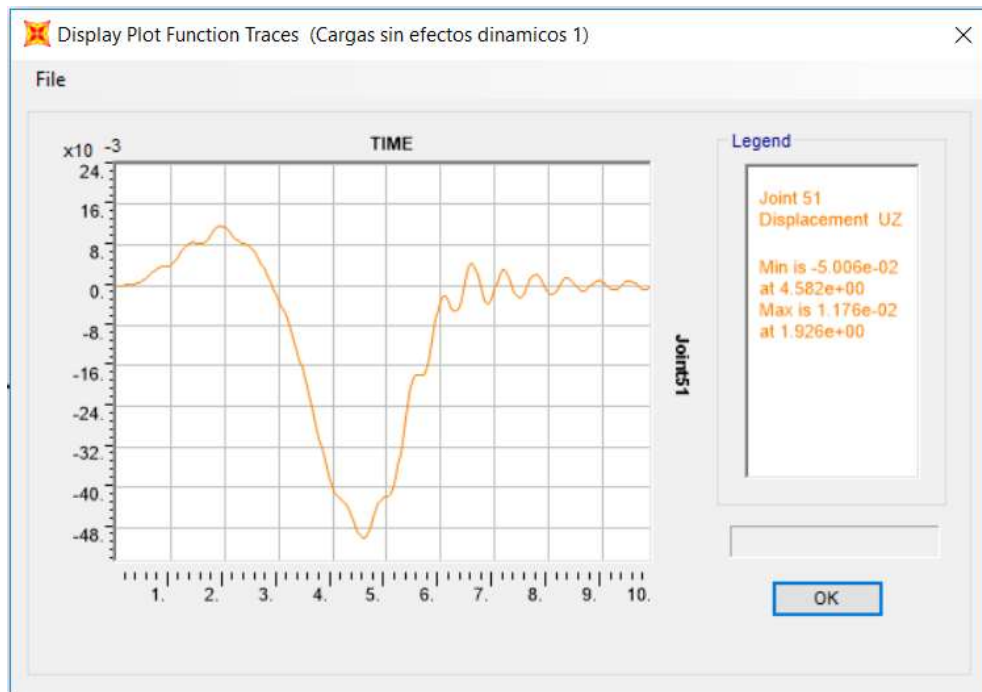


Figura 6.11. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de 60 Km/h.

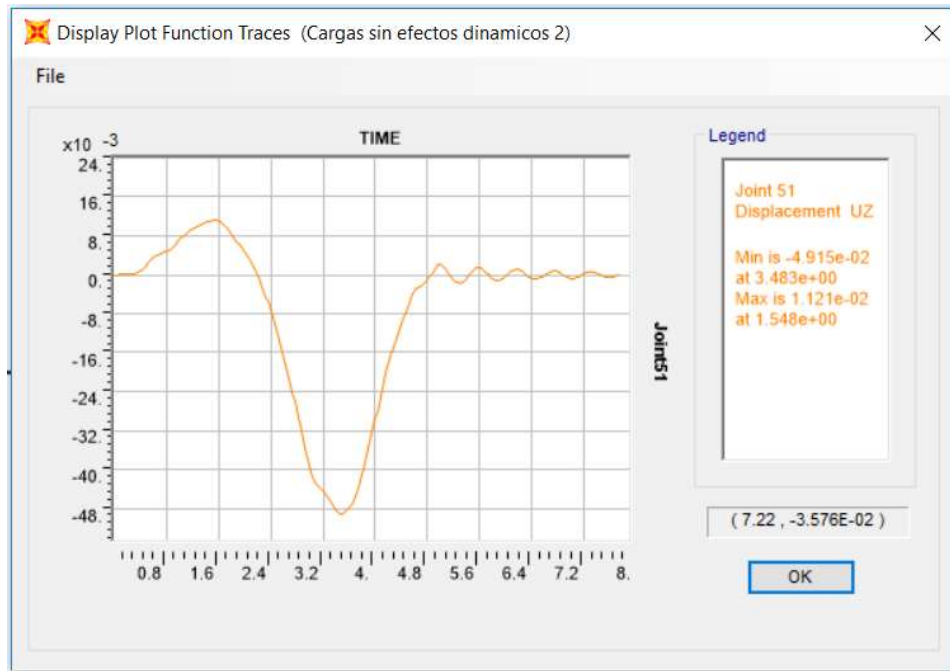


Figura 6.12. Función respuesta desplazamiento de la estructura frente a la aplicación de cargas sin efectos dinámicos a una velocidad de 80 Km/h.

Los resultados obtenidos están influenciados por la frecuencia natural de la estructura y la frecuencia generada por el paso de tren de cargas. Ya que se amplifican por efecto de resonancia.

Considerando una separación entre los ejes principales del bitren de 8.7 m, se obtienen las frecuencias generadas por el bitrén:

Velocidad (Km/h)	Frecuencia (Hz)
40	1.27
60	1.91
80	2.55

Tabla 6.4. Frecuencias asociadas al paso del tren de cargas.

Como las frecuencias naturales de los primeros modos son de 1.55 Hz, 1.72 Hz y 4.59 Hz, es posible suponer que los máximos desplazamientos se dan a 60 km/h debido a que la frecuencia por el paso del bitrén a esa velocidad es la que más se aproxima a la fundamental, aun cuando se generan fuerzas pico de bitren un 25% menores a las generadas por 80 Km/h.

En cuanto a la frecuencia a 40 km/h es también próxima a la fundamental, pero genera fuerzas de bitren menores (33%) a 60 km/hr.

Los esfuerzos en general son influenciados por las altas frecuencias, mientras que los desplazamientos por las bajas.

7. ANEXOS

7.1 ANEXO 1. MODULO ELASTICO INSTANTANEO DEL HORMIGON

Con anterioridad, se realizó una visita al sitio de emplazamiento del puente con el objeto de realizar un relevamiento visual de las condiciones de la estructura.

Con el objeto de determinar propiedades de los materiales en la condición actual de las estructuras, se realizaron ensayos con ondas sónicas en el hormigón. Mediante estos ensayos, cuyos resultados se resumen en la Tabla 7.1, se determinan velocidades de propagación de ondas de corte, mediante las cuales es posible determinar el módulo elástico instantáneo del hormigón. Puede verse que el módulo elástico promedio obtenido es de 398 tn/cm², valor representativo de un hormigón de muy buena calidad. En base al módulo elástico, la resistencia a la compresión simple del hormigón mediante correlaciones puede ser estimada con un valor promedio de 448 kg/cm² (44 MPa).

Puente	Muestra	V _p [m/s]	Módulo elástico [tn/cm ²]	Resistencia a compresión estimada [kg/cm ²]	V _p medio [m/s]	Módulo elástico medio [tn/cm ²]
Saladillo	51	4300	407	459	4242	398
	52	3970	347	334		
	53	4630	472	617		
	54	4570	460	586		
	55	4190	387	414		
	56	4260	400	442		
	57	4530	452	566		
	58	3520	273	206		
	59	4130	376	391		
	60	4320	411	468		

Tabla 7.1. Propiedades del hormigón determinadas en el sitio

Durante la visita, se realizaron también registros dinámicos del paso de vehículos en las estructuras (tramo sur y norte) con el objeto de identificar las frecuencias naturales para una posterior calibración de la rigidez de la estructura en el modelo de cálculo.

La Figura 7.1 muestra los registros de vibraciones en términos de aceleraciones para impulsos realizados en la estructura correspondiente al tramo sur. Estos registros son convertidos al dominio de la frecuencia con el objeto de determinar la función de densidad espectral de potencia (Figura 7.2), que representa las frecuencias dominantes de las vibraciones libres. La Figura 7.3 y Figura 7.4 muestran las curvas correspondientes al tramo norte.

Del análisis de las densidades espectrales, se desprende que las frecuencias naturales correspondientes a los primeros modos resultan:

- Tramo Sur
 - > Primer modo = 1.71 Hz
 - > Segundo modo = 9.25 Hz
 - > Tercer modo = 12.42 Hz
- Tramo Norte
 - > Primer modo = 1.41 Hz

- > Segundo modo = 1.72 Hz
- > Tercer modo = 4.68 Hz

Se destaca que, si bien hay una gran similitud en la frecuencia del primer modo, los ensayos realizados en el tramo sur parecen no evidenciar correctamente el segundo y tercer modo determinado en el tramo norte, ya que las frecuencias son muy altas. Para el ajuste, se considera conservadoramente los modos evaluados en el tramo norte.

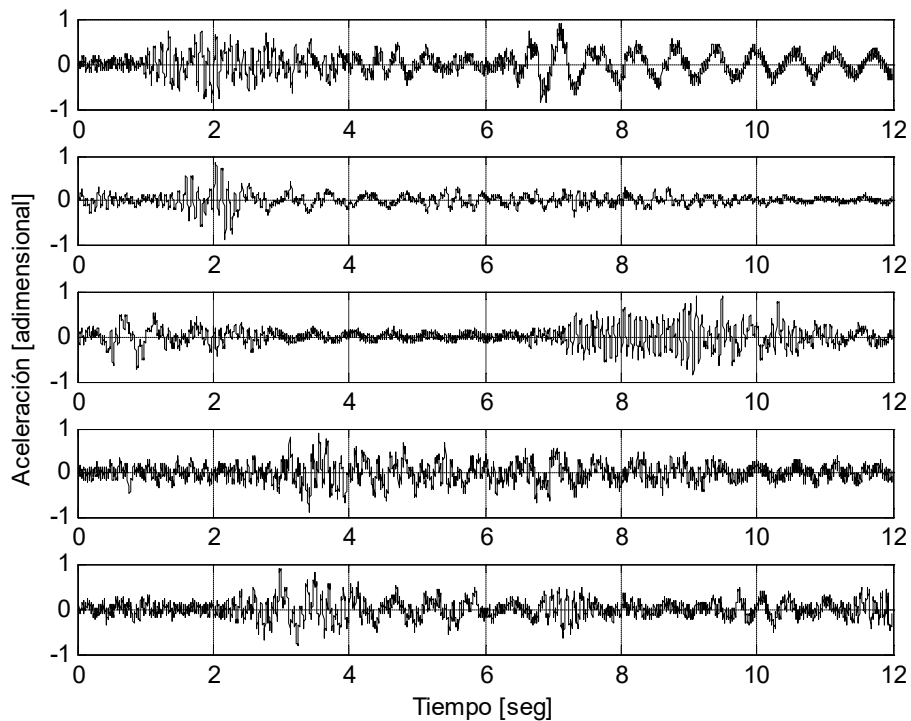


Figura 7.1. Registros de vibraciones en tramo sur

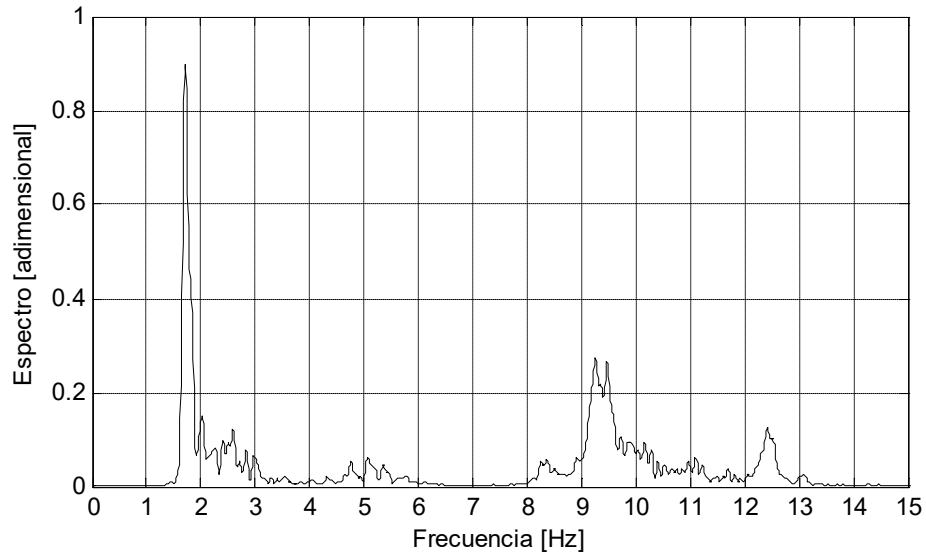


Figura 7.2. Densidad espectral de potencia en tramo sur

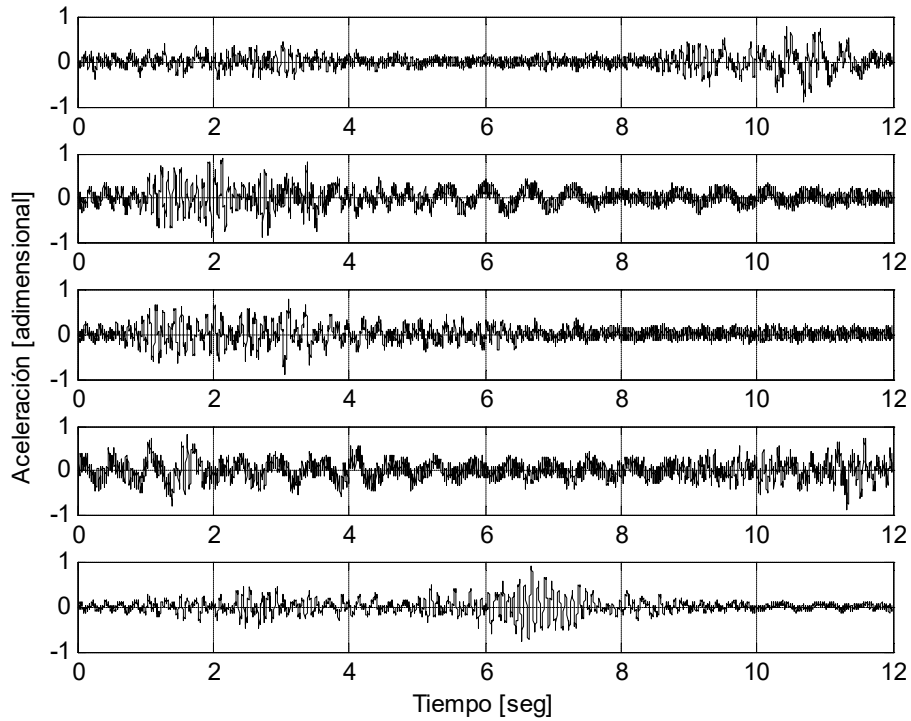


Figura 7.3. Registros de vibraciones en tramo norte

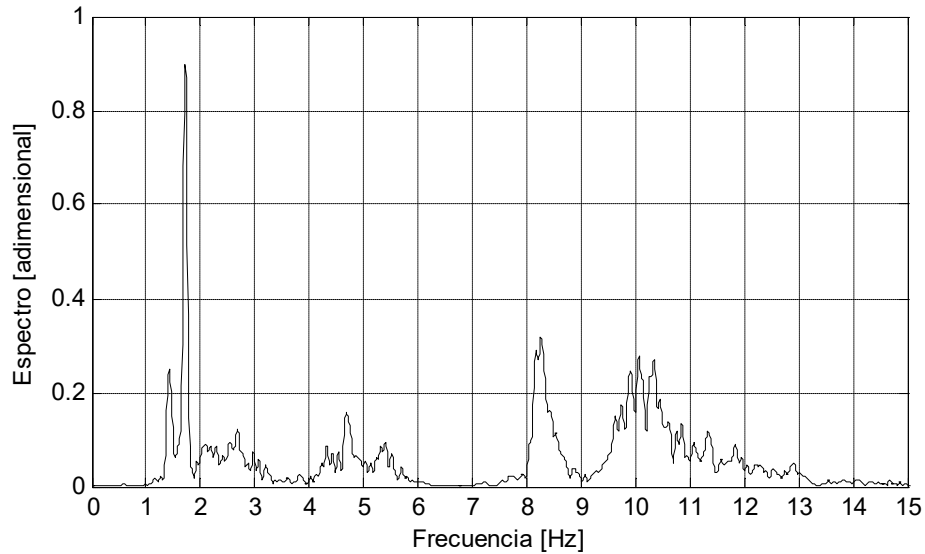


Figura 7.4. Densidad espectral de potencia en tramo norte

Con el objeto de ajustar el modelo a la condición actual del puente evidenciado mediante los ensayos dinámicos realizados anteriormente por profesionales intermitentes, se evalúan los modos de vibración natural del tablero. La Figura 7.5 muestra los modos determinados, cuyas frecuencias son próximas a las determinadas experimentalmente. Cabe destacar que el modelo numérico evalúa algunos modos intermedios entre los indicados en la Figura 7.5, pero que no parecen haber sido suficientemente excitados mientras se realizaron los registros dinámicos.

De esta manera, se ajusta el módulo del hormigón inicialmente estimado mediante la técnica pulso-eco (Tabla 7.1) con el objeto de aproximar las frecuencias del modelo con los ensayos. La Tabla 7.2 muestra las frecuencias calibradas mediante una reducción del módulo por un factor de 0,912 para lograr una buena aproximación. De esta manera, el módulo del hormigón considerado en el análisis resulta de:

$$E = 363 \text{ t/cm}^2$$

Puente	E / Eo	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Ensayo	—	1.42	1.72	4.68
Modelo	0.912	1.55	1.72	4.59

Tabla 7.2. Calibración de modelo.

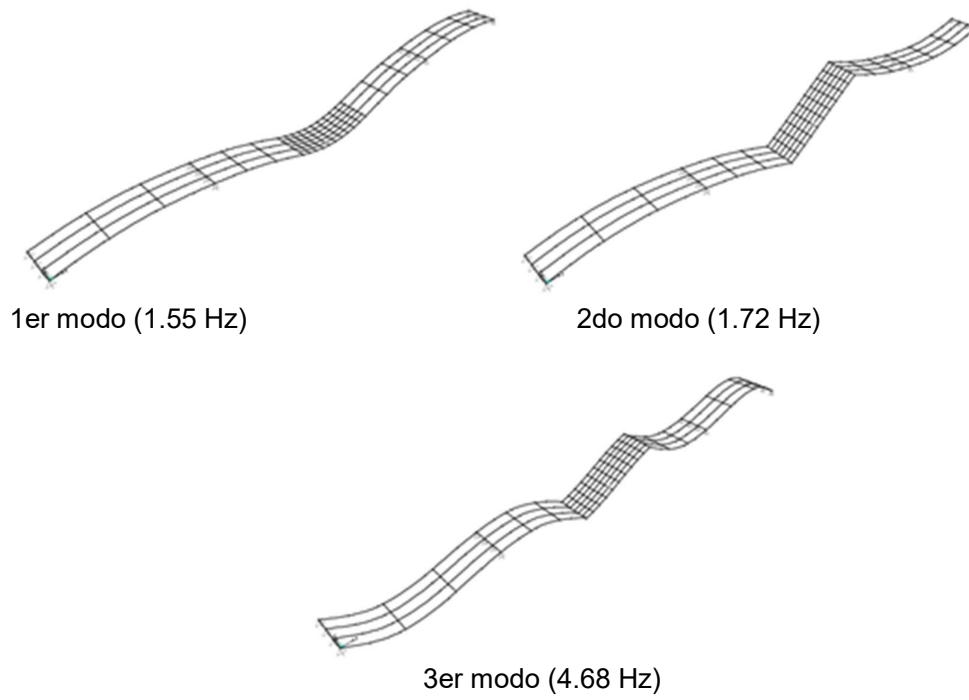


Figura 7.5. Modos evaluados mediante modelo numérico

7.2 ANEXO 2. ARCHIVO FOTOGRAFICO















8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<https://lev2.efn.uncor.edu/course/view.php?id=176>, (sin fecha), Cátedra de Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado, Material de Lectura: Puentes Conceptos básicos, Profesor Alberto Villarino Otero, con fecha de acceso del 1/07/2019.

https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68059/VIGAS%20GERBER_EZQUERRO%2C%20ANA%20%5B1045530%5D.pdf?sequence=1, Vigas Gerber: comportamiento estructural y estudio de la tipología arquitectónica, Trabajo Final de grado, (julio 2016).

Carlos A. Prato y Massa, (2015), Análisis estructural, Capítulo 11: Consideraciones generales sobre Dinámica Estructural.

Carlos A. Prato y Massa, (2015), Análisis estructural, Capítulo 12: Respuesta de un oscilador simple.

Buroz Oliva Juan Alberto, Puglia Martinez Kelly G., Ingeniero Eduardo Lopez, (21 septiembre 2017), Manual para uso del programa SAP2000 para fines docentes.

Saracho J. A.; José R. Barlek; Oscar Dip. "Contribuciones para la evaluación de puentes en Argentina". *Una transferencia de la Universidad a Vialidad Nacional*. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Tucumán. Universidad Nacional de Tucumán

Francisco Beltran y Miguel Cerrolaza; Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en ingeniería. Vol. 5, 4, 473-501 (Año 1989); Análisis Dinámico De Estructuras Sometidas A Cargas No Lineales.

Jornada de Puentes (año 2017); Asociación Argentina de Carreteras; Reglamento Argentino para el Diseño de Puentes Carreteros; Proyecto General y Análisis Estructural.

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/nuevas_configuraciones.pdf, Dirección Nacional de Vialidad, Configuraciones Autorizadas para el Transporte Automotor de Cargas, Art 27 del Decreto N° 32/18.

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/exceso_de_carga.pdf, Dirección Nacional de Vialidad Exceso de Carga, Artículo 57.

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/pesos_maximos.pdf, Dirección Nacional de Vialidad, Pesos Maximos Establecidos por la Ley, Configuraciones Vehiculares Según Transmision a Calzada, Decreto N° 32/18.

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anexo_corredores_bitrenes.pdf, Dirección Nacional de Vialidad, Anexo Corredores Bitrenes.

<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/limite-de-puentes20190701.pdf>, Dirección Nacional de Vialidad, Anexo Puentes Limitados.

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anexo_mapas_recorrido_bitrenes_0.pdf, Dirección Nacional de Vialidad, Anexo Mapas Recorridos Bitrenes.

