

*Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

**Factor de amplificación dinámica  
debido a la caída de un carro de  
avance en voladizo. Análisis  
experimental y numérico aplicados al  
Puente Bioceánico, atirantado, y al  
Puente Chilina, de viga continua.**

Trabajo realizado por:  
***Paula Pérez García***

Dirigido:  
***Ignacio Lombillo Vozmediano***  
***Javier Sánchez Haro***

Titulación:  
**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, junio de 2025.

It is all about trust.

## Agradecimientos

---

No quería cerrar esta etapa sin dejar mi honesto agradecimiento a quienes sí han sido importantes en este camino y me han aportado algo positivo.

En particular, gracias a Garji, Lolo y las Anas, y, en especial, a Norbe, por aguantar todas mis idas y venidas, por estar siempre animándome y apoyándome en cada paso, por estar cuando había que celebrar y también cuando no veía el final.

A mis padres, por su esfuerzo constante a lo largo de toda esta carrera de fondo. Por animarme a continuar y a lograr aquello que me hiciera feliz, fuese lo que fuese y donde fuese.

A la Cátedra Arenas por darme la oportunidad, pero directamente a Javier, por escuchar y atender mis ganas de hacer algo real, por querer trabajar conmigo en este proyecto y por permitirme lograr que consiguiéramos los objetivos propuestos. Gracias por confiar en mí en el momento en que yo no lo hacía.

Y a mí misma, por no tirar la toalla, a pesar de ser lo que más me apeteciera a veces, y haber llegado hasta el final. Por confiar en mí misma y darme la oportunidad de demostrarme que soy capaz de todo lo que me proponga, hasta cuando está todo en contra.

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>7</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>Palabras y expresiones clave</b> .....	<b>9</b>
<b>Listado de acrónimos</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Estado del arte</b> .....	<b>10</b>
1.1. <i>La evolución de los puentes con el ingeniero de caminos</i> .....	10
1.2. <i>Construcción mediante voladizos sucesivos</i> .....	12
1.3. <i>Introducción al cálculo dinámico</i> .....	15
1.3.1. <i>Sistemas de 1 GDL</i> .....	16
1.3.2. <i>Sistemas de 2 GDL</i> .....	19
1.4. <i>Normativas de aplicación</i> .....	24
<b>2. Material y metodología</b> .....	<b>27</b>
2.1. <i>Casuística</i> .....	27
2.1.1. <i>Puentes analizados</i> .....	27
<b>2.1.1.1. Puente Bioceánico</b> .....	28
<b>2.1.1.2. Puente Chilina</b> .....	34
2.1.2. <i>Carros analizados</i> .....	37
2.2. <i>Modelo de elementos finitos</i> .....	40
2.2.1. <i>Software empleado</i> .....	41
2.2.2. <i>Puente Bioceánico</i> .....	44
2.2.3. <i>Puente Chilina</i> .....	47
<b>3. Ensayo experimental y calibración del modelo numérico</b> .....	<b>48</b>
3.1. <i>Modelo aeroelástico</i> .....	48
3.2. <i>Descripción del ensayo</i> .....	51
3.3. <i>Definición del carro de avance empleado en los ensayos</i> .....	54
3.4. <i>Calibración de la función Fuerza-Tiempo equivalente</i> .....	56

<b>4. Resultados.....</b>	<b>67</b>
4.1. <i>Puente Bioceánico</i> .....	67
4.1.1. Situación de partida.....	68
4.1.2. Situación final.....	69
4.2. <i>Puente Chilina</i> .....	73
4.3. <i>Análisis de los resultados</i> .....	74
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>77</b>
5.1. <i>Conclusiones de la investigación</i> .....	77
5.2. <i>Aprendizaje</i> .....	80
5.3. <i>Relación con los ODS</i> .....	81
<b>6. Bibliografía .....</b>	<b>83</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de un carro de avance en voladizos sucesivos [3].....	12
Figura 2. Encofrado de dovela 0 en el Puente Allcomachay (Perú), [3]. .....	13
Figura 3. Construcción simétrica mediante el carro de avance en el Puente Allcomachay (Perú), [3]. .....	13
Figura 4. Construcción del viaducto del tren eléctrico de Lima, Perú, mediante carro de avance, [3]. .....	14
Figura 5. Sistema de 1 GDL. ....	16
Figura 6. Representación gráfica de la Ecuación V.b. del desplazamiento, X, respecto del tiempo. ....	18
Figura 7. Representación gráfica del esfuerzo axil, N, respecto del tiempo. ....	19
Figura 8. Sistema de 2 GDL. ....	20
Figura 9. Representación gráfica del desplazamiento de cada modo de vibración respecto del tiempo en un sistema de 2 GDL. ....	23
Figura 10. Representación gráfica de los esfuerzos axiles del sistema de 2 GDL respecto del tiempo. ....	23
Figura 11. Corredor Bioceánico [11]. .....	28
Figura 12. Vista longitudinal del Puente Bioceánico [12]. .....	29
Figura 13. Vistas longitudinal (a) y transversal (b) del Puente Bioceánico [12]. .....	30
Figura 14. Torres del Puente Bioceánico [12]. .....	30
Figura 15. Vista general de la fase inicial de construcción de los estribos y las torres del Puente Bioceánico.....	31
Figura 16. Montaje de las torres del Puente Bioceánico vista en dirección al río Paraguay. ....	31
Figura 17. Montaje de la torre del Puente Bioceánico situada en la orilla de Carmelo Peralta. ....	32
Figura 18. Fase de montaje del carro de avance sobre la dovela 0. ....	32
Figura 19. Vista general de la fase de montaje del carro de avance sobre la dovela 0. ....	33
Figura 20. Vista del carro de avance empleado para la construcción del vano central del Puente Bioceánico.....	34
Figura 21. Vista del frente de avance del carro.....	34

Figura 22. Puente Chilina en la ciudad de Arequipa [13].	35
Figura 23. Sección transversal tipo en centro de luz [14].	36
Figura 24. Sección longitudinal del Puente Chilina [14].	36
Figura 25. Fase de construcción de los tableros [14].	36
Figura 26. Carro de avance en voladizos OH [15].	39
Figura 27. Carro de avance en voladizos US [16].	40
Figura 28. Esquema de trabajo de SOFiSTiK [20].	42
Figura 29. Ejemplo de la barra de herramientas de posprocesamiento de datos [21].	43
Figura 30. Modo de desplazamiento del MEF del Puente Bioceánico en la IS [1].	45
Figura 31. Diagrama de momentos flectores debido al FT-Case (IS) [1].	45
Figura 32. Modo de desplazamiento del MEF del Puente Bioceánico en la LS [1].	46
Figura 33. Diagrama de momentos flectores debido al FT-Case (LS) [1].	46
Figura 34. Modo de desplazamiento del MEF del Puente Chilina en la LS [1].	47
Figura 35. Diagrama de momentos flectores debido al FT-Case (LS) [1].	47
Figura 36. Procedimiento de trabajo para la obtención del MEF.	48
Figura 37. Croquis de la maqueta del Puente Bioceánico [12].	49
Figura 38. Modelo aeroelástico del Puente Bioceánico [24].	49
Figura 39. Detalle de las pilas de la maqueta del Puente Bioceánico [24].	50
Figura 40. Detalle de construcción de la maqueta del Puente Bioceánico [24].	50
Figura 41. Elementos de medida sobre el modelo [24].	50
Figura 42. Célula de carga [24].	50
Figura 43. Ensayo FV [1].	52
Figura 44. Ensayo ARFT-OH en el instante inicial [1].	52
Figura 45. Ensayo ARFT-OH en el instante del vuelco [1].	53
Figura 46. Ensayo ARFT-US en el instante inicial [1].	53
Figura 47. Ensayo ARFT-US en el instante de caída [1].	53
Figura 48. Equilibrio estático [1].	55
Figura 49. Caída accidental del carro de avance [1].	55
Figura 50. Geometría del carro de avance OH [1].	55

Figura 51. Geometría del carro de avance US [1].....	55
Figura 52. Parámetros de la función Fuerza-Tiempo [1].....	57
Figura 53. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso FV [1]. .....	58
Figura 54. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-OH ( $t_d = 0,9$ s; $D = 0,8$ %) [1]. .....	60
Figura 55. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-OH ( $F = 33$ %; $D = 0,8$ %) [1].....	61
Figura 56. Comparación de los resultados obtenidos durante el proceso de calibración mediante diagramas de Desplazamiento del caso ARFT-OH en la LS del Puente Bioceánico. .....	62
Figura 57. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-US ( $t_d = 0,5$ s; $D = 0,8$ %) [1]. .....	63
Figura 58. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-US ( $F = 22$ %; $D = 0,8$ %) [1].....	64
Figura 59. Comparación de los resultados obtenidos durante el proceso de calibración mediante diagramas de Desplazamiento del caso ARFT-US en la LS del Puente Bioceánico. .....	65
Figura 60. Función Fuerza-Tiempo de los MEF obtenidos para el ensayo de ARFT-OH y ARFT-US [1].....	66
Figura 61. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1]. .....	68
Figura 62. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1]. .....	69
Figura 63. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-T del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1]. .....	70
Figura 64. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-T del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1]. .....	70
Figura 65. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-F del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1]. .....	71
Figura 66. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-F del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1]. .....	71

Figura 67. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1]. ..... 72

Figura 68. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1]. ..... 72

Figura 69. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS del Puente Chilina para el caso de ARFT-OH [1]. ..... 73

Figura 70. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS del Puente Chilina para el caso de ARFT-OH [1]. ..... 74

## Índice de Tablas

---

Tabla 1. Factor de Amplificación Dinámica (DAF) para los momentos flectores de las secciones analizadas [1]. ..... 75

Tabla 2. Factor de Reducción Dinámica (RAF) para los momentos flectores de las secciones analizadas [1]. ..... 77

## Resumen

En este estudio se ha investigado el factor de amplificación dinámica derivado de la caída de un carro de avance en puentes construidos mediante el método de avance en voladizo, centrándose en dos casos representativos: el puente Bioceánico, de sistema atirantado, y el puente Chilina, de tipología de viga continua.

Se ha llevado a cabo un análisis experimental complementado con simulaciones numéricas avanzadas, utilizando modelos de elementos finitos que replican diversas situaciones de caída. Este enfoque combinado permitió capturar la respuesta real de la estructura ante cargas dinámicas, y contrastarla con las normativas vigentes, las cuales recomiendan un coeficiente de mayoración de 2 sobre el cálculo estático para esta situación. Medida que, como se demostrará a lo largo de este trabajo, no siempre está del lado de la seguridad.

El propósito de este trabajo es ofrecer una metodología de análisis que proporcione cálculos precisos y realistas del comportamiento dinámico ante la caída de un carro de avance, evidenciando que el factor de amplificación propuesto por las normativas puede no ser el más adecuado. Con ello, se busca optimizar el diseño y garantizar una mayor seguridad estructural en la construcción de puentes, aportando criterios técnicos que sirvan de referencia para futuras normativas y estudios en el área.

## Abstract

In this study, the dynamic amplification factor resulting from the accidental release of a formwork traveller in bridges constructed using the balanced cantilever method has been investigated, focusing on two representative cases: the Bioceanic Bridge, a cable-stayed system, and the Chilina Bridge, characterized by a continuous girder typology.

An experimental analysis was carried out and complemented by advanced numerical simulations, employing finite element models that replicate various drop scenarios. This combined approach enabled the capture of the actual structural response under dynamic loading and allowed for its comparison with current design codes, which recommend a dynamic amplification factor of 2 over the static calculation for this specific situation. A value that, as will be demonstrated throughout this work, is not always on the side of safety.

The objective of this research is to provide an analytical methodology that yields accurate and realistic predictions of the dynamic behavior resulting from the falling of a formwork traveller, showing that the amplification factor prescribed by existing standards may not be the most suitable. The ultimate aim is to optimize structural design and enhance safety in bridge construction by contributing technical criteria that may serve as a reference for future standards and studies in the field.

## Palabras y expresiones clave

Puente; análisis dinámico; normativas; carro de avance; avance en voladizo; factor de amplificación dinámica; modelo de elementos finitos; Puente Bioceánico; Puente Chilina.

## Listado de acrónimos

Por fidelidad a la nomenclatura usada en la publicación en inglés de este estudio [1], al igual que en las figuras, se mantiene durante el documento el criterio lingüístico.

- **DAF:** *Dynamic Amplification Factor* → *Factor de Amplificación Dinámica*
- **ARFT:** *Accidental Release of the Formwork Traveller* → *Caída Accidental de un Carro de Avance*
- **OH:** *OverHead* → *Encofrado Superior*
- **US:** *UnderSlung* → *Encofrado Inferior*
- **FV:** *Free Vibration* → *Vibraciones Libres*
- **IS:** *Initial Stage* → *Situación Inicial*
- **LS:** *Last Stage* → *Situación Final*
- **FT-Case:** *Formwork Traveller-Case* → *Caso con el Carro de Avance*
- **PS-B:** *Pylon Section-Bottom* → *Sección Inferior de la Pila*
- **PS-T:** *Pylon Section-Top* → *Sección Superior de la Pila*
- **DS-B:** *Deck Section-Back* → *Sección Anterior del Tablero*
- **DS-F:** *Deck Section-Front* → *Sección Frontal del Tablero*
- **SW<sub>FT</sub>:** *Static Weight of the Formwork Traveller* → *Peso Estático del Carro de Avance*
- **SW<sub>s</sub>:** *Static Weight of the Segment* → *Peso estático de la Dovela*
- **DRF:** *Dynamic Reduction Factor* → *Factor de Reducción Dinámica*
- **D:** *Amortiguamiento*
- **F:** *Fuerza*
- **t<sub>a</sub>:** *Tiempo de caída*
- **ODS:** *Objetivos de Desarrollo Sostenible*

## 1. Estado del arte

La evolución de la ingeniería de puentes ha estado marcada por avances significativos en materiales, métodos constructivos y herramientas analíticas, lo que ha permitido el desarrollo de infraestructuras más eficientes y seguras. Desde los primeros puentes construidos con técnicas empíricas hasta las modernas estructuras de hormigón y acero, la optimización de recursos y el perfeccionamiento de los procesos han sido clave en la transformación de estas obras. Además, el estudio de los efectos dinámicos durante la fase constructiva cobra especial relevancia para poder garantizar así el comportamiento adecuado de la estructura en todo su ciclo de vida, particularmente, debido a las situaciones de esbeltez definidas hoy en día. En este contexto, se analiza a continuación la evolución histórica de los puentes, el método de construcción por voladizos sucesivos y la importancia del análisis dinámico en su diseño y ejecución.

### 1.1. La evolución de los puentes con el ingeniero de caminos

En 1802 fue fundada en Madrid la primera escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos por Agustín de Betancourt, con el propósito de formar profesionales con conocimientos técnicos avanzados para diseñar y ejecutar infraestructuras clave para el desarrollo del país. El siglo XIX marcó una era de cambios, descubrimientos y el afianzamiento de la figura del ingeniero de caminos, canales y puertos tal como la conocemos en la actualidad. Aunque según el país es más conocido como ingeniero civil, este perfil tuvo un papel fundamental en el desarrollo de las áreas del ferrocarril, los puentes y las obras hidráulicas.

Con la Revolución Industrial y el avance de la ciencia, el ingeniero de caminos evolucionó desde un enfoque basado en la experiencia empírica y el trabajo artesanal, utilizados en la construcción de los primeros puentes de cuerdas o piedra, hacia un método más sistemático y tecnificado. Durante este período, la aplicación del pensamiento lógico se combinó con el desarrollo de nuevas teorías estructurales, permitiendo una transformación en la concepción y construcción de infraestructuras. La llegada del acero en el siglo XIX revolucionó el diseño de puentes, posibilitando estructuras más ligeras y resistentes. Posteriormente, en el siglo XX [2], la introducción del hormigón armado y el puente mixto de hormigón y acero permitió una mayor eficiencia estructural y constructiva, acelerando la evolución de las tipologías empleadas hasta nuestros días. Mientras que en la

antigüedad se priorizaban puentes robustos y ornamentados, en la actualidad, la tendencia se orienta hacia estructuras más esbeltas, de mayores luces y longitudes, con un diseño optimizado que combina ligereza visual y alto rendimiento mecánico.

Estos avances han sido posibles no solo gracias a la optimización de materiales y el desarrollo de herramientas analíticas avanzadas, sino también a la evolución en los métodos de construcción. La digitalización, la modelización computacional y la monitorización en tiempo real han permitido el diseño de puentes más eficientes, seguros y económicos. La voluntad de salvar dichas alturas o grandes luces pone de manifiesto la necesidad de mejorar los métodos constructivos, permitiendo su ejecución mediante tecnologías que aseguren la integridad estructural, al mismo tiempo que minimicen los tiempos de construcción y los costes, lo que lleva al desarrollo de métodos tales como el de avance por voladizos sucesivos.

Históricamente, podemos distinguir tres grandes familias de puentes según su tipología estructural: los **puentes rectos**, donde la viga es el elemento resistente y la flexión generalizada es el mecanismo de transporte de las cargas; los **puentes arco**, donde se dispone el material según la geometría que le otorga su nombre y donde las acciones se transmiten mediante esfuerzos de compresión; y los **puentes colgados**, con la forma inversa a los puentes arco, por lo que su mecanismo resistente se basa en esfuerzos de tracción.

Siguiendo esta clasificación, se ha focalizando la atención en los puentes rectos, distinguiendo ahora dos tipologías representativas de la evolución constructiva moderna: los **puentes atirantados** y los **puentes de viga continua**, principales puentes que se ejecutan mediante el método de voladizos sucesivos, y, por tanto, donde la caída del carro de avance objeto de este estudio es una situación de diseño. Los primeros, mediante sus tirantes, permiten salvar grandes luces con estructuras esbeltas y estéticamente atractivas; los segundos, gracias al método constructivo empleado, demuestran una alta eficiencia en la realización de infraestructuras complejas y de gran envergadura.

## 1.2. Construcción mediante voladizos sucesivos

El método de construcción mediante voladizos sucesivos consiste en la construcción del tablero del puente descansando su encofrado inicial sobre un punto de apoyo y avanzando en la dirección longitudinal de dicho tablero, *Figura 1*.

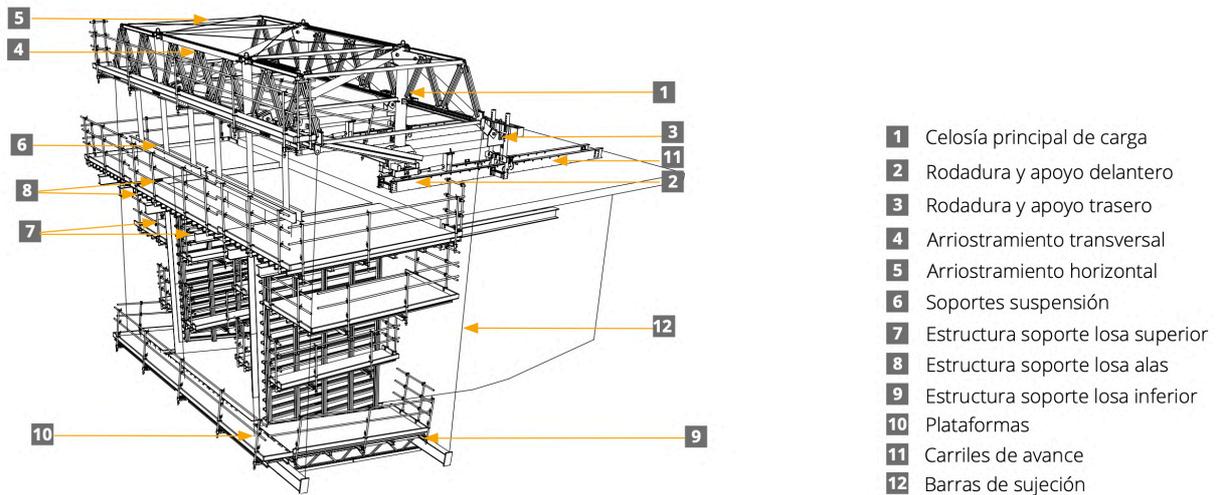


Figura 1. Esquema de un carro de avance en voladizos sucesivos [3].

En primer lugar, se construyen las pilas para dar comienzo a la construcción del puente desde ellas. Se empieza a construir la dovela 0 del tablero empleando un encofrado tradicional, *Figura 2*.

Construida la dovela 0, se tiene espacio suficiente para apoyar el carro de encofrado (o carro de avance en voladizo) en la cabeza de la pila. Se arma la estructura (metálica) del carro, se monta la armadura de la primera dovela y se da comienzo al hormigonado de la misma, construyendo así la dovela 1.

Esto permite el espacio suficiente para seguir avanzando el carro a este lado del tablero, e iniciar el mismo procedimiento en el sentido contrario de avance, de modo que la estructura crece en sendas longitudes, *Figura 3*.



Figura 2. Encofrado de dovela 0 en el Puente Allcomachay (Perú), [3].



Figura 3. Construcción simétrica mediante el carro de avance en el Puente Allcomachay (Perú), [3].

Una vez alcanzada la resistencia suficiente de la dovela ejecutada, se tesan los armados y se continúa avanzando la construcción de las siguientes dovelas, *Figura 4*, siguiendo el mismo procedimiento hasta alcanzar el punto central del vano, donde tendrá lugar la construcción de la dovela de cierre (clave), normalmente construida mediante encofrado tradicional para ajustar así su geometría.



Figura 4. Construcción del viaducto del tren eléctrico de Lima, Perú, mediante carro de avance, [3].

Se ha explicado este procedimiento iniciando la construcción del tablero desde las pilas, que da lugar a un avance simétrico desde un apoyo intermedio del puente hacia la dovela de cierre de cada vano, generando el equilibrio de la estructura en fase de ejecución mediante la compensación geométrica. Sin embargo, también podría explicarse este mismo procedimiento arrancando la construcción desde los estribos, donde la simetría arrancararía desde cada apoyo extremo del puente, con el empotramiento en el terreno, hacia la dovela central del tablero.

Considerando el procedimiento, queda claro que deben realizarse dos cálculos diferenciados a la hora de definir y estudiar estos puentes, uno para la fase de servicio, donde el puente consistirá en una estructura en equilibrio en su posición definitiva; y otro para la fase de construcción, donde la característica que define el cálculo de estos puentes es que este debe entenderse como una estructuras en voladizo que varía su posición de equilibrio en función de la fase en que se encuentren, y, por tanto, sus esfuerzos y deformaciones deben considerarse igualmente variables con el tiempo.

### 1.3. Introducción al cálculo dinámico

Como se indica en el apartado anterior, el cálculo para la fase constructiva depende de características variables en el tiempo, es decir, que requieren de la aplicación de cálculos dinámicos.

En general, los análisis se realizan frente a cargas estáticas por la sencillez de los cálculos y el amplio conocimiento al respecto, ya que la experiencia y el uso de coeficientes de mayoración validan estos métodos. Sin embargo, no siempre puede realizarse el análisis mediante la simplificación en sistemas estáticos, para lo cual, un buen diseño debe contemplar las consideraciones dinámicas, especialmente en estructuras sometidas a cargas dinámicas como podrían ser el viento, el sismo, las propias cargas de tránsito como ocurre en los puentes de ferrocarril, o cargas accidentales debidas a explosiones, entre otras.

Para llegar a la ecuación fundamental del movimiento, se parte de nociones comúnmente conocidas, pues el cálculo dinámico se basa en los principios fundamentales de la mecánica clásica.

La **primera ley de Newton**, donde se enuncia que un cuerpo permanecerá en reposo a menos que una fuerza externa no equilibrada actúe sobre él,  $\sum F=0$ .

Así como la **segunda ley de Newton**, que expone que la aceleración de un objeto será directamente proporcional a la fuerza que actúe sobre él e inversamente proporcional a su masa:  $a = F/m$ , es decir,  $F = m \cdot a$ .

El **principio de conservación de la energía**, que denota que la energía se transforma, con el sumatorio de las energías cinética (U) y potencial (P) de un sistema constante en el tiempo, es decir,  $U(t) + P(t) = 0$ .

Y el **principio de Alembert**, donde se transforman las formulaciones de Newton para explicar el problema dinámico como el equilibrio entre la fuerza aplicada (F) y la fuerza de inercia ( $m \cdot a$ ), notando la ecuación siguiente:  $F - m \cdot a = 0$ .

### 1.3.1. Sistemas de 1 GDL

El sistema de 1 grado de libertad (GDL) es el más utilizado a la hora de analizar estructuras por tratarse de un modelo matemático sencillo, aunque no siempre es capaz de representar con precisión el comportamiento real de una estructura. El caso más sencillo parte de la ausencia de amortiguamiento, mecanismo de disipación de energía, y está conjugado por el movimiento de una masa respecto al sistema de referencia y un resorte acoplado a la misma con comportamiento lineal.

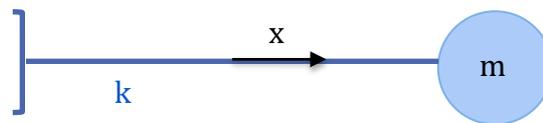


Figura 5. Sistema de 1 GDL.

En particular, para los puentes construidos mediante el método de voladizos sucesivos, el análisis durante la fase constructiva consistiría en simplificar la estructura conforme al voladizo del tablero del puente, estudiándolo como una barra empotrada en un extremo y libre en el opuesto, donde se concentra la masa, y con la carga del carro pendida actuando como una fuerza sobre dicho extremo.

Analizando el voladizo como un resorte con masa, se puede hacer uso de la ecuación del movimiento o ecuación del equilibrio dinámico,

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0 \quad [\text{Ec. 1.a}]$$

donde,

m: masa

k: constante de rigidez

x: desplazamiento

$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ : aceleración

Se explica que, el sistema debe permanecer en equilibrio, para lo cual, en el momento en que exista una aceleración, la masa concentrada es la encargada de transmitir la fuerza de inercia que será contrarrestada mediante la resistencia al movimiento ejercida por el muelle, y proporcional al desplazamiento producido [4].

Es importante destacar la importancia de la fuerza de inercia en este estudio en base a esta formulación, puesto que en los casos en que la masa  $m \ll 1 \rightarrow m \cdot a \approx 0$ , es decir, la fuerza de inercia sería despreciable en la formulación. Sin embargo, las estructuras de puentes son estructuras másicas, por tanto, su fuerza de inercia es alta, lo que justifica la importancia del cálculo dinámico ante solicitaciones bruscas, como la caída del carro, que inducen la vibración de la estructura.

Del estudio del resorte, es bien conocida la obtención de la frecuencia natural ( $\omega$ ):

$$k = \omega^2 \cdot m \rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \quad [\text{Ec. II}]$$

Y, por tanto, la ecuación del movimiento se puede expresar como sigue:

$$\ddot{x} + \omega^2 \cdot x = 0 \quad [\text{Ec. III}]$$

Que, sustituyendo por identidades trigonométricas, resulta la siguiente solución,

$$x = A \cdot \text{sen}(\omega t) + B \cdot \text{cos}(\omega t) \quad [\text{Ec. IV}]$$

Las constantes A y B se pueden obtener en función de las condiciones de contorno. Considerando que el instante inicial es  $t = 0$ :  $\{x = X_0 = B; \dot{x} = \frac{dx}{dt} = V_0 = A\omega\}$ , se tiene que la ecuación queda como sigue:

$$x = V_0 \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot \text{sen} \left( \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t \right) + X_0 \cdot \text{cos} \left( \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t \right) \quad [\text{Ec. V.a}]$$

En el caso que se está estudiando, se analiza el sistema sometido a una carga estática (F) debida al peso del carro, la cual produce un desplazamiento inicial en la estructura. Cuando la fuerza F del carro de avance desaparece repentinamente, la estructura parte del desplazamiento  $X_0$  generado en el instante inicial ( $t = 0$ ), cuyo valor será directamente proporcional a la fuerza ejercida por el peso del carro pendiente del extremo libre del voladizo, *Figura 5*.

Así, siguiendo el procedimiento anteriormente descrito, para el instante inicial  $t = 0$  y partiendo del reposo, donde  $V_0 = 0$ , el desplazamiento inicial tiene valor  $X_0 = -\frac{F}{m \cdot \omega^2} = -\frac{F}{k}$ , y la ecuación resultante queda ahora como sigue:

$$x = X_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right)$$

O lo que es lo mismo,

$$x = -\frac{F}{k} \cdot \cos(\omega t) \quad [\text{Ec. V.b}]$$

Nótese que el valor negativo del desplazamiento indica que, inicialmente, la estructura está desplazada en sentido descendente.

Si dividimos la ecuación anterior por  $F/k$  (desplazamiento estático), se puede obtener directamente el valor de la amplificación dinámica. Así, tanto si analizamos la formulación, como las gráficas que le dan forma, *Figura 5* y *Figura 7*, respectivamente, podemos observar cómo, para sistemas de 1GDL, el desplazamiento y el esfuerzo del muelle, el axil, están totalmente en fase, es decir, en el instante de desplazamiento máximo también concurre el máximo esfuerzo interno.

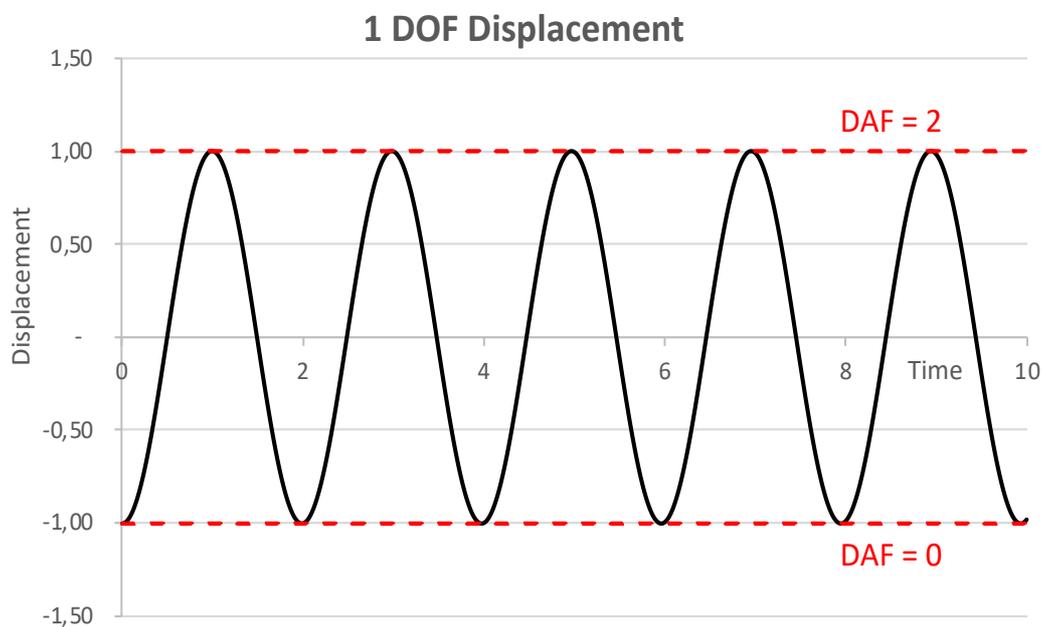


Figura 6. Representación gráfica de la Ecuación V.b. del desplazamiento, X, respecto del tiempo.

Multiplicando los valores de desplazamiento obtenidos a lo largo del tiempo por la constante de rigidez, se obtiene el valor del esfuerzo axil, N, en cada instante.

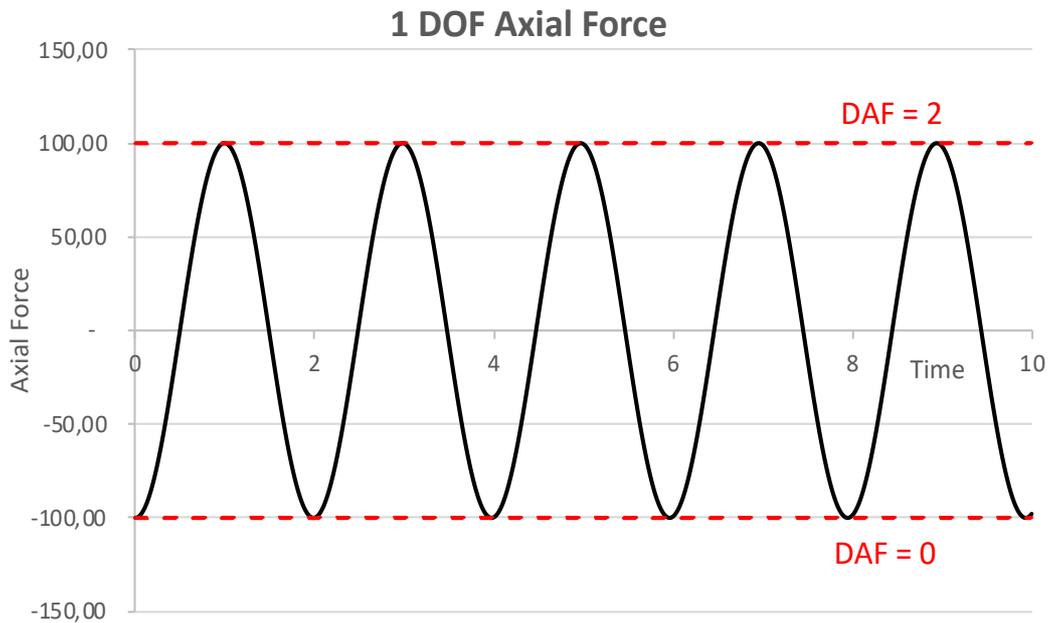


Figura 7. Representación gráfica del esfuerzo axial, N, respecto del tiempo.

Si se calcula el valor máximo obtenido para la *Ecuación V.b*, es decir, cuando se cumple la igualdad  $\cos(\omega t) = -1$ , resulta que

$$\Delta x = X_0 - (-X_0) = 2 X_0 \quad [\text{Ec. V.c}]$$

Lo que significa que, como se observa en la *Figura 6* y en la *Figura 7*, la relación entre la deformación dinámica de la estructura y la deformación estática debida a la desaparición de la fuerza  $F$  se corresponde con el factor de amplificación dinámica (DAF, por sus siglas en inglés: *Dynamic Amplification Factor*) igual a 2 para sistemas armónicos simples no amortiguados, donde  $F$  ha dejado de actuar instantáneamente. Nótese también que, tanto en desplazamientos, como en esfuerzos, nunca se sobrepasa el valor máximo inicial. Es decir, en los instantes posteriores, la vibración solo llega a igualar el valor del instante inicial.

### 1.3.2. Sistemas de 2 GDL

Para aquellos casos donde la realidad no puede explicarse con un único grado de libertad, es necesario adoptar un mayor número de estos. En lo que sigue, se explica el sistema de 2 GDL, cuyas conclusiones pueden trasladarse a un sistema de múltiples grados de libertad (N GDL).

Partiendo del sistema anterior de 1 GDL, se plantea el sistema de 2 GDL teniendo presente las siguientes consideraciones: (i) existen tantas frecuencias naturales como GDL se planteen en el sistema; (ii) aparece un vector que describe el movimiento relativo entre 2 GDL, el cual recibe el nombre de modo de vibración.

Para explicar las diferencias de este método, se va a partir del diagrama del sistema de 1 GDL, transformándolo ahora en un sistema de 2 GDL, *Figura 8*. Por simplicidad se va a explicar el funcionamiento del sistema con movimientos horizontales, pero es totalmente equiparable con movimientos verticales.

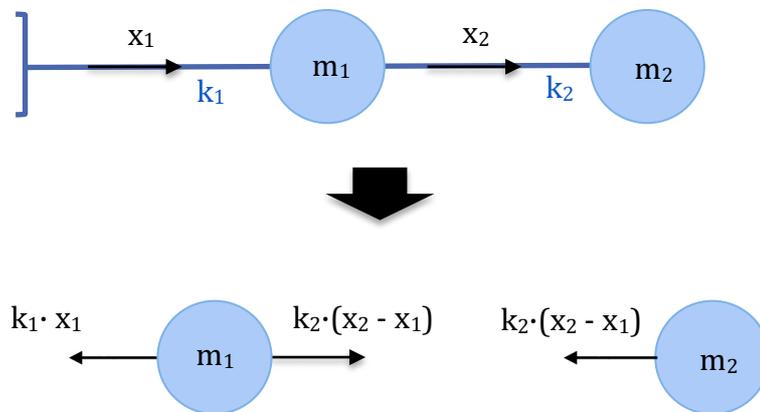


Figura 8. Sistema de 2 GDL.

Considerando ahora el diagrama de cuerpo libre definido en la *Figura 8*, la masa puede desplazarse ahora en las dos direcciones,  $x_1$  y  $x_2$ . Haciendo uso de las condiciones de contorno definidas en el sistema de 1 GDL, donde partimos del reposo ( $V_0 = 0$ ), obtendremos el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot (x_2 - x_1)$$

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 = -k_2 \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{Ec. VI}]$$

Se observa que se trata de ecuaciones linealmente dependientes; para poder sintetizarlas en una única ecuación, se hace uso del cálculo matricial, de donde resulta la siguiente ecuación:

$$M \cdot \ddot{\mathbf{x}} + K \cdot \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad [\text{Ec. VII.a}]$$

donde,

**M:** matriz de masa

**K:** matriz de rigidez

**F:** vector de fuerzas externas = **0**

Asumiendo la solución armónica no amortiguada, igual que en el caso de 1 GDL, se tiene la siguiente igualdad para el vector desplazamiento:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = \mathbf{u} \cdot e^{i\omega t} \quad [\text{Ec. VIII}]$$

donde  $e^{i\omega t} = i \cdot \text{sen}(\omega t) + \text{cos}(\omega t) \neq 0$ , por lo que debe cumplirse la siguiente igualdad:

$$(-\omega^2 \cdot M + K) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad ; \quad \mathbf{u} \neq \mathbf{0} \quad [\text{Ec. IX}]$$

donde,

$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T$  : vector de modos de vibración

Por tanto, resolviendo la ecuación se obtendrá el sistema formado por las siguientes ecuaciones, donde resultarán tantas frecuencias naturales y modos de vibración como GDL tengamos:

$$(-\omega_i^2 \cdot M + K) \cdot \mathbf{u}_i = \mathbf{0} \quad [\text{Ec. X.a}]$$

Para resolver el sistema propuesto en la *ecuación X.a* podría realizarse el cálculo mediante el uso de auto-valores y auto-vectores, que se trata de un análisis matemático que simplifica los cálculos [5] y es el que posteriormente se implementará en el uso del software que más adelante se mencionará.

Así, cabe notar que, si multiplicamos la *ecuación VII.a* por la inversa de la matriz de masa, esta resulta como sigue:

$$I \cdot \ddot{\mathbf{x}} + M^{-1} \cdot K \cdot \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad [\text{Ec. VII.b}]$$

Por tanto, al aplicar la igualdad de la *ecuación VIII*, se obtiene la siguiente variación de la *ecuación X.a*:

$$(-\omega^2 \cdot I + M^{-1} \cdot K) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad [\text{Ec. X.b}]$$

Si definimos ahora las siguientes igualdades:  $\lambda = \omega^2 \cdot I$  y  $A = M^{-1} \cdot K$ , la ecuación anterior queda como sigue:

$$\lambda \cdot \mathbf{u} = A \cdot \mathbf{u} \quad [\text{Ec. XI}]$$

donde,

$\lambda$ : auto-valores

$\mathbf{u}$ : auto-vectores

Para que la solución sea no trivial ( $\mathbf{u} \neq \mathbf{0}$ ), debe cumplirse la siguiente igualdad:

$$\text{Det}(-\omega^2 \cdot M + K) = 0 \quad [\text{Ec. XII}]$$

De donde se obtienen los auto-valores y, por tanto, las frecuencias naturales del sistema,  $\omega_1$  y  $\omega_2$ .

Seguidamente, para cada valor de frecuencia natural, se resuelve la *ecuación X.b*, de donde se tendrán los vectores propios,  $u_1$  y  $u_2$ , que representan los modos de vibración del sistema.

Para los casos que nos acontecen, podríamos interpretar estos resultados como que el puente tiene un primer modo de vibración ( $u_1, \omega_1$ ) donde se produce un desplazamiento inicial debido a la presencia del carro de avance y cuya frecuencia de vibración es  $\omega_1$ . Igualmente, el segundo modo de vibración ( $u_2, \omega_2$ ), cuya frecuencia de vibración  $\omega_2$  también sufre un desplazamiento inicial debido a la presencia del peso del carro.

En la posición de equilibrio, las reacciones elásticas de los desplazamientos iniciales de cada modo de vibración equilibran el peso del carro. Sin embargo, cuando este desaparece bruscamente, ambos modos empiezan a vibrar partiendo de su desplazamiento inicial. Nótese que en la *Figura 9* se muestra cómo el desplazamiento inicial de ambos modos tiene signo distinto, esto es debido a que la deformada estática generada por la presencia del peso del carro tiene que ser obtenida como suma de las deformadas de ambos modos (para este ejemplo), y, por tanto, conseguir esa deformada puede suponer sumar y restar modos.

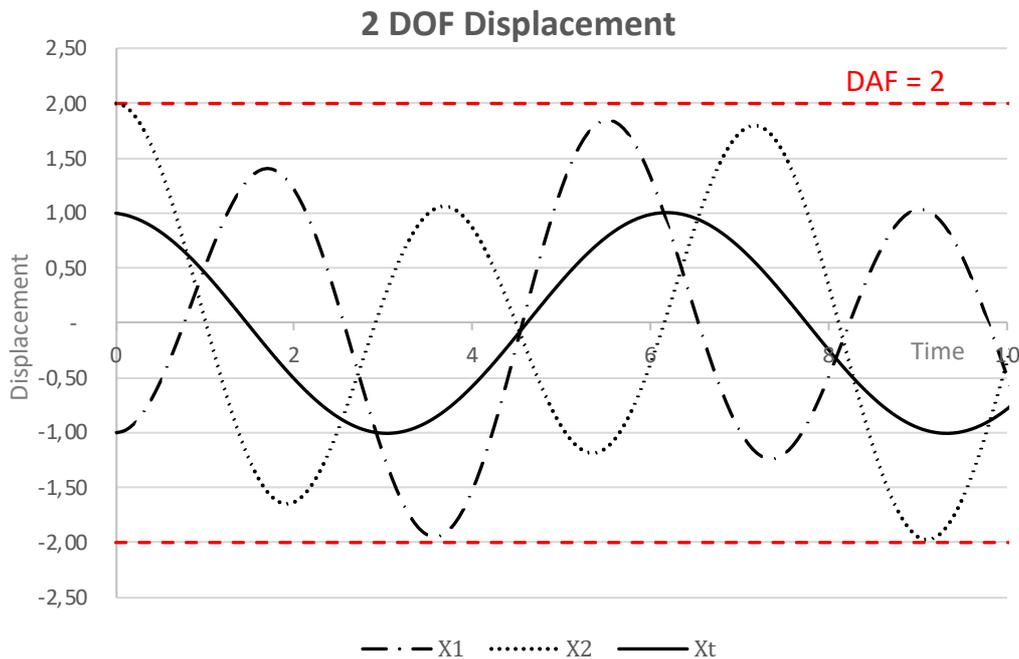


Figura 9. Representación gráfica del desplazamiento de cada modo de vibración respecto del tiempo en un sistema de 2 GDL.

Al igual que en el caso de 1 GDL, se representan los esfuerzos axiales en la *Figura 10*, en este caso, de ambos modos, así como la suma total.

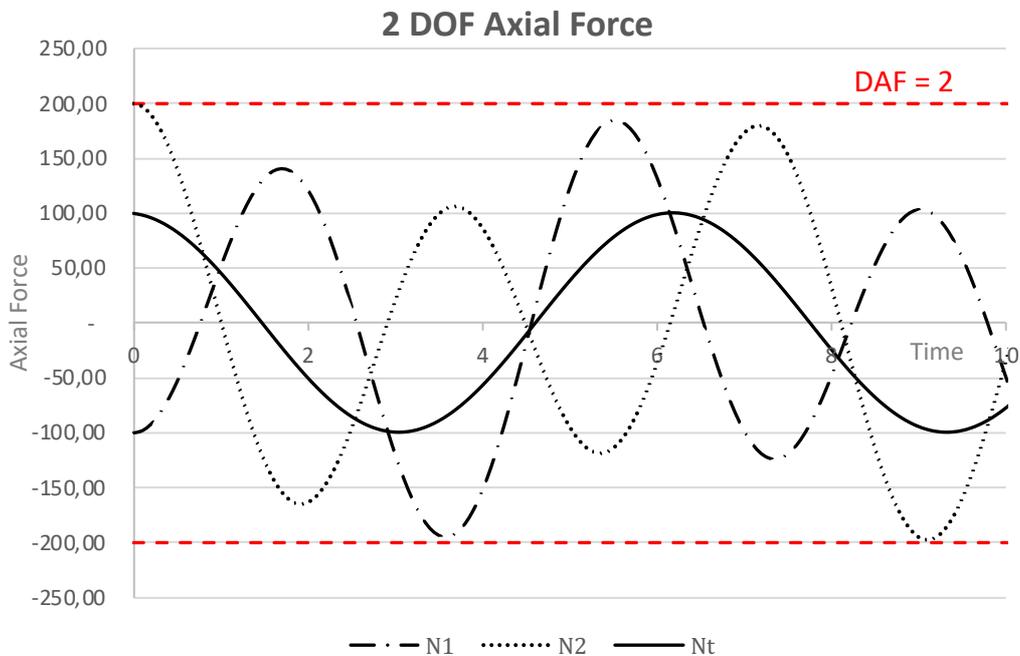


Figura 10. Representación gráfica de los esfuerzos axiales del sistema de 2 GDL respecto del tiempo.

Como puede observarse, el factor de amplificación dinámica (DAF) en los desplazamientos (*Figura 9*) no es igual al DAF de esfuerzos (*Figura 10*), ni tiene por qué ser igual a 2 en ninguno de los casos. Esto se debe a que inicialmente el esfuerzo puede ser el resultado de restar ambos modos, por lo que el DAF puede darse en un instante posterior al inicial. También, debido a la vibración independiente de cada modo, estos pueden sumarse en vez de restarse, dando lugar a una amplificación mucho mayor. Es decir, el  $DAF = 2$  no será la solución por defecto.

Ahora que se han expuesto algunas nociones básicas del cálculo dinámico, centraremos la atención en el caso de estudio, que es el factor de amplificación dinámica necesario a la hora de realizar los cálculos para el caso accidental de la caída de un carro de avance (en adelante, ARFT, por sus siglas en inglés: *Accidental Release of the Formwork Traveller*) durante la fase de construcción de puentes empleando el método de avance en voladizos sucesivos. Para ello, es necesario comprender con claridad como abordan las normativas de cálculo de estructuras de puentes esta hipótesis de diseño.

#### 1.4. Normativas de aplicación

La construcción de puentes mediante el método de avance en voladizo requiere considerar la ARFT durante la fase de diseño de acuerdo con las principales normativas internacionales. Esta situación es crítica desde el punto de vista del diseño, ya que podría comprometer la seguridad estructural del puente por someterlo a cargas no previstas. Es por ello que las normativas internacionales, como el Eurocódigo, la norma AASHTO, la Setra, y normativas nacionales como la Norma Española IAP, exigen la evaluación de esta situación, entre otras tantas situaciones accidentales susceptibles de ocurrencia durante la fase de diseño del puente.

A continuación, se expone de forma concisa lo que las citadas normativas concluyen para la situación accidental de la caída del carro de avance durante la fase constructiva.

- **Eurocódigo (*Eurocode*)**

El Eurocode 1 [6], en su artículo 4.12 del apartado 1.6. *Acciones durante la construcción*, especifica la consideración de cargas dinámicas y eventos accidentales, sugiriendo la evaluación del impacto producido con la caída accidental

del carro mediante el uso de un DAF igual a 2 veces el peso de la carga estática susceptible de caída, simplificando así su análisis.

- **AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)**

La norma AASHTO [7], de aplicación en Estados Unidos para el diseño de puentes, especifica en su artículo 7.4.1. *Erection Loads During Construction* del documento *Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, Second Edition 1999*, la consideración de cargas dinámicas asociadas a la caída accidental de equipos de construcción, como un carro de avance, permitiendo un enfoque simplificado mediante un DAF igual a 2 que multiplique la carga estática durante la caída; además de la realización de análisis dinámicos detallados cuando fuese necesario.

- **Setra (*Service d'études techniques des routes et autoroutes*)**

La norma francesa [8] que proporciona directrices para el diseño y la construcción de puentes, establece en su artículo 5.3.3. *Accidental actions* la realización de análisis específicos para evaluar la estabilidad del carro de avance, incluyendo aquí los efectos dinámicos resultantes de su caída accidental, para lo que propone tanto análisis dinámicos detallados, como métodos simplificados.

Mientras que en los métodos simplificados se especifica el empleo de un DAF de 2, en el caso de los análisis dinámicos detallados no se especifica cuáles deben ser estos.

- **Norma Española IAP (*Instrucción sobre las Acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de carretera*)**

El artículo 5.3.1 *Caída de un carro de avance en fase de construcción* de la norma [9] aborda la necesidad de evaluar la caída accidental del carro, considerando tanto el impacto estático, como el dinámico que esta implica. Debido a la ausencia de estudios más precisos, sugiere añadir a la hipótesis de caída, una fuerza ascendente de valor igual al peso de dicha carga, simplificando de este modo el cálculo dinámico, es decir, igual que en los casos anteriores, aplica un DAF igual a 2.

En resumen, para abordar este problema, las citadas normas proponen dos enfoques: un análisis dinámico específico, siempre que sea posible evaluar y detallar los efectos asociados, y un método simplificado, comúnmente utilizado. Del análisis

específico, ninguna de las normativas establece directriz alguna o procedimiento a seguir; mientras que el método simplificado, propone, en todos los casos, multiplicar el peso estático susceptible de caída por un DAF igual a 2 para considerar los efectos dinámicos, es decir, considerar una fuerza ascendente de valor igual al peso de dicha carga. Este enfoque se basa en la respuesta del sistema de 1 GDL que se ha explicado en el apartado , donde la liberación abrupta de la carga que produce el desplazamiento inicial ( $X_0$ ), en ausencia de amortiguamiento, resulta en un desplazamiento máximo de igual magnitud, pero de signo opuesto. De este modo, cualquier disipador de energía, o una liberación de carga no instantánea, resultaría en una amplificación inferior a 2, por lo que la normativa establece este DAF máximo, siendo el caso más desfavorable, para asegurar que el diseño esté del lado de la seguridad.

Aunque estos enfoques buscan asegurar la resistencia de la estructura frente a eventos imprevistos (accidentales) durante su fase de construcción, minimizando los riesgos y garantizando la seguridad global, dado que los puentes son sistemas de múltiples grados de libertad, su comportamiento difiere de la simplificación del mismo como un problema analizado con el sistema de 1 GDL, por lo que se ha de recurrir al análisis dinámico específico para obtener resultados más precisos. Sin embargo, como se ha comentado, las normas no proporcionan directrices detalladas al respecto, dejándolo al criterio del ingeniero.

Indagando en la aplicación del cálculo dinámico en estructuras de puentes, es conocido que, actualmente, se investigan distintos enfoques que analizan las cargas pseudo-instantáneas en relación a impactos sobre las estructuras, cargas impulsivas o relacionadas con explosiones. Así mismo, se estudian analítica y numéricamente las vibraciones en puentes durante su fase de construcción, de modo que existen distintos estudios para los casos de viento, sismo e, incluso, de cargas debidas al movimiento de los trenes de alta velocidad.

Sin embargo, el enfoque relacionado con situaciones accidentales se ha llevado a cabo para fallos repentinos en los cables, pero no se han encontrado investigaciones experimentales donde se aborde el problema de la ARFT. Por su parte, también se están elaborando investigaciones acerca de los carros de avance debido a la necesidad de construir segmentos de puentes de mayor envergadura empleando análisis más precisos, sin embargo, centran su atención en el carro, sin hacer un estudio directo de la afectación del mismo sobre el puente, de modo que la ARFT y

su efecto en los puentes no han sido debidamente estudiados. Esta carencia documental es la principal motivación de este estudio[1], ya que, como se ha concluido antes, a pesar de que las normativas tienen en cuenta cálculos preventivos a la hora de diseñar las mencionadas tipologías de puentes, no terminan de desarrollarse una pautas específicas frente al estudio de la posible caída accidental de dicho carro, donde resulta de interés el análisis de sus efectos dinámicos, ya que al desencadenarse este fenómeno, debido a errores mecánicos, podría implicar el colapso de los sucesivos segmentos del puente, suponiendo un gran peligro durante su ejecución[10].

## 2. Material y metodología

A continuación, se exponen más detalladamente los puentes analizados para cada tipología, así como los distintos carros de avance ensayados.

En el caso de los puentes, el método de avance en voladizos sucesivos permite la construcción en terrenos complicados, evitando el uso de andamios y apoyos temporales, por lo que es una opción ventajosa en zonas de difícil acceso o con necesidad de salvar grandes luces.

Además, se trata de un método de construcción que permite adaptarse a variedad de configuraciones estructurales, lo que le convierte en una buena opción para la construcción de puentes atirantados, puentes de viga continua, híbridos, e incluso puentes arco de hormigón, por lo que todos ellos son susceptibles de ser analizados bajo las premisas de las citadas normativas.

### 2.1. Casuística

Se exponen a continuación las tipologías de puentes y carros que se han analizado para este estudio en concreto, así como las características que los definen.

#### 2.1.1. Puentes analizados

Para la experimentación del factor de amplificación dinámica (DAF) se han escogido las dos tipologías principales de puentes donde se emplea el carro de avance en voladizo como mecanismo de construcción del tablero, estos son el puente atirantado y el puente de viga continua.

Para analizar cada tipología, se ha seleccionado un puente diseñado por la empresa Arenas&Asociados: el Puente Bioceánico, que conecta Paraguay y Brasil, para el caso del puente atirantado; y el Puente Chilina, ubicado en Perú, para el caso del puente de viga continua.

### 2.1.1.1. Puente Bioceánico

El Puente Bioceánico, cuyo diseño pertenece a Arenas&Asociados, quien también ha participado en su proyecto de construcción, recibe su nombre por estar situado en el Corredor Bioceánico (*Figura 11*), vía que conecta los océanos Atlántico y Pacífico, atravesando Brasil, Paraguay, Argentina y Chile, reduciendo los tiempos y costes de transporte, hecho que mejora las relaciones comerciales. Situado sobre el Río Paraguay, une las ciudades de Puerto Murtinho, en Brasil, y Carmelo Peralta, en Paraguay, se trata de una estructura de gran relevancia por mejorar, además de la conexión entre países, el desarrollo económico y la integración de las regiones.

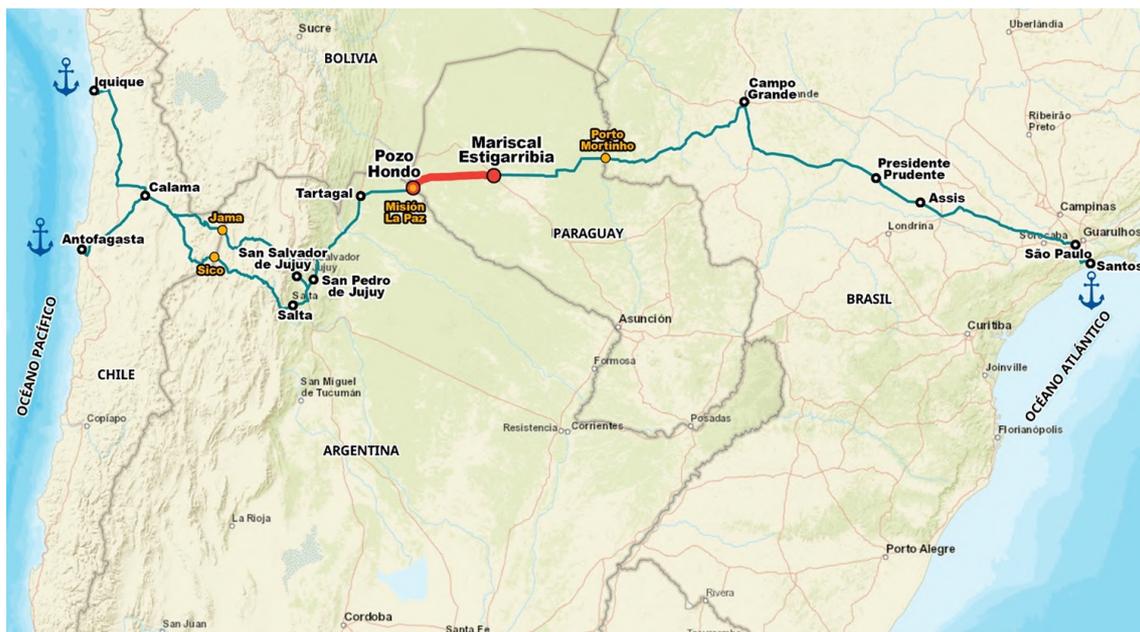


Figura 11. Corredor Bioceánico [11].

El Puente Bioceánico consta de 3 tramos, dos viaductos de acceso formados por pilas de hormigón sobre las que apoyan vigas simples, y el tramo central atirantado. El viaducto situado en la margen brasileña cuenta con 275 m de longitud, mientras que el de la margen paraguaya tiene 305 m de longitud. Por su parte, el tramo atirantado tiene una luz principal de 350 m cruzando el río Paraguay, así como dos tramos

simétricos de contención formados por 3 vanos, de unos 50 m, 44 m y 44 m, respectivamente hacia cada orilla (*Figura 12 y Figura 13*).

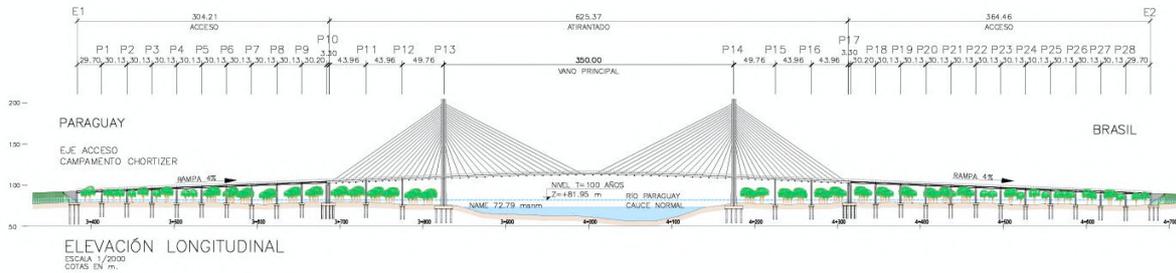


Figura 12. Vista longitudinal del Puente Bioceánico [12].

Las torres soportan, cada una, dos planos de cables atirantados que llegan a un tablero construido mediante una losa de 27 cm de hormigón y dos vigas laterales, también de hormigón, de 1,65 m de altura cada una, que funcionan como líneas de anclaje de los tirantes. Además, el tablero cuenta con diafragmas transversales de hormigón de 40 cm de espesor, situados, aproximadamente, cada 3 m, así como en los tramos donde se ubican los tirantes. Cabe mencionar que la configuración del puente, diseñado para soportar grandes cargas que permitan la circulación de camiones, se compone de 2 carriles en cada sentido, de unos 3,60 m cada carril, así como vías peatonales/ciclistas situadas en ambos extremos del tablero (*Figura 13*). Por su parte, las pilas-torres (también llamadas pilonos), también de hormigón, tienen forma de H, alzándose unos 33 m desde la cota de arranque del terreno y 96 m sobre el tablero del puente (*Figura 14*).

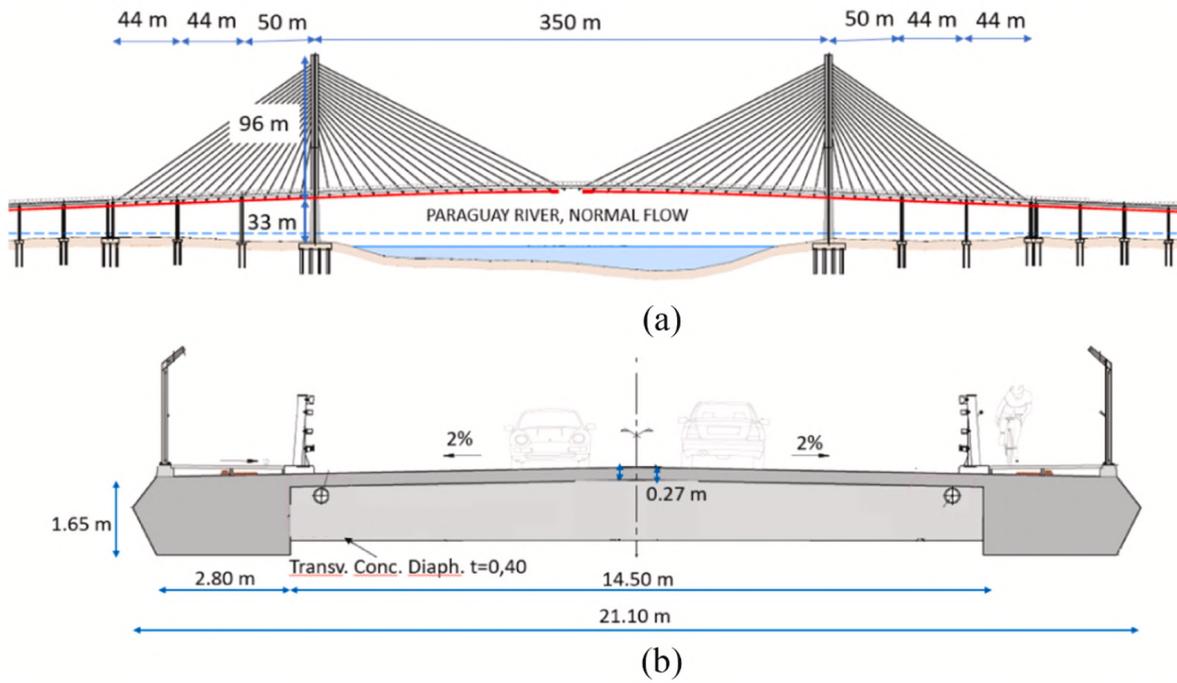


Figura 13. Vistas longitudinal (a) y transversal (b) del Puente Bioceánico [12].

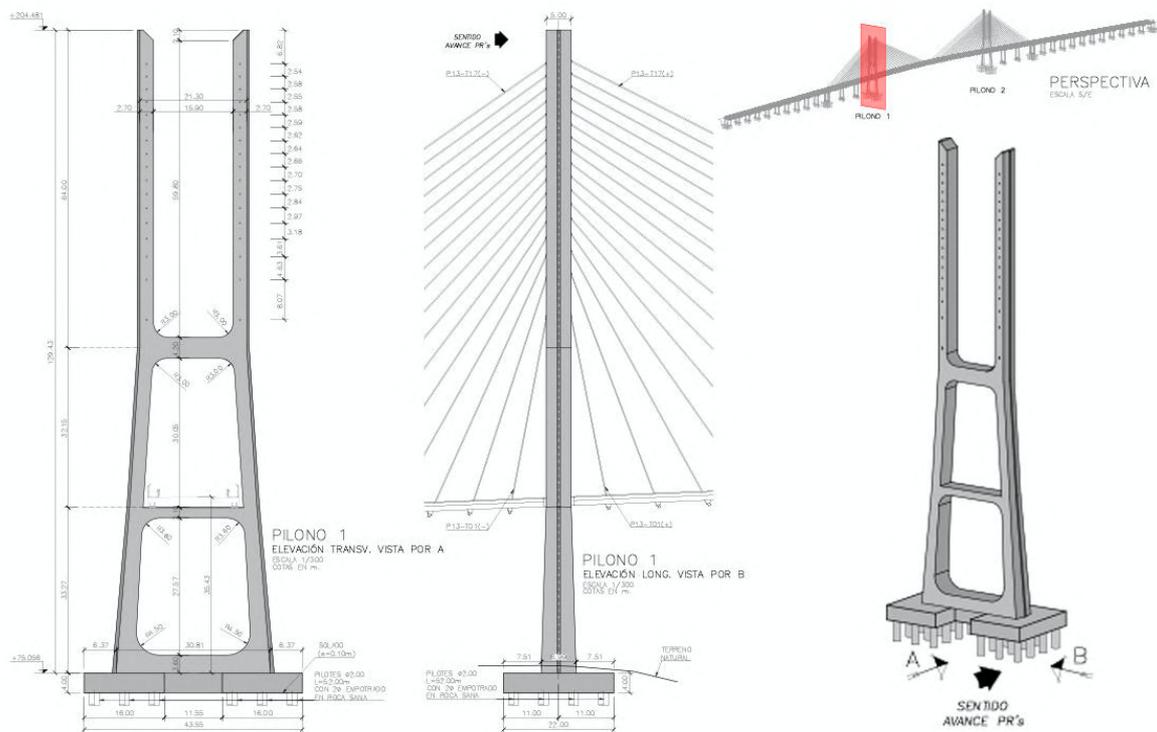


Figura 14. Torres del Puente Bioceánico [12].

La construcción del Puente Bioceánico se está llevando a cabo actualmente, *Figura 15*, y se prevé su finalización para el año 2026.



Figura 15. Vista general de la fase inicial de construcción de los estribos y las torres del Puente Bioceánico.

En las imágenes siguientes, se muestran distintas fases de construcción del puente, permitiendo visualizar desde los primeros elementos que lo componen, como el arranque de las torres en la *Figura 16*, hasta su inicio del proceso de construcción mediante el método de avance en voladizos, como puede observarse en la *Figura 17* y en la *Figura 18*.



Figura 16. Montaje de las torres del Puente Bioceánico vista en dirección al río Paraguay.



Figura 17. Montaje de la torre del Puente Bioceánico situada en la orilla de Carmelo Peralta.



Figura 18. Fase de montaje del carro de avance sobre la dovela 0.



Figura 19. Vista general de la fase de montaje del carro de avance sobre la dovela 0.

Como se indicaba, su construcción en el tramo atirantado es mediante el método de voladizos sucesivos, arrancando la construcción del tablero desde cada una de las pilas-torres hacia el centro de luz, *Figura 20* y *Figura 21*, uniéndose ambos lados del tablero en el punto medio del vano central; situación en la cual se encontrará el tablero en su máximo voladizo a ambos lados, con una longitud de unos 175 m, cada tramo, antes de unirse. El armado de los pilonos principales de este puente estuvo condicionado por la situación de caída del carro, considerada según la normativa AASHTO.



Figura 20. Vista del carro de avance empleado para la construcción del vano central del Puente Bioceánico.



Figura 21. Vista del frente de avance del carro.

### 2.1.1.2. Puente Chilina

Para el caso del puente de viga continua, se ha escogido el Puente Chilina, diseñado también por Arenas&Asociados. Este puente, cuya construcción finalizó en el año 2014, se ubica en Perú, concretamente, en la ciudad de Arequipa, cruzando el valle Chilina sobre el río Chili, *Figura 22*. El Puente Chilina ha sido tema de exposición en diversos congresos debido a su notable importancia [13], es un ejemplo de cómo una infraestructura bien planificada puede tener un impacto positivo en el entorno,

pues al tratarse de la segunda ciudad más grande del país y no tener conexiones previas entre distritos en la zona norte de la ciudad (donde se sitúa dicho puente), esta estructura ha permitido una significativa mejora en la movilidad y las conexiones entre los distritos más poblados y en crecimiento, así como su desarrollo económico y social.



Figura 22. Puente Chilina en la ciudad de Arequipa [13].

Este puente de hormigón pretensado con viga continua de canto variable (*Figura 23*) se compone de 5 vanos de 100+157+142+102+62 m (*Figura 24*) y, como se anunciaba al principio, se ha ejecutado mediante el método de voladizos sucesivos, en este caso, con una configuración tipo T entre pila-tablero, es decir, avanzando simétricamente en ambos sentidos desde cada pila (*Figura 25*). Como puede observarse en la *Figura 24*, el vano de mayor luz es el comprendido entre las pilas P1 y P2, donde se alcanzó un voladizo máximo del tablero de unos 78 m durante su fase de construcción.

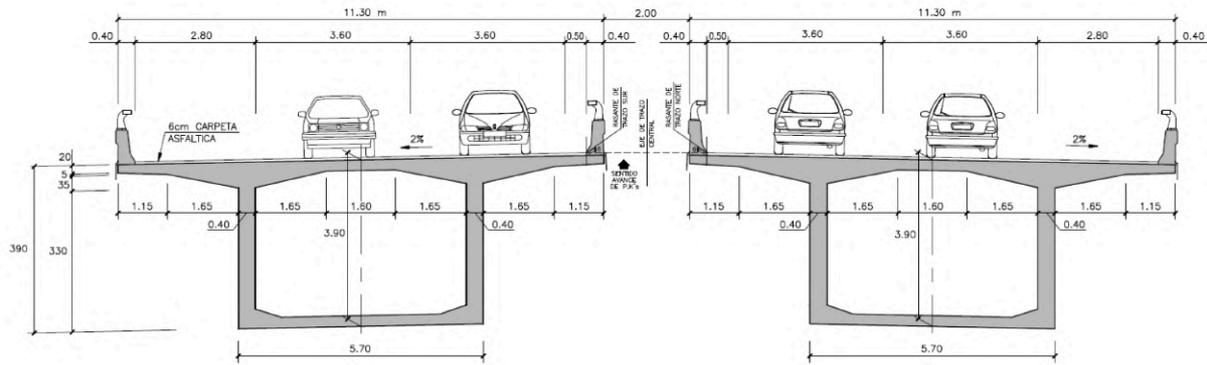


Figura 23. Sección transversal tipo en centro de luz [14].

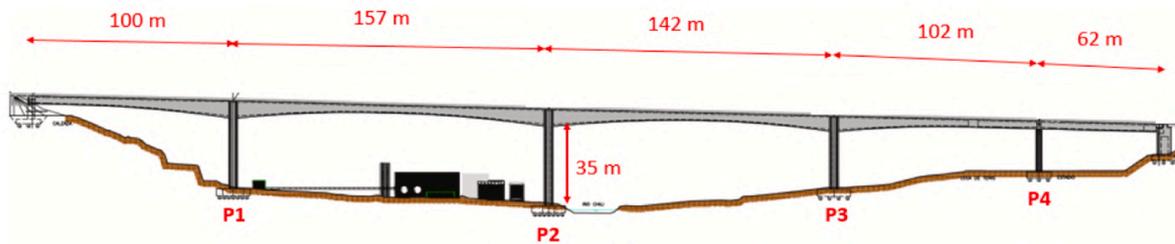


Figura 24. Sección longitudinal del Puente Chilina [14].



Figura 25. Fase de construcción de los tableros [14].

El puente lo forman dos tableros paralelos de 11,30 m de ancho total, cada uno, y canto variable entre los 8,70 m en arranques hasta los 3,90 m en centros de luz. Dichos tableros se empotran en las pilas P1, P2 y P3, desde donde se construye empleando el método de avance en voladizo. Dichas pilas son independientes, pero con cimentación común de pilotes, y tienen una sección transversal cuasi-rectangular, de las cuales, la más esbelta es la pila P2, con 35 m de altura desde la cota de arranque hasta la parte inferior del tablero.

### 2.1.2. Carros analizados

El método de construcción mediante carro de avance en voladizo está indicado cuando los puentes a construir cumplan al menos una de las siguientes características: cuando la altura de las pilas sea elevada, cuando existan grandes luces a salvar, o cuando el apeo de los tableros sobre terreno sea difícil de llevar a cabo. Esta metodología, además de facilitar la construcción de la estructura cuando se cumplen dichas características, permite mejorar la eficiencia, empleando una metodología más ágil y segura. En estos casos, el encofrado del tablero se realiza empleando el carro de encofrado o, más comúnmente conocido, el carro de avance.

Existen distintos carros de avance, la diferencia más fácil de percibir es la que distingue su posición, y en la que se ha centrado el presente estudio: situado sobre el tablero o colgado del mismo. Sin embargo, no está de más mencionar que existen otras características que pueden hacer distinción entre tipologías de carros, como se presenta a continuación.

- **Según su peso**

Por un lado, encontramos los carros ligeros, empleados en casos particulares de puentes con pequeñas luces o donde el peso del equipo debe ser minimizado. Al ser equipos de menor peso, su manipulación y montaje son más sencillas.

Por contraparte, los carros pesados, al estar diseñados para soportar grandes cargas, se trata de equipos más robustos y se emplean cuando la estructura consta de dovelas pesadas y grandes luces.

- **Según la configuración de su propia estructura**

Por un lado, podemos hablar de los carros con encofrado auto-trepante, el cual puede modificar su posición avanzando a medida que se van completando las dovelas del tablero, eliminando así la necesidad de grúas complementarias para su montaje y desmontaje y, por tanto, de gran utilidad en terrenos de difícil acceso.

Por otro lado, los carros modulares, al contrario que el auto-trepante, estos requieren del apoyo de una grúa adicional, pero ofrece la ventaja de poder adaptarse a geometrías y dimensiones variables puesto que está diseñado mediante componentes modulares que permiten su ensamblaje y des-ensamblaje según necesidad.

- **Con sistema de postesado integrado**

La metodología de avance en voladizos requiere del postesado de las dovelas que se van ejecutando, labor que se facilita con el uso de estos carros, pues llevan incorporados equipos que permiten realizar el postesado de manera simultánea a la construcción de las dovelas. Al no requerir un equipo adicional para realizar este trabajo, el uso de estos equipos es más costoso, pero permite resultados más eficientes.

- **Según su posición**

Hablamos aquí de los carros convencionales donde el encofrado puede situarse sobre o bajo el tablero. La elección de su tipología irá en función de la necesidad constructiva, así como las condiciones del entorno, sin embargo, la principal diferencia radica en la geometría del tablero del puente.

En primer lugar, los carros de encofrado superior se sitúan sobre el tablero y son más adecuados cuando las secciones superiores son anchas y la geometría es simple; es decir, cuando se trata de vanos rectos y puentes sin variaciones complejas en la sección transversal del tablero. Estos, al tener un avance constante, permiten un ritmo más rápido de trabajo.

En segundo lugar, los carros de encofrado inferior son indicados cuando la geometría es más compleja, ya que al situarse colgando del tablero se facilita la adaptación a los cambios de sección, considerando pendientes y curvaturas, tanto en el plano transversal del tablero, como en el longitudinal. Este sistema, aunque requiere un ritmo de avance más pausado, es más sofisticado en sus acabados.

Centrando la atención en estos últimos, a continuación se detallan las características a considerar en cada caso para el estudio que acontece. En adelante recibirán la siguiente nomenclatura por sus siglas en inglés: encofrado superior (*OverHead*, OH) y encofrado inferior (*UnderSlung*, US).

El carro OH se sitúa sobre el tablero del puente logrando la posición de equilibrio del conjunto mediante anclajes en la parte posterior del puente, *Figura 26*. Estos carros pueden emplearse en ambas tipologías estudiadas, tanto en puentes atirantados, como es el Puente Bioceánico, como en puentes de viga continua, como el Puente Chilina. Por su parte, la tipología de carro US se emplea habitualmente solo en puentes atirantados, pues necesitan anclarse a un tirante en su parte delantera

para conseguir ese equilibrio global de la estructura, *Figura 27*. La tipología US permite la ejecución de dovelas más largas que la OH y suele utilizarse para tableros tipo losa, mientras que la OH se usa normalmente en secciones tipo cajón.

Si hablamos de la estabilidad y operabilidad que permite cada tipología, es fácil pensar que el carro OH será una mejor opción en este sentido, ya que al estar alineado y anclado al tablero tiene una notable estabilidad de avance y permite una mejor accesibilidad para las operaciones de montaje y construcción, mientras que la tipología US puede presentar oscilaciones o mayores movimientos debidos a su posición suspendida, lo que exige sistemas adicionales de control para mantener su estabilidad durante las distintas operaciones. Así bien, aunque podría pensarse que el coste necesario para la tipología OH es inferior, los refuerzos adicionales en el tablero para soportar su carga pueden implicar un incremento sustancial de coste; por el contrario, en la tipología US la complejidad de instalación y sus sistemas de control implicarían un coste inicial elevado, sin embargo, los ahorros operativos al encontrarse fuera del plano del tablero podrían traducirse también en un ahorro económico.



Figura 26. Carro de avance en voladizos OH [15].



Figura 27. Carro de avance en voladizos US [16].

A modo de conclusión, en función de las necesidades del proyecto, los condicionantes del entorno, la geometría del puente, así como del presupuesto, puede escogerse la tipología de carro más adecuada a cada caso. No obstante, deberá llevarse a cabo un análisis global considerando los condicionantes arriba mencionados.

Igualmente, conviene referir que, respecto a los distintos análisis registrados, no existe actualmente recogida ninguna diferencia entre estas tipologías de carro de acuerdo al comportamiento estructural ante una potencial caída. El presente trabajo mostrará que sí existe una diferencia entre ambas tipologías a este respecto.

## 2.2. Modelo de elementos finitos

Para empezar, se va a responder a la pregunta *¿qué es un modelo de elementos finitos?*

El modelo de elementos finitos, denominado por sus siglas: MEF, es una representación matemática y computacional empleada para el análisis y resolución de problemas complejos de ingeniería.

La aplicación de este método desde el punto de vista estructural emplea una generalización del cálculo matricial donde se analizan las estructuras como sistemas continuos, que son transformados en mallas compuestas por un número finito de elementos (o nodos) interconectados entre sí, los cuales son definidos con sus propiedades materiales [17]. Así, el MEF aborda el sistema global complejo discretizándolo para que sea más manejable, de manera que, considerando unas determinadas condiciones de contorno y condiciones de partida, cada elemento estará definido por ecuaciones simples que describan su comportamiento y que, al combinarlas, permiten un análisis global más sencillo.

Conocida la respuesta, se puede entender la implementación del MEF para el análisis de estructuras que se va a realizar, puesto que su aplicación permitirá llevar a cabo un estudio donde pueda analizarse el comportamiento de las estructuras sometidas a distintos supuestos: condiciones de contorno, condiciones de carga, condiciones de partida, etc. Además, gracias a la utilización de softwares informáticos desarrollados para ello, se logra la obtención de un prototipo digital que implemente las distintas simulaciones a que se sometan las estructuras de puentes estudiadas mediante este método, ahorrando así recursos materiales y económicos una vez definidos los modelos, y permitiendo optimizar sus diseños, con resultados más eficientes y seguros acorde a los resultados obtenidos.

### 2.2.1. Software empleado

Para la presente investigación, se han modelizado tanto el Puente Bioceánico, como el Puente Chilina, haciendo uso del software *SOFiSTiK 2022*. Este programa de elementos finitos está especialmente diseñado para el análisis y diseño de estructuras, lo que le lleva a estar ampliamente utilizado en la modelización de puentes, tanto en los casos de análisis de situación estática, como dinámica [18], [19], [20]. *SOFiSTiK 2022* proporciona una plataforma integral para el modelado, análisis y diseño de estructuras complejas, permitiendo la optimización de proyectos, así como colaborando en la obtención de resultados eficientes y seguros.

El uso de este software tiene diversas ventajas gracias a las herramientas que lo componen. Pueden combinarse elementos gráficos de modelado, junto con código computacional, permitiendo la integración e interoperabilidad entre ambas formas, y ofreciendo resultados tanto numéricos, como gráficos; incluyendo la reproducción

del comportamiento dinámico estructural mediante la video-simulación geométrica de situaciones previamente definidas y calculadas.

Tal y como se ilustra en la *Figura 28*, el flujo de trabajo de *SOFiSTiK* se organiza en tres etapas: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento de datos.

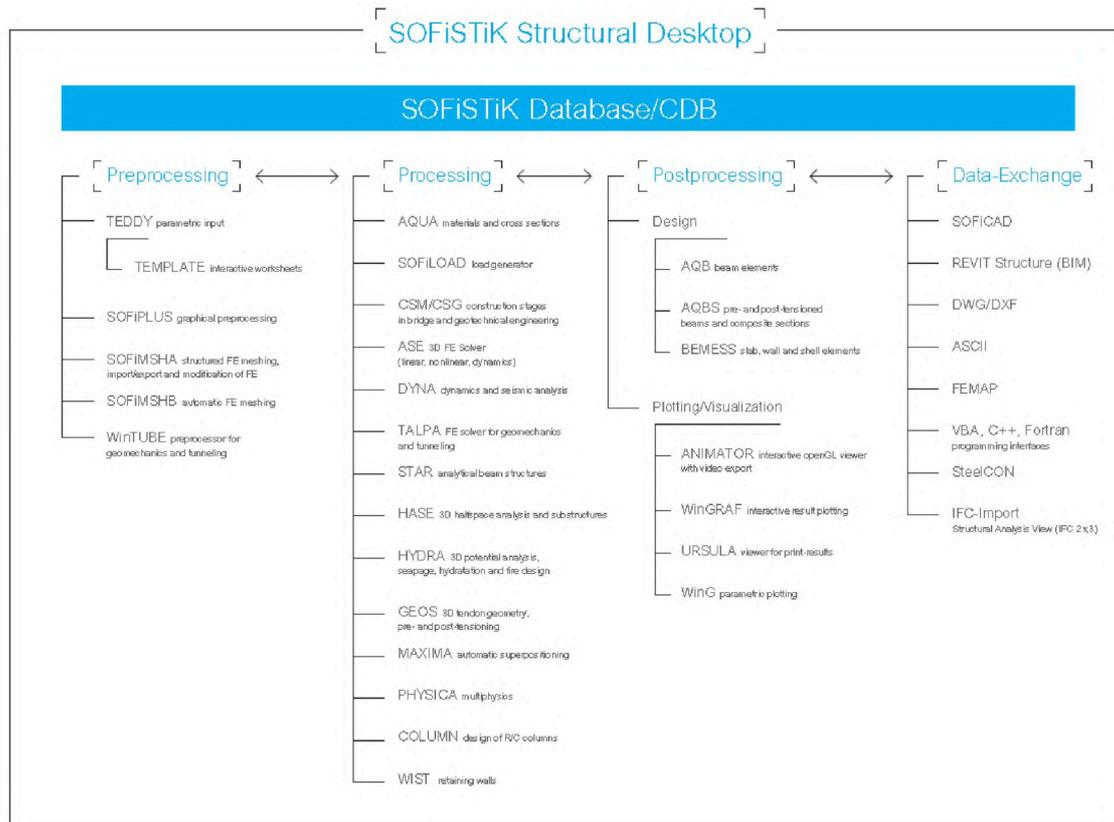


Figura 28. Esquema de trabajo de SOFiSTiK [20].

### ▪ Preprocesamiento

Se trata de un editor de texto avanzado que, mediante el lenguaje computacional CANDINP, permite la creación de scripts y macros, logrando la automatización de tareas, la definición de estructuras con sus características geométricas y materiales, y estableciendo las formulaciones empleadas para su análisis y diseño de acuerdo a las necesidades específicas de cada caso.

### ▪ Procesamiento

Debido a su orden, este módulo se utiliza tras definir la geometría y las propiedades de la estructura. Así, con SOFiLOAD se lleva a cabo la generación y aplicación de

cargas (tanto estáticas, como dinámicas) al modelo estructural, y somete el conjunto del modelo a un análisis de cálculos.

- **Posprocesamiento**

Finalmente, se visualizan y evalúan los resultados. Para ello, se han utilizado distintas herramientas de posprocesamiento, *Figura 29*, tanto de visualización, como de tipo alfanumérico. Cada una de estas herramientas muestran, de distinta forma, los resultados obtenidos en el modelo generado para los supuestos analizados, permitiendo valorar y verificar la validez o no del diseño.

Icon	Title	Description
	System	Open the program System Visualization to visualize system, displacements, stresses, etc.
	Viewer	Open the program FEA Viewer to visualize system, displacements, internal forces, etc.
	Graphic	Open Graphic to visualize the FE results and create plots.
	Result	Open Result Viewer for tabular representation of results, create diagram plots, view cross section results, export data to Excel, join different results, etc.
	Report	Open the created output by using the program Report.

Figura 29. Ejemplo de la barra de herramientas de posprocesamiento de datos [21].

Como se comentaba al principio, tanto el Puente Bioceánico, como el Puente Chilina, han sido modelizados mediante el uso de *SOFiSTiK 2022*. En ambos casos, los MEF se han definido siguiendo como base los planos facilitados por la empresa Arenas&Asociados, diseñadora de ambos puentes, y posteriormente supervisados también por dicha empresa, lo cual ha permitido que, para ambos casos, exista una fidelidad y fiabilidad de las propiedades geométricas y mecánicas entre los modelos y los puentes reales.

Para el estudio de la ARFT de ambos puentes se han realizado análisis estáticos, análisis modales y análisis dinámicos mediante integración directa, aplicando una discretización espacial y temporal según una formulación propuesta para el análisis dinámico de puentes viga sometidos a cargas móviles [22]. En la investigación de

referencia se concluye que la precisión de la formulación propuesta se evidenció en la convergencia de las soluciones analíticas y de los MEF al realizar dicha discretización. En este contexto, todos los análisis dinámicos fueron lineales, basados en el método de Newmark con un paso de tiempo fijo de 0,001 s, y la convergencia de cada paso se aseguró mediante el concepto de fuerza residual, considerándose alcanzada cuando la diferencia entre las fuerzas externas e internas fue inferior a una tolerancia del 0,1%.

Tras la automatización mediante *SOFiSTiK* de los parámetros seleccionados para el análisis, se verificó minuciosamente que estos no influyeran en los resultados finales.

### 2.2.2. Puente Bioceánico

Antes de centrar la atención en el modelo estudiado para este puente en particular, o de centrarnos en las situaciones que se han analizado para realizar el MEF de cada uno de los puentes, es necesario aludir a la nomenclatura común adoptada para el análisis desarrollado tanto para el Puente Bioceánico, como para el Puente Chilina; de esta forma se pretende que la explicación de los distintos casos no sea muy tediosa.

Se comienza especificando que se han realizado los análisis de acuerdo a las peores situaciones a que se pueda exponer la estructura respecto a la caída del carro durante el proceso constructivo.

Para el caso del Puente Bioceánico, se han analizado dos fases críticas, identificadas en el proyecto de diseño para el método de construcción mediante avance en voladizo.

Una fase muy crítica es durante su construcción, cuando el puente se encuentra en una situación distinta a la que resulta en fase de servicio. Así, en primer lugar, se ha considerado la situación de máximo voladizo en el momento inmediatamente anterior al anclaje del tablero a su pila de retenida. Esta situación es de gran importancia en el caso de puentes atirantados, pues en esta fase toda la flexión es soportada por el pilono principal. Esta fase recibe el nombre de *Situación Inicial* (IS), la cual se observa en la *Figura 30*.

Durante esta situación, al posicionarse el carro de avance en la punta del voladizo (caso de carga FT-Case), el pilono entra en carga soportando todo el esfuerzo y alcanzando su máximo momento flector a la altura del tablero, o lo que es lo mismo, en la parte baja del pilono (PS-B). Los momentos flectores según el caso estático de carga FT-Case pueden verse en la *Figura 31*, donde se representa esta situación mediante una carga de 1.819 kN inducida por el peso del carro en punta, valor que se explicará en el apartado 3. *Ensayo experimental y calibración del modelo numérico*, así como el diagrama de momentos flectores obtenido con *SOFiSTiK*, donde se modela el pilono como una viga-columna empotrada en su base y transmitiendo los esfuerzos entre el pilono y el tablero a través de los tirantes.

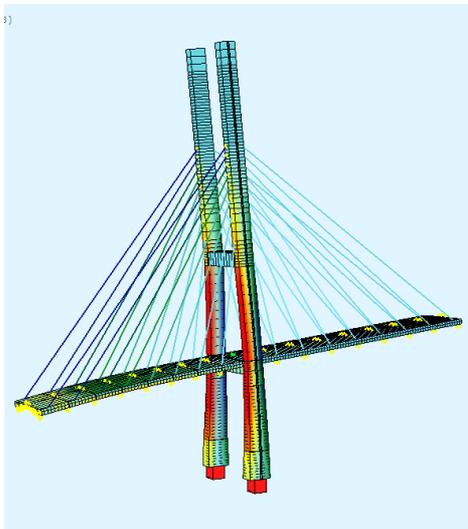


Figura 30. Modo de desplazamiento del MEF del Puente Bioceánico en la IS [1].

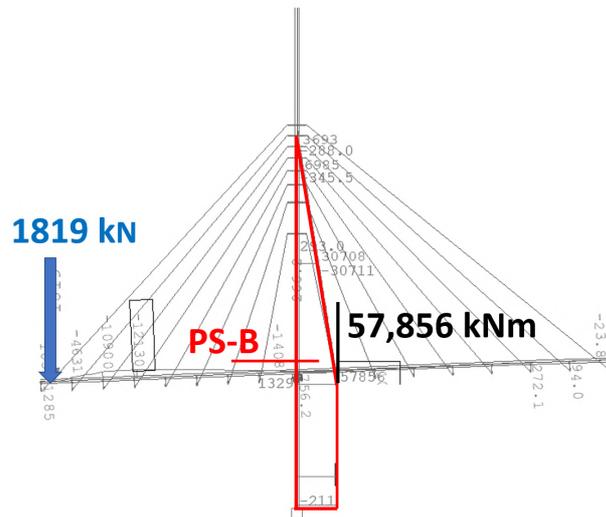


Figura 31. Diagrama de momentos flectores debido al FT-Case (IS) [1].

A continuación, se analiza la segunda fase crítica de este método constructivo, quizá la más evidente al pensar en la criticidad de la estructura, pues es cuando se tiene el máximo voladizo absoluto del tablero, justo antes de unirse en el centro de luz del vano principal con el extremo opuesto del tablero colindante. Esta es la que se denomina como *Situación Final (LS)*, *Figura 32*.

En esta fase analizada se observa como sufren tanto el tablero como el pilono, experimentando, al contrario que en el caso anteriormente descrito, momentos flectores máximos en la sección superior del pilono (PS-T) y en la parte frontal del tablero (DS-F). Como puede verse en la *Figura 33*, donde se representan los momentos flectores debidos al análisis estático del peso del carro en la punta del voladizo, los tirantes del puente entren en carga debido a la acción del carro,

suponiendo el máximo esfuerzo en los tirantes más próximos al extremo del tablero. Este esfuerzo se transmite al pilono mediante los tirantes del puente, situando este máximo esfuerzo en la parte más alta de la torre, lo que se traduce en el diagrama de flectores resultante y con él la deformada de la estructura global, *Figura 32*.

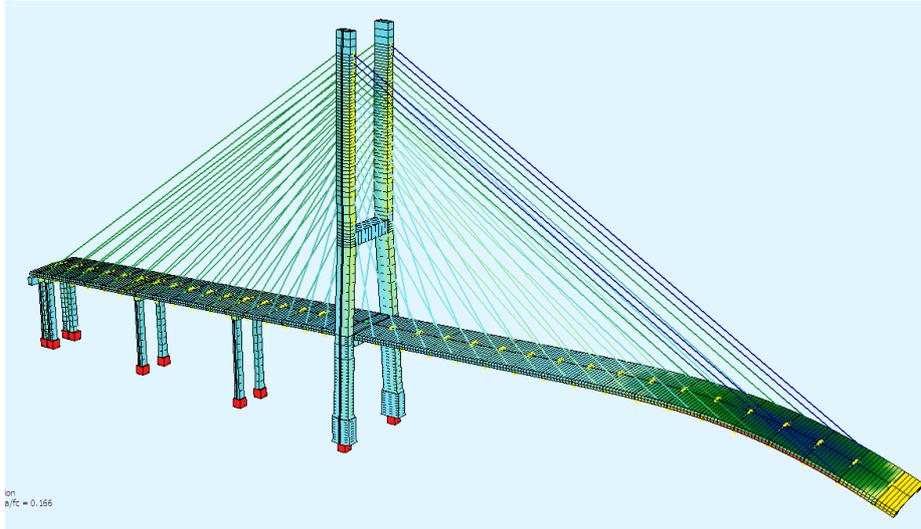


Figura 32. Modo de desplazamiento del MEF del Puente Bioceánico en la LS [1].

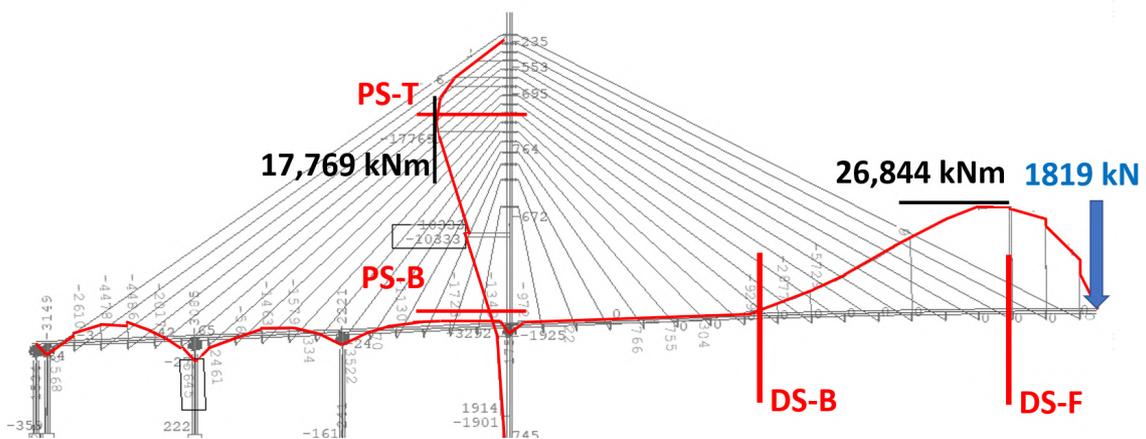


Figura 33. Diagrama de momentos flectores debido al FT-Case (LS) [1].

Cabe mencionar que, además de las secciones comentadas para cada caso, se ha evaluado la sección anterior del tablero del puente (DS-B) en la fase de LS, pues es un punto de interés por ser la sección donde, desde un análisis estático, los momentos flectores resultan despreciables al ser el lugar desde el cual los tirantes no se ven directamente afectados por la carga del carro en punta, y, por tanto, donde la deformación pierde su valor por actuar asimilándose a un empotramiento

estructural, por lo que se ha querido comprobar si ocurre lo mismo desde los análisis dinámicos.

### 2.2.3. Puente Chilina

Para el ensayo del Puente Chilina, al tratarse de un puente de viga continua, no se considera la fase inicial (IS), pues durante su proyecto, la única fase identificada como crítica frente a la ARFT fue la LS, donde el tablero se encuentra, igual que en el caso del puente atirantado, en su máximo voladizo previo a la unión en el centro de luz del vano con el extremo opuesto del tablero colindante,

Figura 35.

Al analizar ahora la situación de FT-Case, podemos ver que el resultado obtenido para el diagrama de momentos flectores es el resultante de un esquema estructural tipo pescante, donde la base de la pila se encuentra empotrada y existe una carga puntual (la del carro de avance) en la punta del voladizo, resultando aquí el máximo valor del momento flector constante a lo largo del tramo vertical,

Figura 35. Por ello, se han estudiado tanto las secciones de la pila (PS), como la sección del tablero (DS) contigua a la pila.

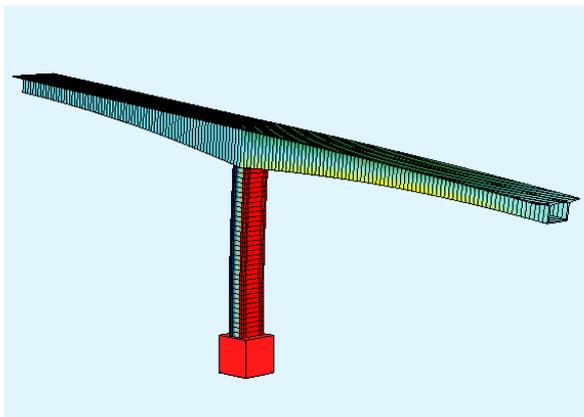


Figura 34. Modo de desplazamiento del MEF del Puente Chilina en la LS [1].

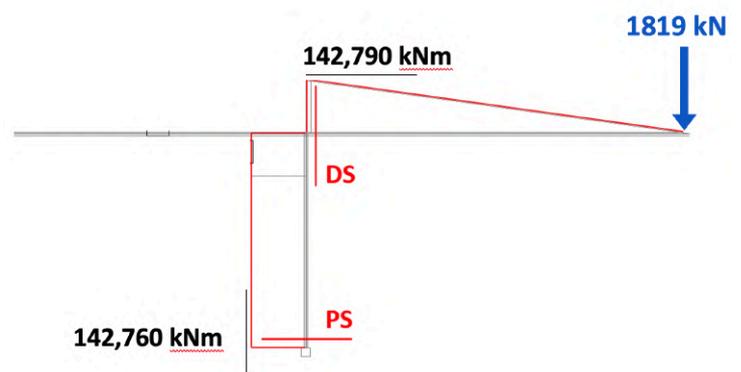


Figura 35. Diagrama de momentos flectores debido al FT-Case (LS) [1].

### 3. Ensayo experimental y calibración del modelo numérico

Para la realización de los ensayos que van a explicarse a continuación, se siguió el esquema de trabajo mostrado en la *Figura 36*.

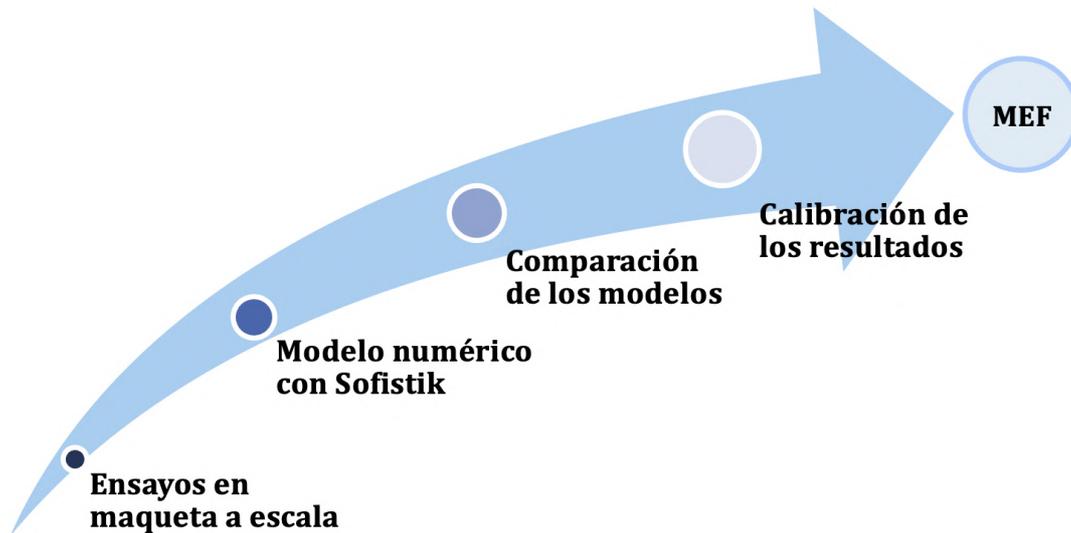


Figura 36. Procedimiento de trabajo para la obtención del MEF.

Partiendo de los planos del diseño del Puente Bioceánico, se construyó una maqueta a escala 1/100, que fue ensayada en laboratorio. La maqueta fue construida para el estudio aeroelástico del puente, obligatorio al tener más de 200 m de luz, y se aprovechó para los ensayos de caída del carro, objeto de este estudio. En base a los resultados obtenidos de los ensayos, se pudo calibrar el modelo de elementos finitos descrito anteriormente, es decir, se pudo modelar la caída del carro mediante el modelo numérico de *SOFiSTiK* en base a los ensayos experimentales realizados sobre la maqueta del puente Bioceánico.

#### 3.1. Modelo aeroelástico

El planteamiento aeroelástico en ingeniería de puentes consiste en ensayar un modelo a escala de un puente completo para observar el comportamiento que la estructura presenta ante el viento y así desarrollar las respuestas que el puente real tendrá ante las situaciones ensayadas [23].

Para el caso en estudio, se ensayó el Puente Bioceánico mediante una maqueta de más de 12 m, construida a escala 1:100 en el Politecnico di Milano, *Figura 37* y *Figura*

38, reproduciendo el puente desde el vano de Paraguay, hasta el de Brasil, como se puede observar en la *Figura 39* y *Figura 40*. Este modelo estaba disponible porque se construyó para realizar previamente ensayos de túnel de viento para evaluar las prestaciones aeroelásticas de las etapas de construcción, que pueden ser críticas para los puentes, [24].

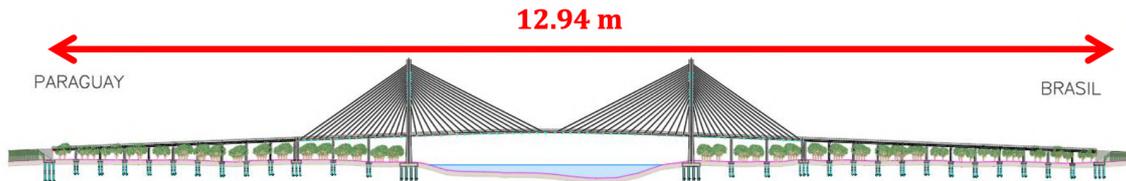


Figura 37. Croquis de la maqueta del Puente Bioceánico [12].



Figura 38. Modelo aeroelástico del Puente Bioceánico [24].

Para la presente investigación, las pruebas incluyeron ensayos de vibración libre y simulación ARFT durante la fase de voladizo máximo (LS), para lo que se colocaron diferentes sensores para la monitorización del modelo aeroelástico.



Figura 39. Detalle de las pilas de la maqueta del Puente Bioceánico [24].



Figura 40. Detalle de construcción de la maqueta del Puente Bioceánico [24].

En la

Figura 42 se muestra la ubicación de los acelerómetros (cuadrados azules), la de los inclinómetros (rombos verdes) y el punto de verificación (M21) para medir el desplazamiento mediante láser (círculos rojos). Además, en la

Figura 42 se muestra la célula de carga utilizada para medir el peso de los objetos colgados para realizar las pruebas ARFT.

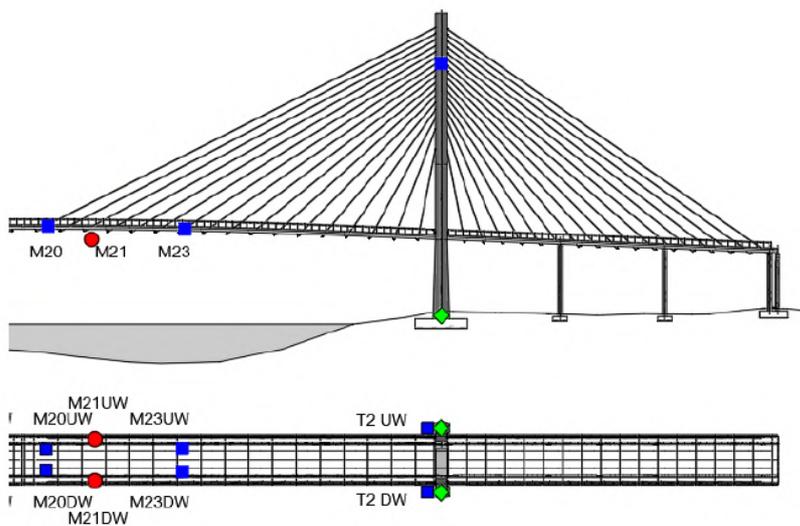


Figura 41. Elementos de medida sobre el modelo [24].

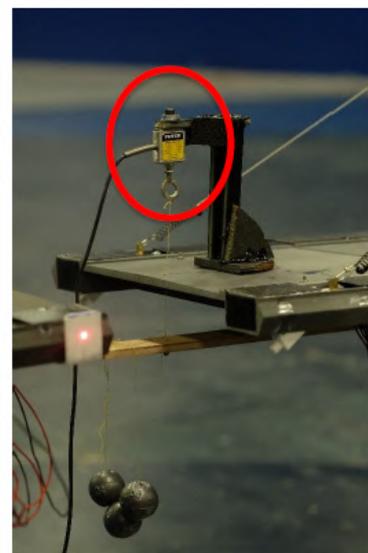


Figura 42. Célula de carga [24].

### 3.2. Descripción del ensayo

Considerando el objetivo principal de este estudio, el de analizar la teoría de un DAF igual a 2 en los casos propuestos por las distintas normativas, se definieron tres ensayos a realizar:

- En primer lugar, un ensayo de vibraciones libres tras verse sometido el puente a un desplazamiento inicial inducido por el peso propio (en adelante, **FV** por sus siglas en inglés: *Free Vibration*), *Figura 43*.
- Seguidamente, la situación de ARFT con el carro situado sobre el tablero (en adelante, **ARFT-OH**: *OverHead*), *Figura 44*.
- Y, por último, la situación de ARFT con el carro situado bajo el tablero (en adelante, **ARFT-US**: *UnderSlung*), *Figura 47*.

Con la intención de comparar los resultados de los tres ensayos, se ha considerado el desplazamiento estático inicial igual para los tres casos.

Durante los ensayos de vibraciones libres (FV) se colocó un peso en el extremo del voladizo mediante un hilo sujeto a la célula de carga, *Figura 43*. Este hilo se quemó, en vez de cortarlo, para evitar inducir esfuerzos sobre el mismo y simular así una variación repentina de la carga debida a la caída accidental de la dovela. Se tomaron registros del punto M21 de verificación cada 0,01 segundos antes y después de quemar el hilo, donde, debido a la retirada repentina de la carga, el ensayo de FV debía tener como resultado un DAF igual a 2 para cumplir las premisas que indica el método simplificado de las normativas.

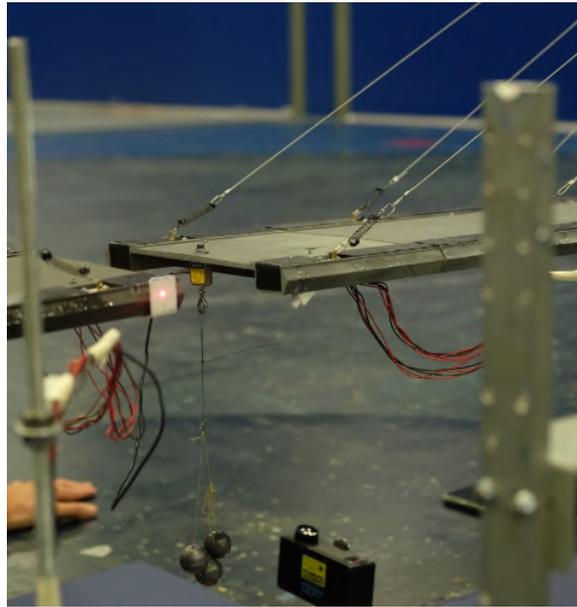


Figura 43. Ensayo FV [1].

Durante los ensayos ARFT-OH, se sitúan el carro sobre el tablero y la carga que simula el peso de la dovela pendiendo igualmente de otro hilo en el extremo del carro, *Figura 44*. Al quemar el hilo que hace el contrapeso, el carro vuelca (*Figura 45*) hasta caer del tablero. Igual que en el caso anterior, se hace la toma de datos del punto M21 cada 0,01 segundos, antes y después de quemar el hilo para poder compararlo con el caso de FV.

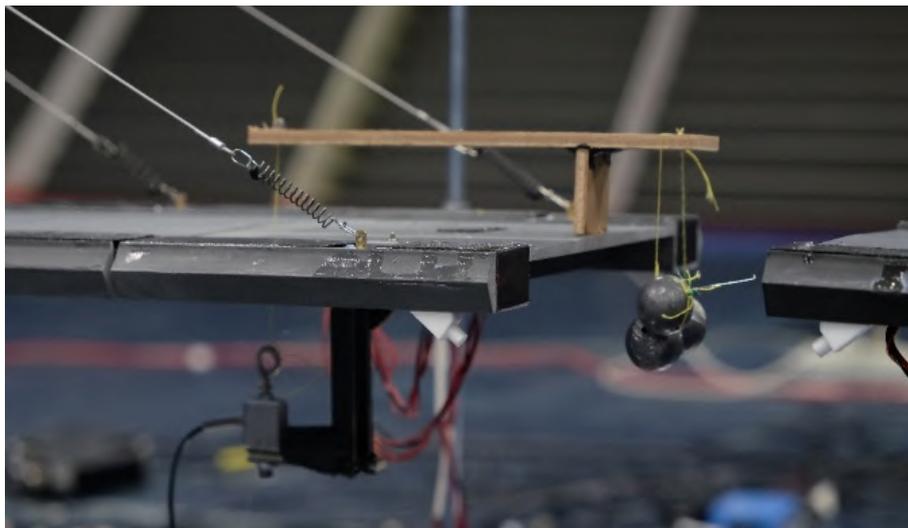


Figura 44. Ensayo ARFT-OH en el instante inicial [1].

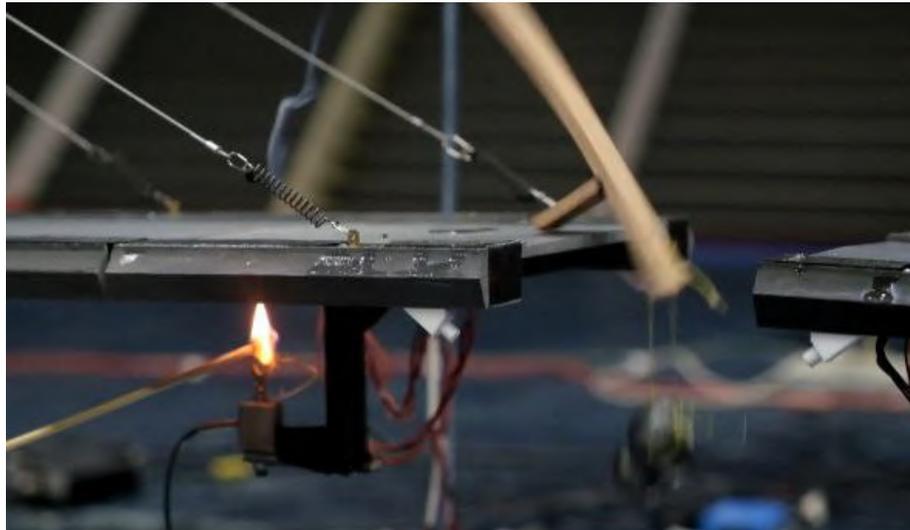


Figura 45. Ensayo ARFT-OH en el instante del vuelco [1].

Finalmente, en el ensayo de ARFT-US, el carro de avance y el peso de la dovela se sitúan debajo del tablero, sujetándose mediante un hilo atado a la célula de carga colocada en el borde del voladizo (*Figura 46*), que después es igualmente quemado hasta que el carro vuelca y cae del tablero, como se puede ver en la *Figura 47*.

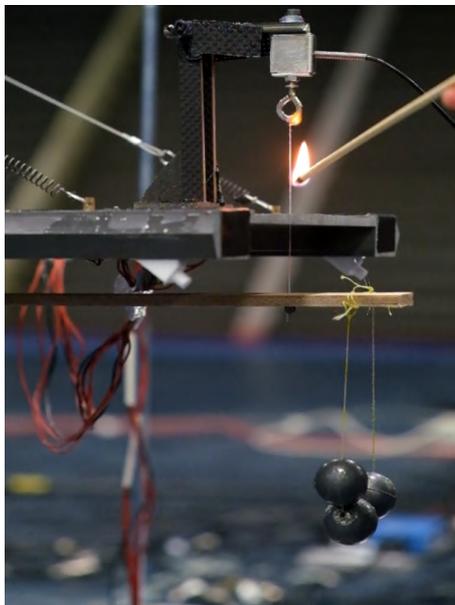


Figura 46. Ensayo ARFT-US en el instante inicial [1].

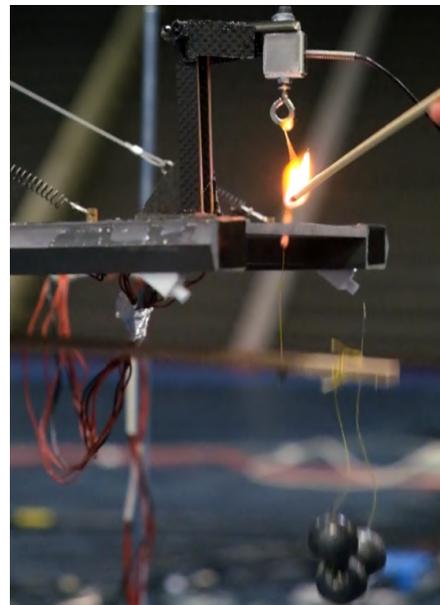


Figura 47. Ensayo ARFT-US en el instante de caída [1].

El objeto primero del análisis de estos dos últimos casos, tanto el caso de ARFT-OH, como el de ARFT-US, es el de evaluar cómo de repentina es la retirada de la carga, ya que durante los instantes en que el carro está girando y desplazándose, algo del

peso del carro se mantiene gravitando sobre el puente. De esta forma se demostrará que, cuanto más tiempo tarde en volcar el carro de avance, menos instantánea será la liberación de la carga y, por tanto, mayor diferencia habrá respecto al ensayo de FV.

A continuación, se definen las propiedades de los carros de avance OH y US utilizados para los ensayos experimentales.

### 3.3. Definición del carro de avance empleado en los ensayos

Como se explica en el apartado 2.1.2. *Carros analizados* de este estudio, existen distintos tipos de carro de avance que pueden definirse según su tamaño, sus propiedades mecánicas, el tipo de segmento del puente a construir, etc. Debido a la amplitud de opciones, para el estudio en cuestión se optó por ensayar un carro ideal cuya influencia fuese igual o menor a la que se produciría con un carro real; lo que implica, a su vez, que los resultados obtenidos con un carro real distarían más respecto al planteamiento teórico del caso de FV. Es decir, el carro ideal tendría un proceso de caída más rápido y repentino que un carro real y, por tanto, los resultados de los ensayos serían conservadores y del lado de la seguridad.

Para tener unas referencias numéricas iniciales, se definen primero las características de un carro real. Se ha escogido el caso del Puente Bioceánico, donde se consideró para el diseño un carro de avance de 720 kN de peso (en adelante,  $SW_{FT}$ , por sus siglas en inglés: *Static Weight of the Formwork Traveller*), el cual debía construir una dovela tipo de 1.100 kN (en adelante  $SW_S$ , por sus siglas en inglés: *Static Weight of the Segment*). De modo que el peso total máximo susceptible de sufrir una caída accidental es de 1.820 kN, es decir, el peso del carro representa el 40 % del peso potencial que podría caer. Geométricamente, la fuerza resultante  $SW_{FT}$  se sitúa más cerca del tablero que la resultante  $SW_S$ , que se sitúa hacia el extremo del carro, por lo que la posición de la resultante total  $SW_{FT} + SW_S$  (Figura 48) vendrá condicionada al reparto entre ambos pesos, es decir, cuanto menor sea el porcentaje del peso del carro respecto del total, mayor será la excentricidad “e” de la resultante total  $SW_{FT} + SW_S$ , y, por tanto, más rápido se producirá el giro y la consiguiente caída del carro en caso de accidente, Figura 49.

Las citadas figuras presentan simplificadaamente el carro situado sobre el tablero mediante un esquema de barras trianguladas en color amarillo, con una vertical que

transmite la fuerza del carro al tablero (en color gris) en su punto de apoyo; un tirante que responde a las tensiones del carro, y la distancia excéntrica respecto de la cual se posiciona la carga resultante total que pende del carro de avance. Pudiendo observarse la transición entre el estado de equilibrio y el instante en que se produce la caída del carro de avance.

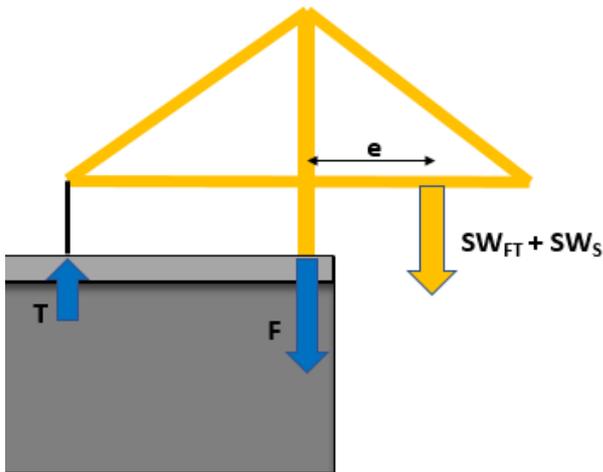


Figura 48. Equilibrio estático [1].

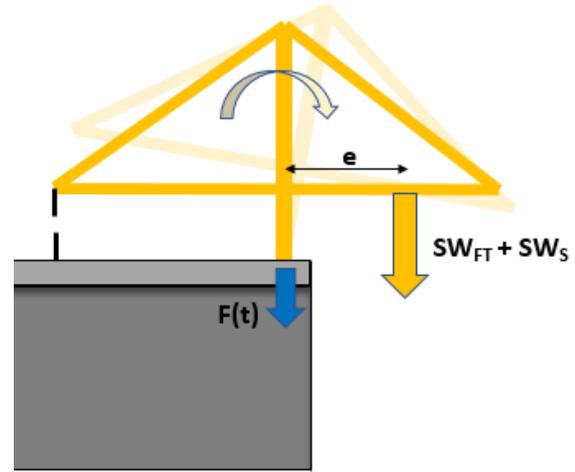


Figura 49. Caída accidental del carro de avance [1].

En la *Figura 50* se muestra la geometría del carro utilizado en el modelo aeroelástico para el caso del carro de avance OH, mientras que en la *Figura 51* se muestra la del del carro de avance US.

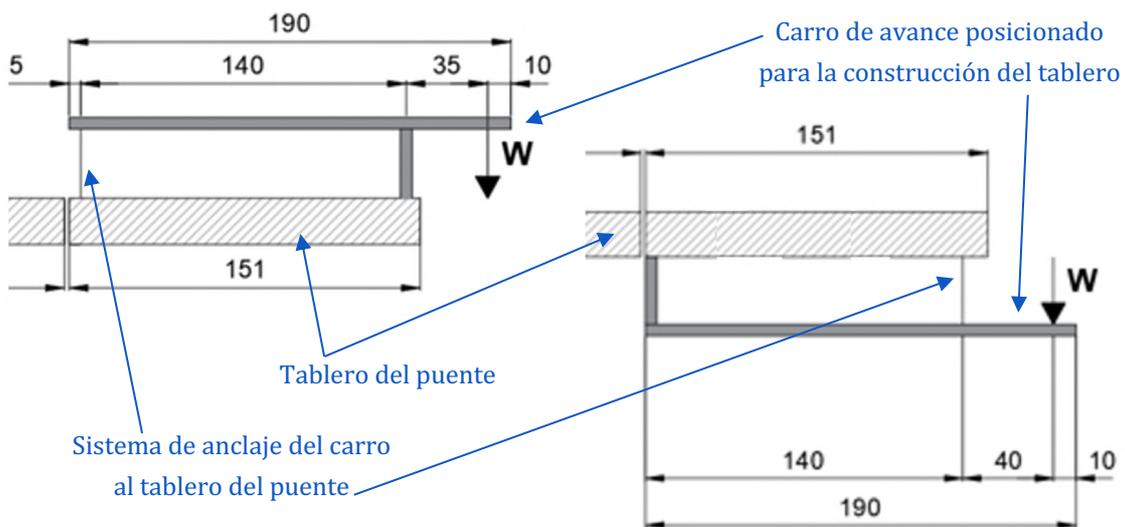


Figura 50. Geometría del carro de avance OH [1].

Figura 51. Geometría del carro de avance US [1].

Ahora se definen las características de los carros ensayados. El peso del carro de avance supone 13,5 g, mientras que el peso de las bolas metálicas que simulan el peso de la dovela en construcción supone un peso  $W$  de 168,5 g, lo cual representa un peso total de 182 g, que al transformarlo a escala real ( $1/10^6$ ) representa 1.820 kN, es decir, se corresponde con el peso total definido para el diseño de la situación de caída del carro durante la construcción del Puente Bioceánico. Esta distribución de pesos implica que el carro a ensayar se corresponde con un 7,5 % del peso total susceptible de caída, a diferencia del 40 % que supone para la situación de proyecto, por lo que giraría más rápido. Adicionalmente, teniendo en cuenta el factor de escala, la inercia de rotación del carro ensayado es 7 veces menor que la del carro de avance real utilizado para el diseño del Puente Bioceánico, por tanto, la menor inercia relativa también contribuye a considerar que un carro real tendría una caída más lenta y, por ello, una retirada de fuerza menos repentina que la del ensayo.

Dado que el vuelco accidental del carro de avance sucede más rápido cuanto mayor sea la excentricidad “e” y cuanto menor sea la inercia de rotación, los ensayos experimentales darán como resultado una caída accidental más rápida que la que se produciría en la realidad (se tiene un factor de escala temporal de  $1/10$  en los ensayos). Por tanto, en los ensayos se obtienen resultados más conservadores, es decir, más próximos a los resultados del caso de FV, por lo que estaremos del lado de la seguridad.

Por último, es importante destacar que los carros de avance reales cuentan con sistemas de seguridad mediante la conexión al tablero a través de más de un cable. Esto implica que un posible fallo en el sistema de anclaje no resulta en una caída inmediata, sino que permitiría disipar energía durante el proceso. Con el objetivo de garantizar un enfoque conservador en esta investigación para poder aplicar los resultados obtenidos a escenarios reales, se ha decidido deliberadamente no considerar este efecto durante los ensayos experimentales, siguiendo el mismo enfoque al definir una pequeña inercia rotacional y una gran excentricidad.

### 3.4. Calibración de la función Fuerza-Tiempo equivalente

Los ensayos realizados en el Instituto Politecnico di Milano (*Polimi*) fueron de gran utilidad para calibrar tanto el comportamiento del Puente Bioceánico en FV (masa, rigidez, frecuencia, modos de vibración, amortiguamiento, etc.), como para calibrar la fuerza ejercida en el puente por el carro de avance durante el proceso de vuelco,

así como su duración. El objetivo era cuantificar cuán próximo (o lejano) está el ensayo de ARFT a la hipótesis de liberación instantánea de la carga propuesta por las normativas.

Para ello, el proceso de calibración del MEF se llevó a cabo durante la fase de LS del Puente Bioceánico. Esta calibración consiste en ajustar propiedades tales como el desplazamiento modal, la frecuencia, la masa, la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento (parámetro  $D$ ), medidas en el punto de control (M21) que se observa en la

*Figura 42*, y el cual se sitúa a 25 m del borde del voladizo en escala real. Aunque en este documento se ha centrado la atención exclusivamente en el ajuste de calibración del amortiguamiento, por ser la única propiedad relevante para el análisis dinámico, también se comprobaron el resto de los parámetros. Y una vez calibrado el puente, se procedió a la calibración de la función Fuerza-Tiempo durante el vuelco, objeto último de esta investigación.

Debido a su consideración de carga impulsiva, se asumió la hipótesis de que la forma de la función Fuerza-Tiempo que ejerce el carro al caer es sensiblemente rectangular, y, por tanto, la calibración busca determinar el porcentaje de peso total caído ( $SW_T$ ) que es soportado por el tablero (parámetro  $F$ ), así como durante cuánto tiempo actúa esta fuerza (parámetro  $t_d$ ), como se muestra en la *Figura 52*.

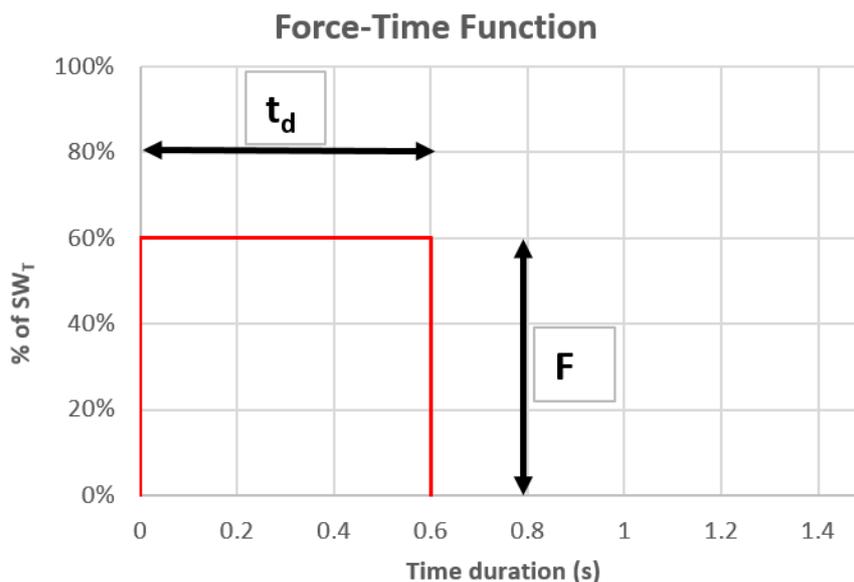


Figura 52. Parámetros de la función Fuerza-Tiempo [1].

En primer lugar, en la *Figura 53* se grafía el desplazamiento en el tiempo del ensayo de FV, representando en color rojo los resultados experimentales obtenidos en el punto de control para la LS del Puente Bioceánico, respecto a los cuales se calibra el amortiguamiento (*damping, D*). Para observar los resultados más representativos, se compara el ensayo respecto al MEF con distintos valores de amortiguamiento según sigue: con línea negra punteada se representa el resultado para un amortiguamiento del 0 %, con la línea negra continua se representa un amortiguamiento del 0,8 %, mientras que el trazado negro de línea-punto representa un amortiguamiento del 5 %. Se visualizan también en la gráfica dos líneas horizontales, mostrando el desplazamiento que se produce para un factor de amplificación dinámica (DAF) = 0, en el caso del valor estático inicial, y un DAF = 2, representando el valor máximo de amplificación dinámica definido por las normativas; valor al que se puede ver cómo los distintos resultados se aproximan al inicio de la prueba, independientemente del valor del amortiguamiento, tal como predice el método simplificado de las normativas.

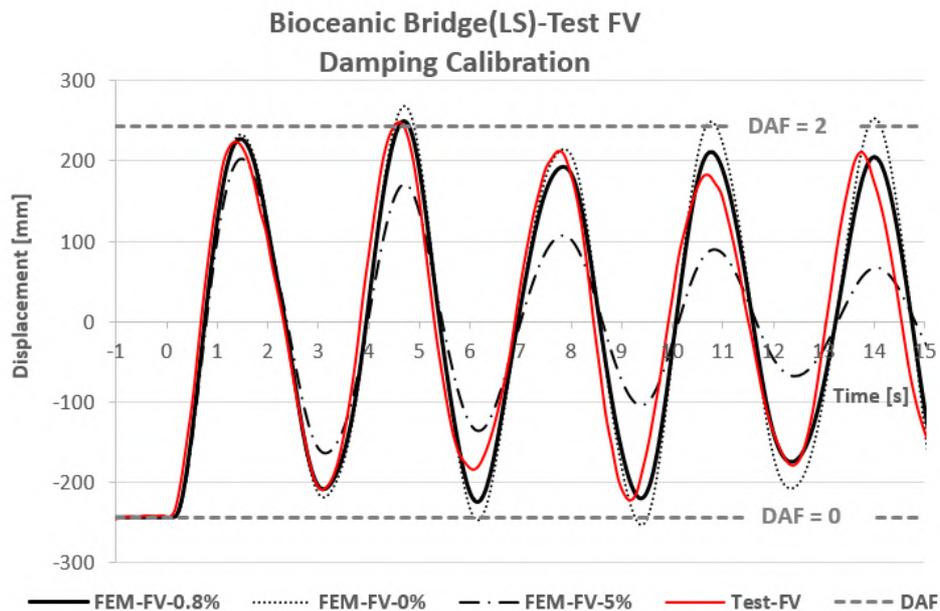


Figura 53. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso FV [1].

Se recalca que la gráfica muestra el desplazamiento en mm a escala real, no a escala de maqueta, es decir, muestra el desplazamiento real que tendría el puente. Conforme a estos resultados, puede observarse:

- Que para un valor de amortiguamiento del 0,8 % los resultados del modelo numérico son los más próximos a los resultados obtenidos en el ensayo experimental de FV.
- Que el instante donde el desplazamiento es nulo en cada vibración ajusta con el modelo MEF, lo que significa que las frecuencias de vibración son coincidentes.
- Que para un amortiguamiento del 0,8 %, la amplitud del desplazamiento en ambas curvas es bastante similar; tal y como se observa al inicio, el resultado del MEF reproduce el segundo pico ligeramente más alto que el primero, igual que en el caso de FV.

Por tanto, conforme al ajuste obtenido, se define el  $D = 0,8 \%$  como el amortiguamiento del modelo experimental a escala.

El siguiente paso es la calibración de los valores de la fuerza ( $F$ ) y el tiempo de caída ( $t_d$ ) del carro. Se inicia el proceso de calibración conforme a la prueba de caída accidental del carro de avance situado sobre el tablero (ARFT-OH), donde se puede observar de las grabaciones del ensayo en el *Polimi* (*Figura 44* y *Figura 45*), que la caída del carro tarda, a escala real, unos 0,9 s en producirse. Por tanto, se calibra el valor del parámetro  $F$  tomando el parámetro  $t_d$  con un valor inicial de 0,9 s de duración y un amortiguamiento ( $D$ ) del 0,8 %.

Al igual que con el amortiguamiento, en la *Figura 54* se ilustran en trazado rojo continuo los resultados del desplazamiento alcanzados en el ensayo experimental de la ARFT-OH, junto con los distintos resultados del MEF según sigue: con línea negra punteada se representa la fuerza de 300 kN, equivalente a un parámetro  $F \approx 16 \%$  del valor de la fuerza total de 1.820 kN definida para el diseño del Puente Bioceánico, según se ha explicado en el apartado 3.3. *Definición del carro de avance empleado en los ensayos* de este documento; con el trazado negro de línea-punto se representa el resultado obtenido para una fuerza de 600 kN, equivalente a un  $F \approx 33 \%$  de la fuerza; y con línea negra continua se representan los resultados obtenidos para una fuerza de 1.200 kN, equivalente a un parámetro  $F \approx 66 \%$  de la fuerza de diseño.

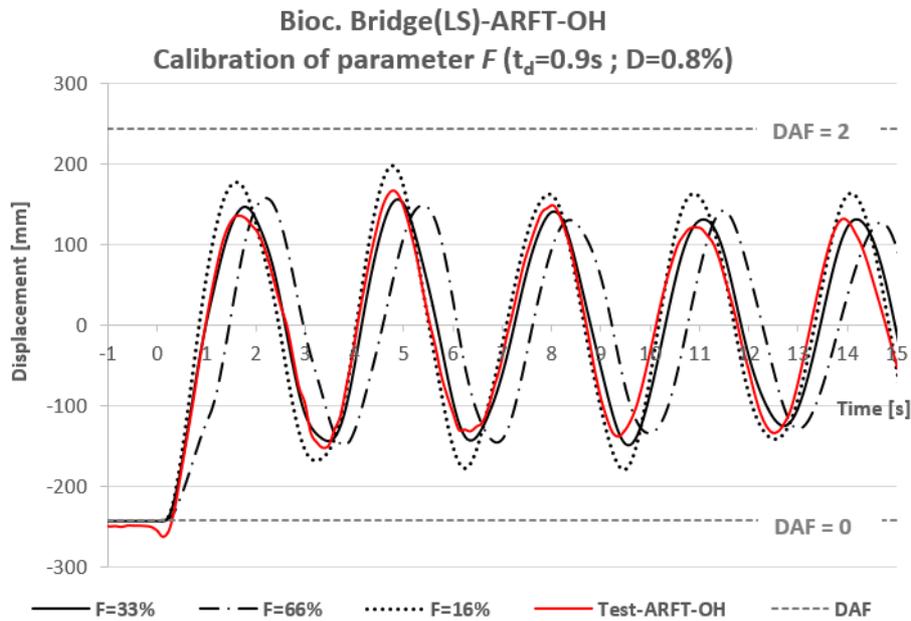


Figura 54. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-OH ( $t_d = 0,9$  s;  $D = 0,8$  %) [1].

De acuerdo con los resultados presentados en la *Figura 54*, el valor de la fuerza evidencia la influencia del parámetro  $F$  en el instante en que se alcanza el desplazamiento máximo. El gráfico anterior también demuestra que la curva correspondiente a una fuerza de 600 kN ( $F = 33\%$ ) se ajusta significativamente a los resultados experimentales. Es importante destacar que la prueba ARFT-OH indica que los desplazamientos máximos se encuentran claramente alejados de la línea  $DAF = 2$ . Por lo tanto, la hipótesis de una liberación instantánea de la carga no se ajusta adecuadamente a la realidad de este proceso de vuelco.

Para evaluar la sensibilidad del parámetro  $t_d$  y la validez de la consideración de su valor inicial (0,9 s), se realizó una calibración utilizando diferentes valores de  $t_d$  con una fuerza constante de 600 kN y un coeficiente de amortiguamiento del 0,8%, según se ha ido contrastando. Así, la *Figura 55* muestra los distintos resultados obtenidos mediante el modelo de elementos finitos (MEF) para este parámetro:  $t_d = 0,45$  s, que corresponde al 15% del período fundamental y se representa con una línea negra punteada;  $t_d = 0,90$  s, que equivale al 30% del período fundamental y se representa con una línea negra continua; y  $t_d = 1,80$  s, que representa el 60% del período fundamental y se muestra con una línea negra de trazos y puntos. Finalmente, la línea roja continua corresponde a los resultados experimentales de

la prueba ARFT-OH, con la que, de acuerdo a su ajuste, se confirma que el valor de  $t_d = 0,9$  s observado es correcto.

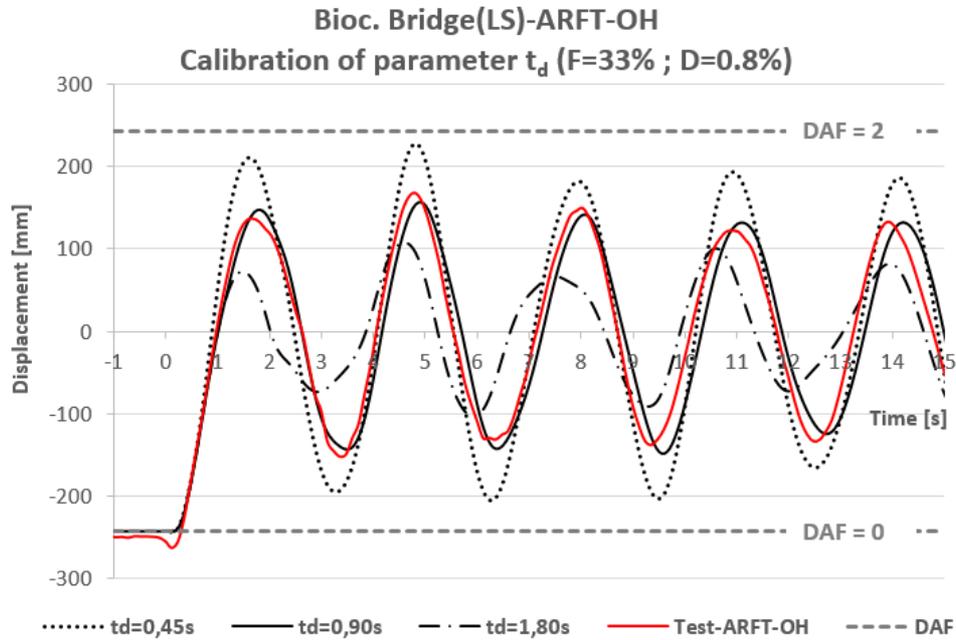


Figura 55. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-OH ( $F = 33\%$ ;  $D = 0,8\%$ ) [1].

Se muestran en la *Figura 56* los distintos resultados obtenidos durante el proceso de calibración llevado a cabo para el ensayo de ARFT-OH.

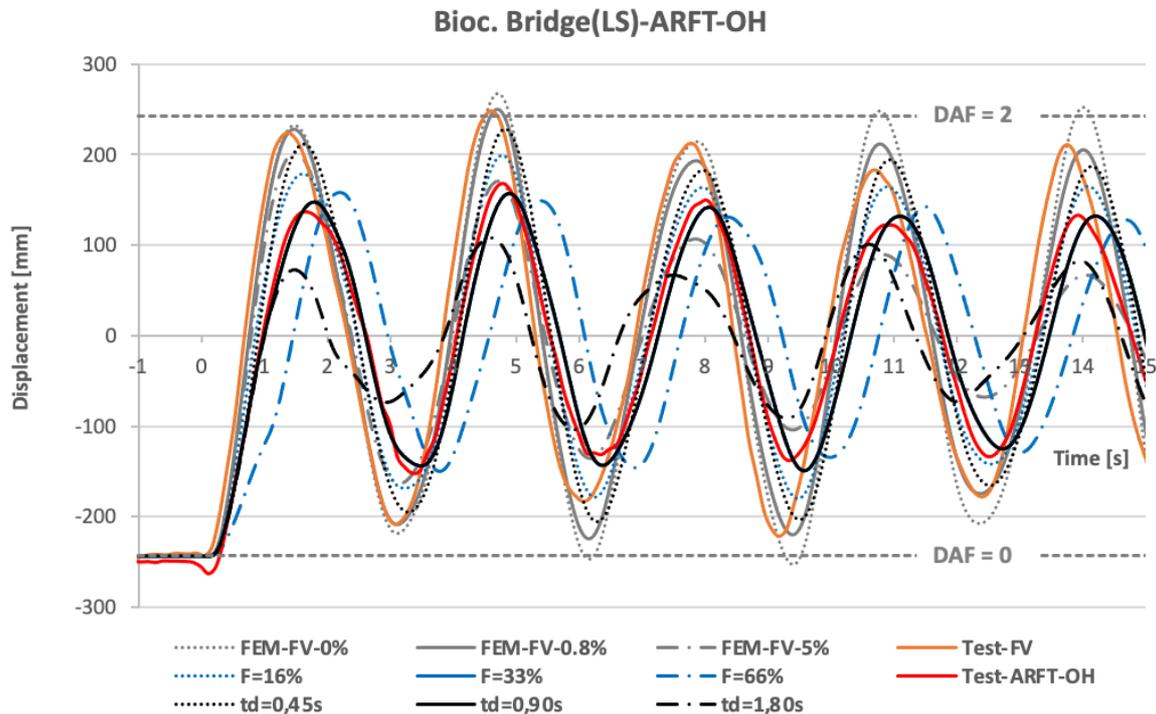


Figura 56. Comparación de los resultados obtenidos durante el proceso de calibración mediante diagramas de Desplazamiento del caso ARFT-OH en la LS del Puente Bioceánico.

De manera equivalente se llevó a cabo el proceso de calibración del ensayo ARFT-US. Mediante las grabaciones de los ensayos en el *Polimi*, se observó que el valor real del parámetro  $t_d$  es de aproximadamente 0,5 s en este caso. Además, partiendo del análisis inicial para la calibración del modelo ARFT-OH donde se define el MEF con un coeficiente de amortiguamiento del 0,8 % para el modelo a escala, se fija este mismo valor para el modelo de ensayo ARFT-US, obtenido así distintos resultados del MEF para el parámetro variable  $F$ .

En la *Figura 57* se presentan los resultados experimentales del ensayo ARFT-US con una línea roja, así como los límites del  $DAF = 2$  y  $DAF = 0$ , igual que en el ensayo ARFT-OH. Seguidamente, con trazado punteado se observan los resultados obtenidos para un MEF con valores de fuerza 200 kN, lo que se corresponde con un parámetro  $F \approx 11 \%$ ; con línea continua se presentan los resultados para el MEF de 400 kN, equivalente a un  $F \approx 22 \%$ ; y con trazado de línea-punto el MEF con fuerza de 800 kN, que representa un parámetro  $F \approx 44 \%$ .

Se observa que las curvas de desplazamiento de la *Figura 57* son todas bastante similares, sin embargo, hay algunos detalles distintivos. Si nos fijamos en el pico de desplazamiento máximo (el segundo), el mejor ajuste se consigue con el valor de

fuerza de 400 kN, es decir, para un parámetro  $F \approx 22\%$ . Si comparamos esta gráfica con su análoga del caso ARFT-OH (*Figura 54*), se puede apreciar en ambas que el desplazamiento máximo se encuentra próximo a la línea de  $DAF = 2$ , aunque está más cerca de esta línea en el caso de ARFT-US, lo que significa que el ensayo con el carro pendiente del tablero se aproxima más al caso de una caída repentina.

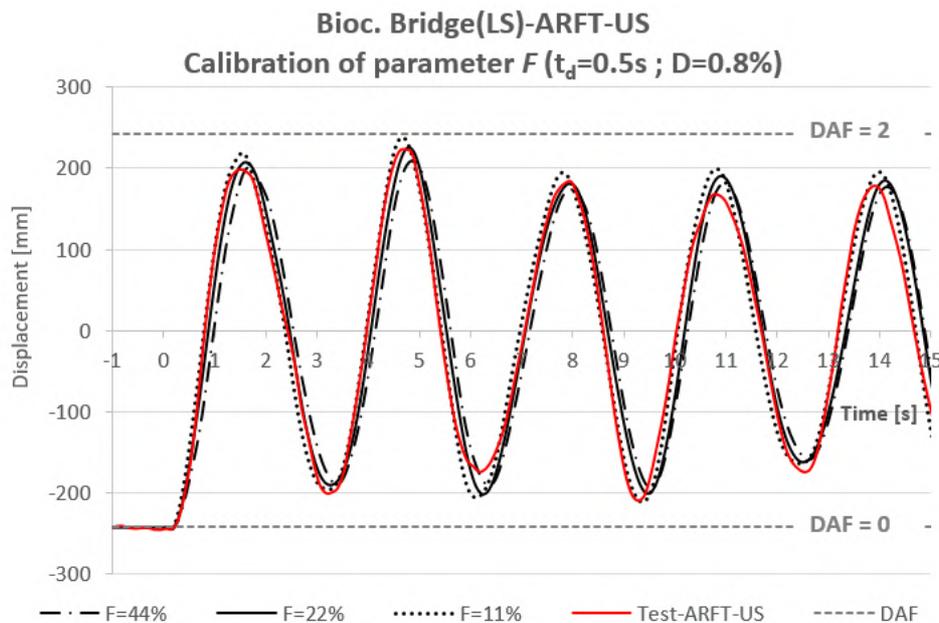


Figura 57. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-US ( $t_d = 0,5\text{ s}$ ;  $D = 0,8\%$ ) [1].

Siguiendo el proceso de calibración, igual que en el caso de ARFT-OH, una vez determinados el coeficiente de amortiguamiento ( $D = 0,8\%$ ) y el porcentaje de fuerza ( $F \approx 22\%$ ), se continúa analizando la influencia del parámetro  $t_d$ , *Figura 58*. Se estudian para ello los modelos de elementos finitos con un tiempo de afectación de  $t_d = 0,2\text{ s}$ , grafiado mediante línea negra punteada, que se corresponde con el 7% del periodo fundamental; mediante línea negra continua se representa  $t_d = 0,5\text{ s}$ , equivalente al 16% del periodo fundamental; y mediante trazo de línea-punto el  $t_d = 1,25\text{ s}$ , correspondiente al 40% del periodo fundamental; y se comparan con la prueba experimental ARFT-US, grafiada con línea continua de color rojo.

Como se observa en la *Figura 58*, podemos confirmar que el valor de  $t_d = 0,5\text{ s}$  es correcto, ya que es la curva de desplazamientos que mejor se aproxima a la curva del ensayo experimental.

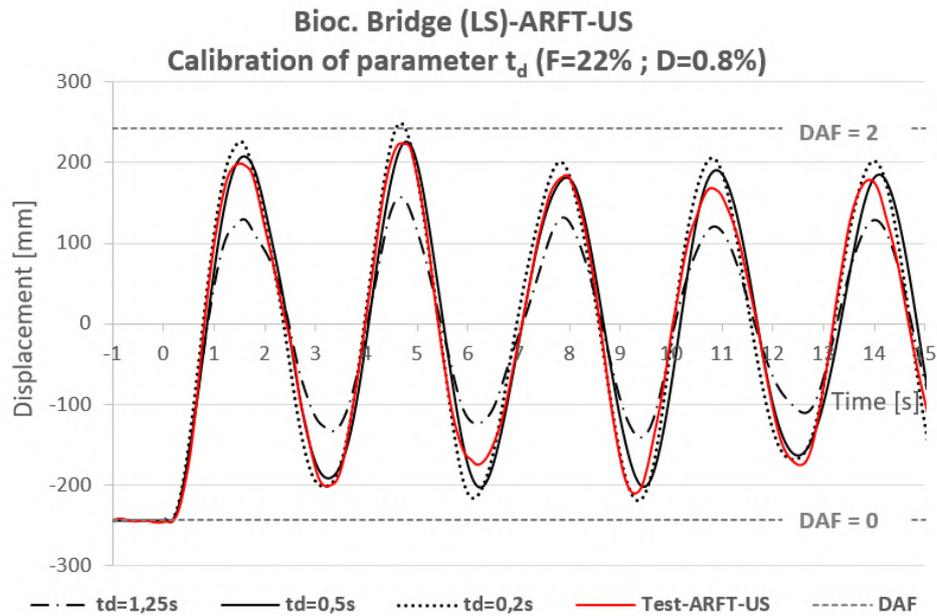


Figura 58. Diagrama Desplazamiento vs Tiempo en el punto de control para el caso de ARFT-US ( $F = 22\%$  ;  $D = 0,8\%$ ) [1].

Si se comparan la *Figura 57* y la *Figura 58* se puede afirmar que la influencia del parámetro  $t_d$  en el ensayo US es mayor que la del parámetro  $F$ , puesto que la variación del valor de este último no implica una diferencia notable, mientras que sí se consigue distinguir con más facilidad la afectación de la variación del parámetro  $t_d$ . Se muestra esta comparación del ensayo ARFT-US en la *Figura 59*.

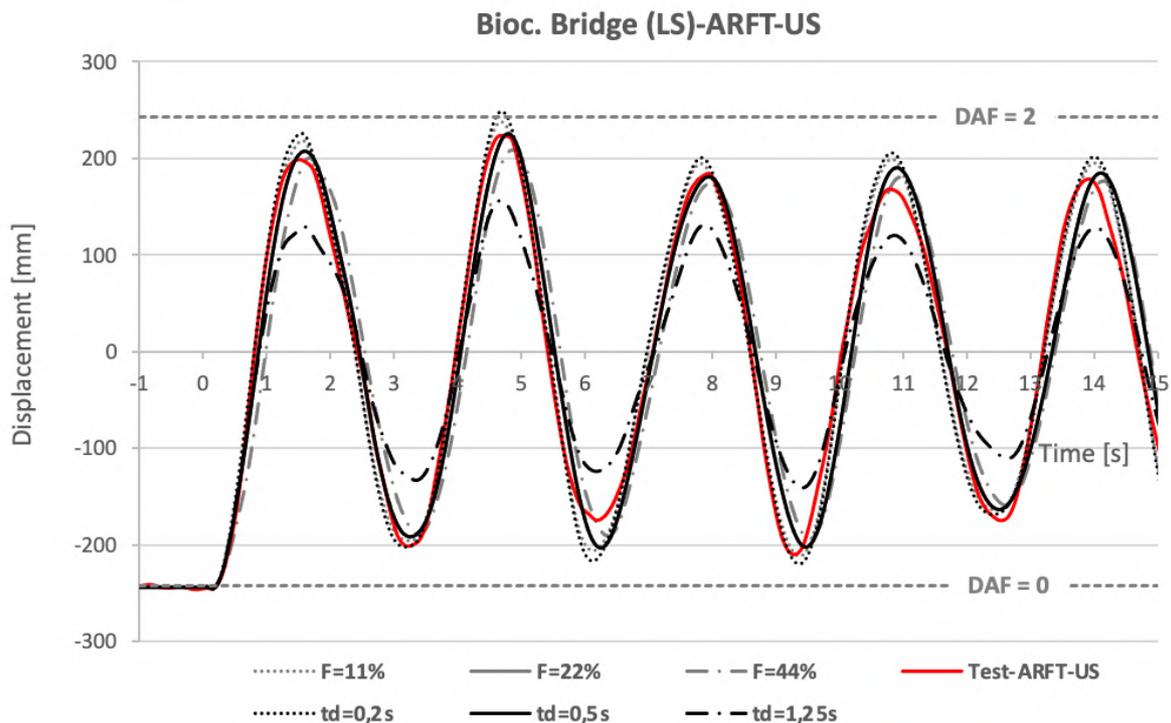


Figura 59. Comparación de los resultados obtenidos durante el proceso de calibración mediante diagramas de Desplazamiento del caso ARFT-US en la LS del Puente Bioceánico.

Podemos concluir, de acuerdo a los resultados obtenidos para cada modelo de ensayo, que el tiempo durante el que afecta la fuerza actuante hasta el vuelco del carro de avance es menor en el caso en que el carro se sitúa bajo el tablero, pues en el caso de ARFT-OH se ejerce una fuerza de 600 kN, equivalente a un 33% de la fuerza total, durante 0,9 s, mientras que en el ensayo ARFT-US se ejerce una fuerza de 400 kN, equivalente al 22% de la fuerza total, durante 0,5 s.

Manteniendo la hipótesis inicial de la representación sensiblemente rectangular para la función Fuerza-Tiempo, si grafiamos los resultados aquí mencionados, se tiene la gráfica de la *Figura 60* para estos dos casos.

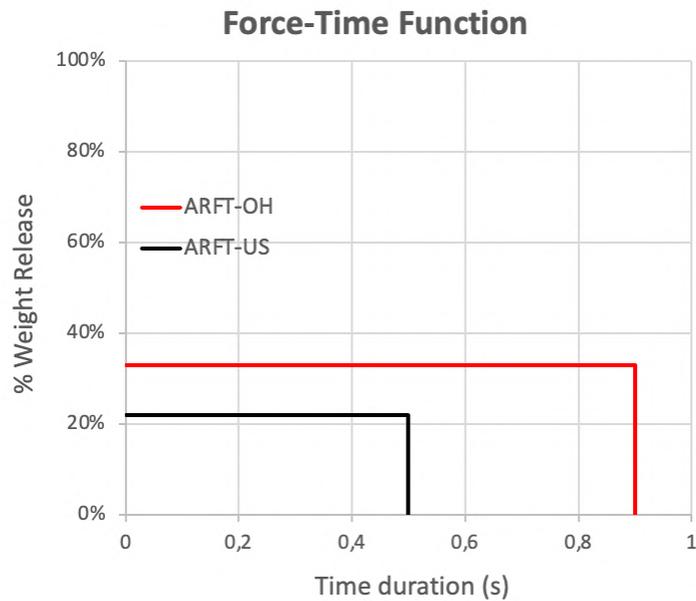


Figura 60. Función Fuerza-Tiempo de los MEF obtenidos para el ensayo de ARFT-OH y ARFT-US [1].

Una vez obtenida la calibración de ambos modelos, se ha de remarcar que, debido a las propiedades mecánicas de los carros de avance utilizados en los distintos ensayos experimentales, y habiendo aplicado mayor excentricidad de las cargas, así como menor inercia rotacional que la que existiría en los casos reales, se puede considerar que los resultados obtenidos son muy conservadores, por lo que deben tenerse en consideración los siguientes aspectos a la hora de aplicar este análisis a otro casos de puente y carros de avance en voladizo.

En primer lugar, debe asumirse que la tipología del puente estudiado no influye directamente en los parámetros obtenidos, es decir, el carro de avance caerá sensiblemente igual independientemente del puente, o dicho de otra manera la caída se produce lo suficientemente rápido como para ser prácticamente la misma, independientemente del puente analizado.

Centrándonos en el valor del peso del carro ( $SW_{FT}$ ), un buen ajuste de los valores de la fuerza ejercida sobre el tablero sería considerar un  $SW_{FT}$  equivalente a un 33 % del peso total ( $SW_T$ ) para los carros OH y un peso  $SW_{FT}$  equivalente a un 22 % del peso total para los carros US.

Centrándonos ahora en el tiempo ( $t_d$ ) de aplicación de la fuerza sobre el tablero, se puede considerar que  $t_d$  es constante para cada tipo de carro de avance. A pesar de la variación del peso del carro que se analice, esta hipótesis es posible debido a que

los efectos de la inercia rotacional y el momento de vuelco tienden a compensarse, es decir, cuanto más pesado es el carro, mayor es el momento de vuelco, pero también es mayor la inercia rotacional. Por tanto, se pueden asumir valores constantes de  $t_d = 0,9$  s en los carros de avance posicionados OH y de valor 0,5 s en los carros US.

Finalmente, hay que aclarar que los valores de la función Fuerza-Tiempo deben aplicarse en sentido opuesto al de la dirección del movimiento inducido por el desplazamiento inicial en un análisis dinámico.

## 4. Resultados

El objetivo principal de este análisis es estudiar la influencia que el carro de avance tiene sobre las fuerzas internas, y compararlo con los resultados obtenidos del método simplificado establecido en las distintas normativas.

Para ello, una vez calibrado el modelo del Puente Bioceánico, y tras obtener la función Fuerza-Tiempo, se aplicó esta función al resto de modelos de elementos finitos definidos en el apartado 2.2.2. *Puente Bioceánico* para modelar la caída del carro mediante cálculos dinámicos con integración directa.

### 4.1. Puente Bioceánico

Continuando con el criterio de muestra de los resultados grafiados en el método de calibración, se exponen a continuación los resultados de los valores considerados y se comparan con el caso de vibraciones libres (FV), representado mediante línea roja continua. Así, se han analizado los momentos flectores obtenidos para la situación de partida (IS) y la situación final (LS), y, dado que no se conoce el amortiguamiento real de la estructura, se han considerado distintos valores de amortiguamiento ( $D$ ): con línea negra continua el caso sin amortiguamiento, es decir,  $D = 0$  %; con línea negra punteada se representan los resultados para un amortiguamiento del 2 %; y con trazado negro de línea-punto, los resultados para un amortiguamiento del 5 %, pues es el valor máximo recomendado por la normativa para este tipo de estructuras.

#### 4.1.1. Situación de partida

Recordemos que la situación inicial (IS) del Puente Bioceánico tiene su momento más crítico en la situación de máximo voladizo soportado por el pilono a la altura del tablero (PS-B), como se mostraba en la *Figura 31* del apartado 2.2.2. *Puente Bioceánico* de este documento.

Es por ese motivo que se muestra la evolución temporal de los momentos flectores en la sección PS-B, tanto en la *Figura 61* para el ensayo ARFT-OH, como en la *Figura 62* para el ensayo ARFT-US.

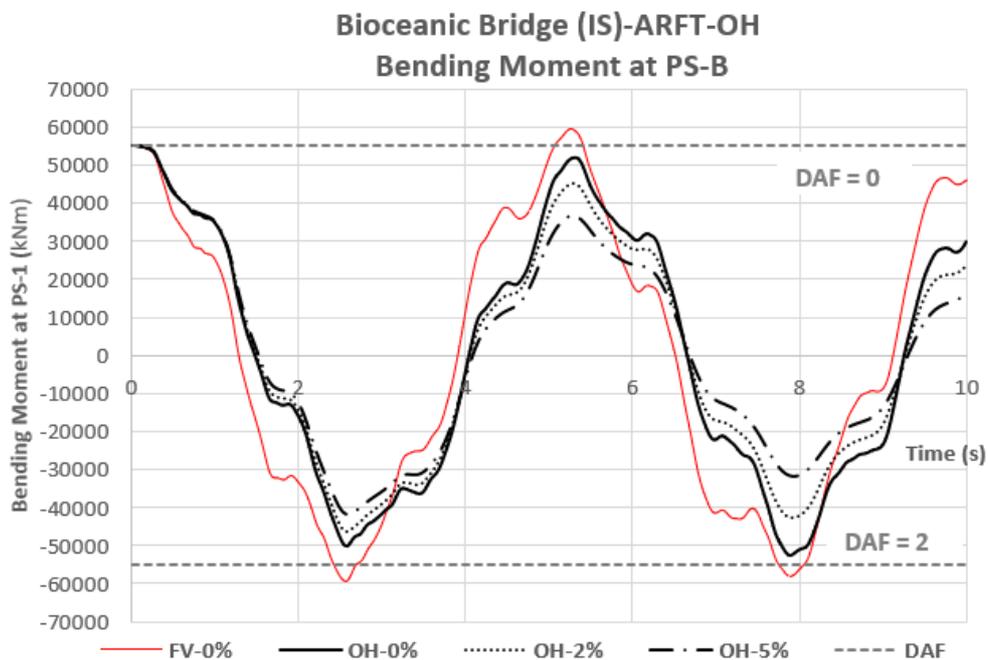


Figura 61. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1].

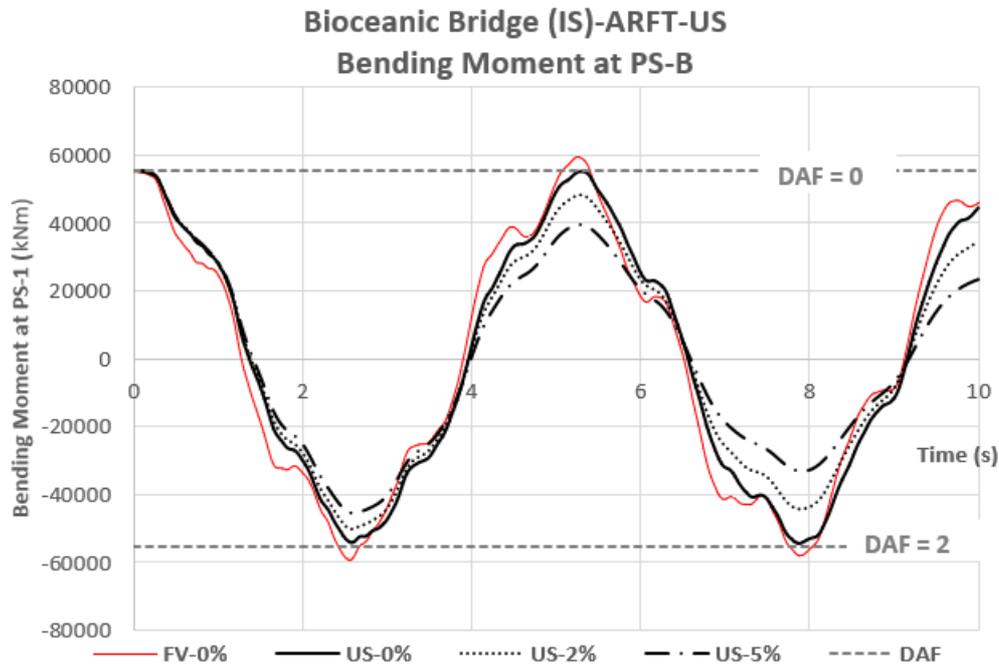


Figura 62. Diagrama Momento flexor vs Tiempo en la sección PS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1].

#### 4.1.2. Situación final

Como se señalaba en la *Figura 33* del apartado 2.2.2. *Puente Bioceánico* de este documento, para el caso de la situación final (LS) se analizan las secciones más críticas, situadas en la parte superior del pilono (PS-T), en la punta del tablero (DS-F) y en la zona anterior del tablero (DS-B), donde los tirantes dejan de verse afectados por la carga en punta.

Así, en la *Figura 63* se muestran los resultados obtenidos en la sección PS-T del ensayo ARFT-OH, y en la *Figura 64* los del ensayo ARFT-US en esta misma sección. Mostrando en todos los análisis las líneas de DAF=2 para ver lo cerca o lejos que está de las recomendaciones de las normativas.

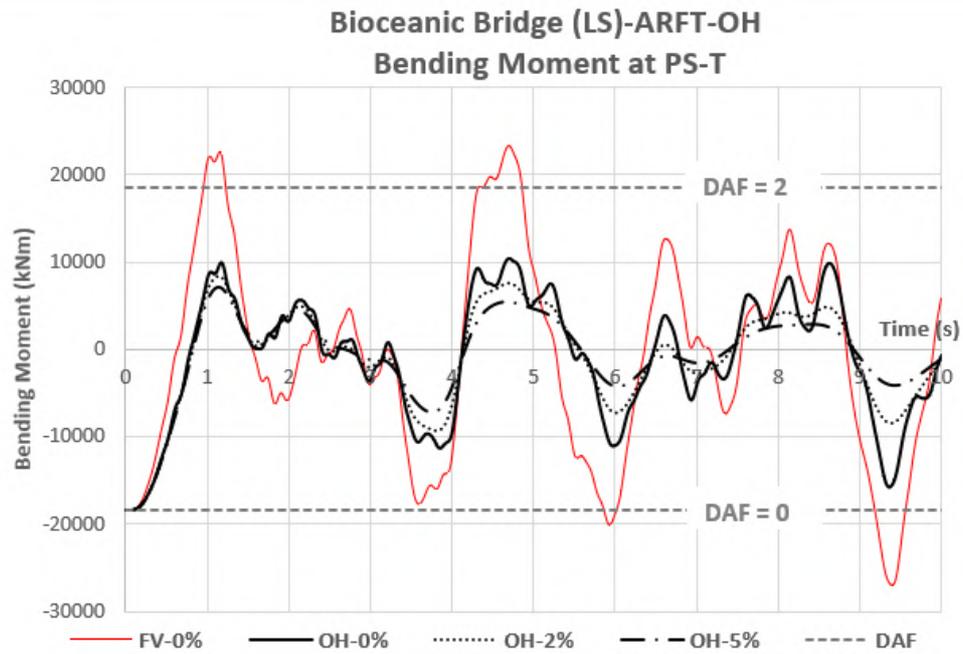


Figura 63. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-T del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1].

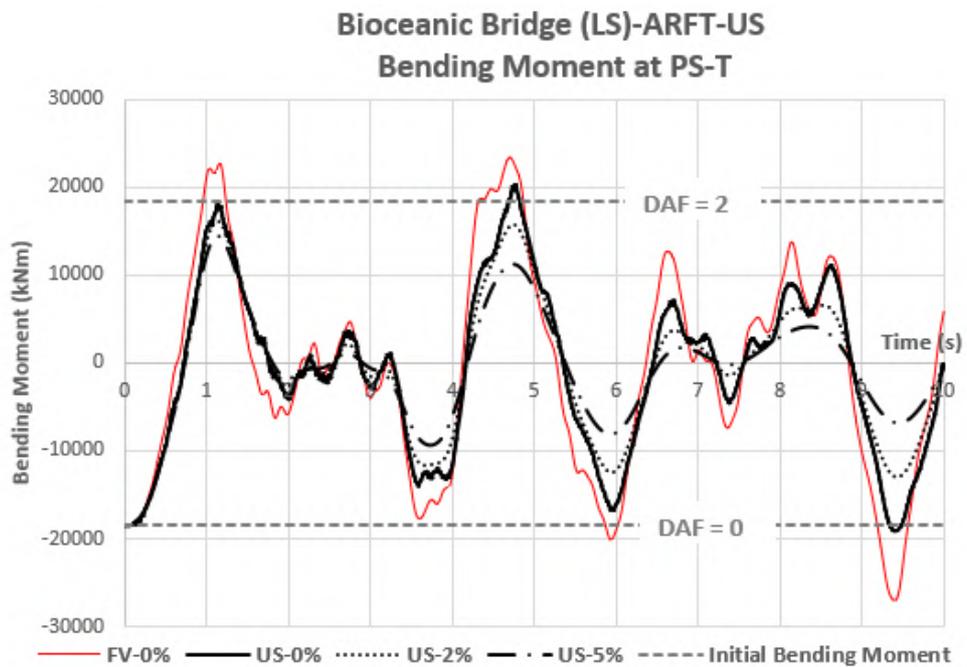


Figura 64. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS-T del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1].

En la *Figura 65* se muestran los resultados obtenidos en la sección DS-F del ensayo ARFT-OH, y en la *Figura 66* los del ensayo ARFT-US en esta misma sección.

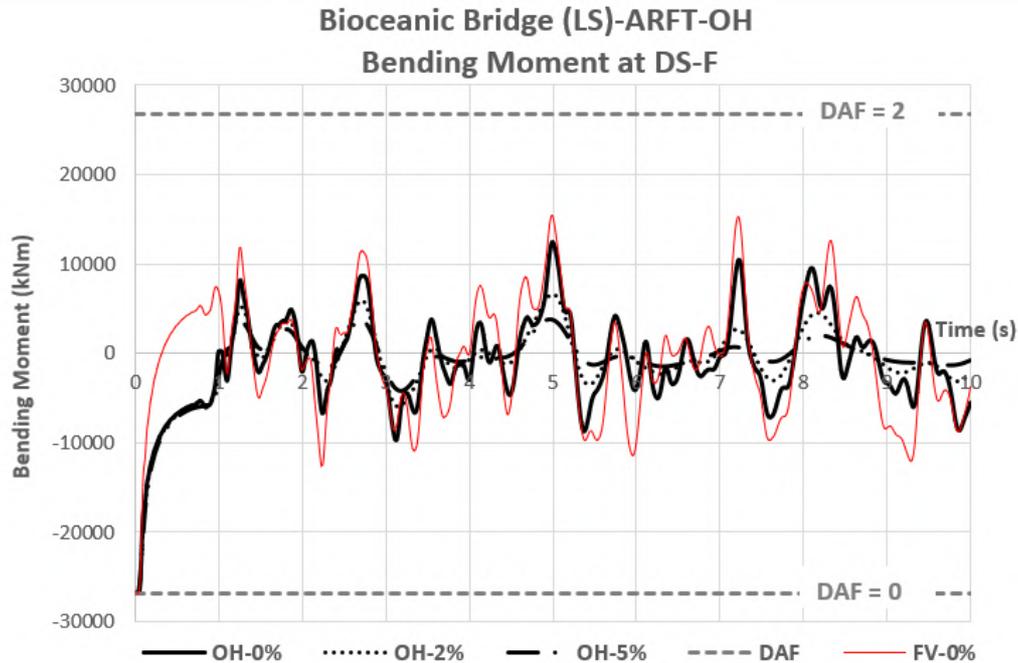


Figura 65. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-F del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1].

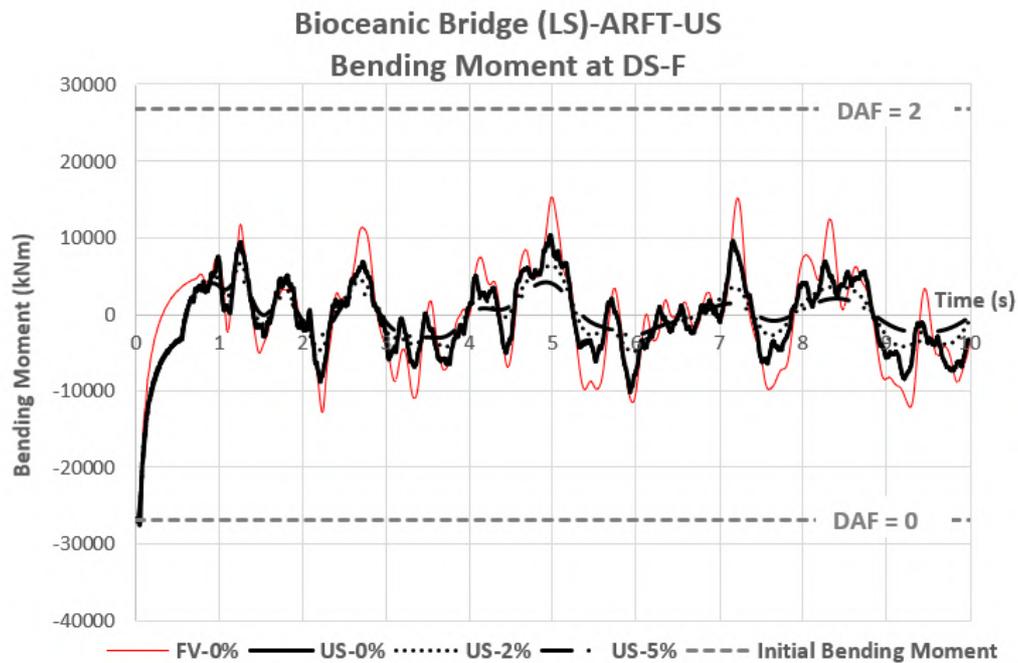


Figura 66. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-F del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1].

Finalmente, la *Figura 67* muestra los resultados obtenidos en la sección DS-B del ensayo ARFT-OH, y la *Figura 68*, los del ensayo ARFT-US en la misma sección.

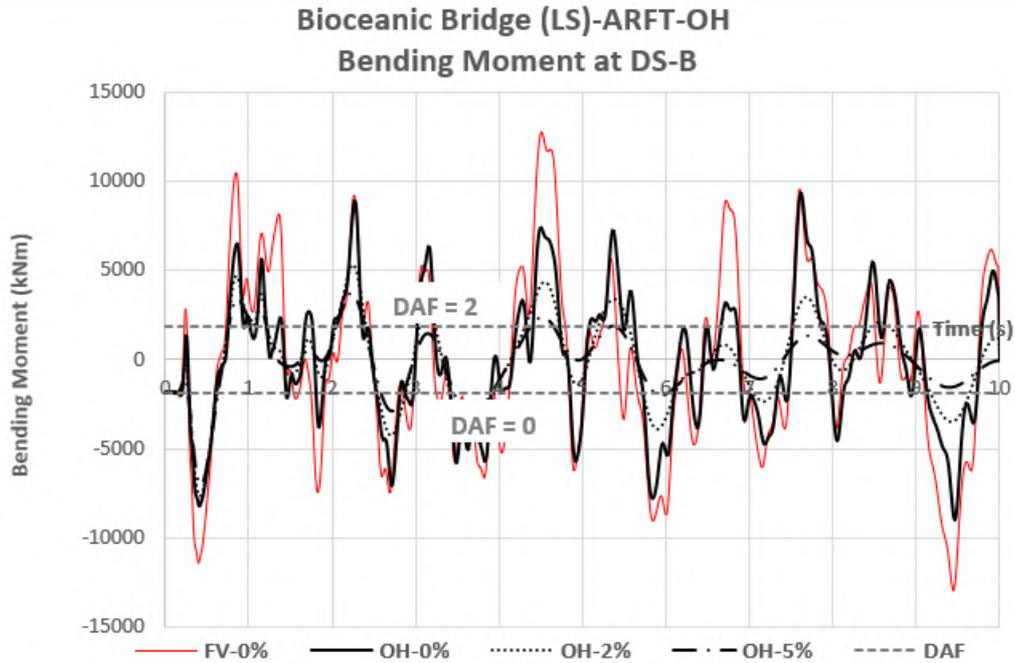


Figura 67. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-OH [1].

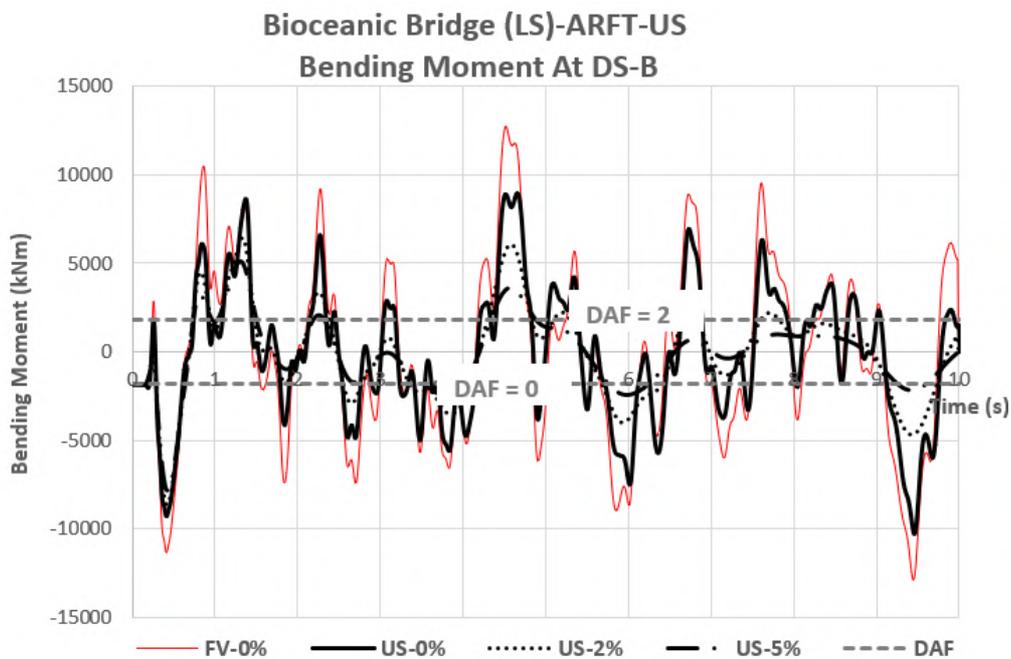


Figura 68. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS-B del Puente Bioceánico para el caso de ARFT-US [1].

## 4.2. Puente Chilina

A continuación, se hace el mismo análisis para los casos de aplicación del Puente Chilina. Haciendo uso de las hipótesis descritas al final del apartado 3.4. *Calibración de la función Fuerza-Tiempo equivalente*, donde se asume que la tipología del puente no influye directamente sobre los parámetros obtenidos, así como el hecho de que en los puentes de viga continua se emplean para su construcción la tipología de carro OH. Se presentan ahora los resultados para las secciones indicadas (PS y DS) en la *Figura 35* situada en el apartado 2.2.3. *Puente Chilina* de este documento.

Así, en la *Figura 69* se muestran los resultados obtenidos en la sección de la pila (PS) para el caso de ARFT-OH, mientras que en la *Figura 70* se ilustran los obtenidos en la sección del tablero (DS) para el mismo caso de ensayo.

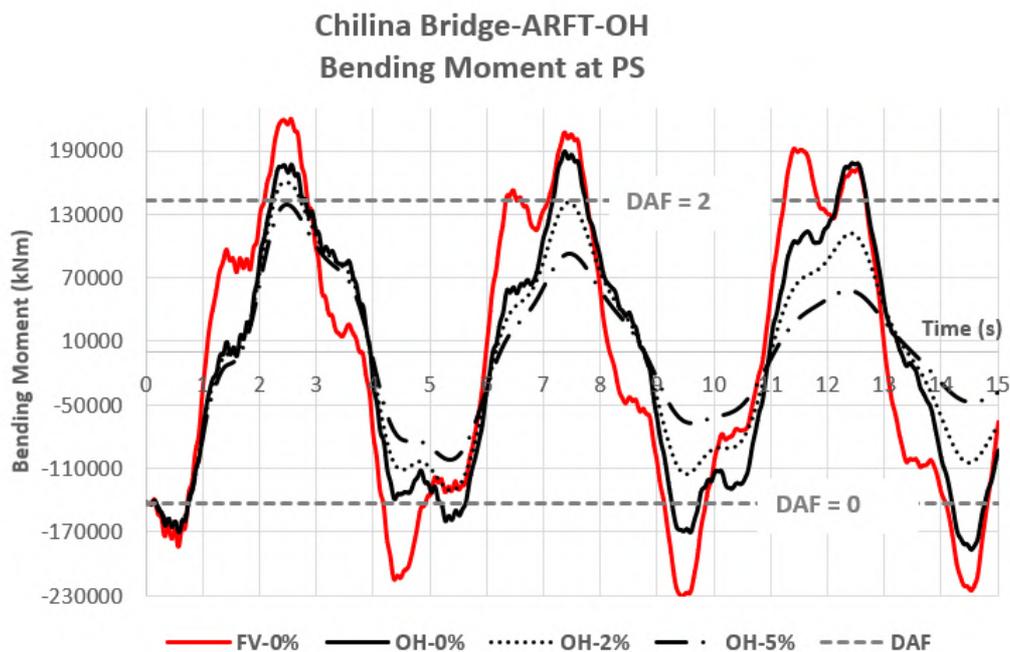


Figura 69. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección PS del Puente Chilina para el caso de ARFT-OH [1].

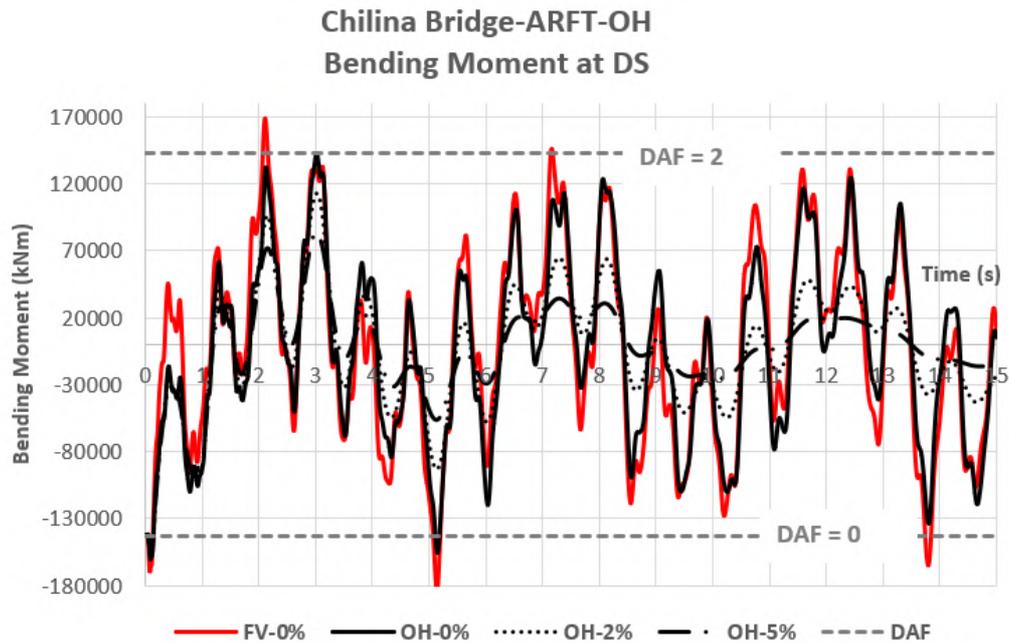


Figura 70. Diagrama Momento flector vs Tiempo en la sección DS del Puente Chilina para el caso de ARFT-OH [1].

### 4.3. Análisis de los resultados

A continuación, se analizan los resultados del **Factor de Amplificación Dinámica (DAF)** obtenidos para los momentos flectores de los distintos casos y secciones analizadas en el Puente Bioceánico y el Puente Chilina.

En la *Tabla 1* se muestran los valores máximos obtenidos para el Factor de Amplificación Dinámica (DAF) de acuerdo a los momentos flectores. Estos valores muestran la variación del DAF para los diferentes amortiguamientos y tipologías de carros de avance (OH y US), así como los valores máximos en el caso de vibraciones libres (FV) en cada situación.

Tabla 1. Factor de Amplificación Dinámica (DAF) para los momentos flectores de las secciones analizadas [1].

Puente	Tipo	DAF						
		FV	OH			US		
			0%	0%	2%	5%	0%	2%
	Sección							
Bioceánico	IS/PS-B	<b>2,07</b>	1,95	1,84	<b>1,75</b>	1,98	1,91	<b>1,82</b>
	LS/DS-B	<b>7,93</b>	6,04	3,88	<b>3,05</b>	5,87	4,49	<b>3,80</b>
	LS/DS-F	<b>1,57</b>	1,46	1,25	<b>1,14</b>	1,38	1,25	<b>1,18</b>
	LS/PS-T	<b>2,27</b>	1,56	1,46	<b>1,38</b>	2,09	1,88	<b>1,78</b>
Chilina	DS	<b>2,18</b>	<b>2,00</b>	1,79	<b>1,58</b>	-	-	-
	PS	<b>2,54</b>	2,33	2,12	<b>1,97</b>	-	-	-

Iniciando el análisis de los datos de acuerdo a las especificaciones de las normativas vigentes, los momentos flectores obtenidos en el caso del ensayo de FV resultan en valores de DAF significativamente mayores a 2 en las secciones LS/DS-B, LS/PS-T y PS. Esto se explica debido a que, a pesar de que en los sistemas de 1GDL el valor máximo del DAF es igual a 2 tanto para desplazamientos, como para fuerzas internas, cuando se trata de estructuras con más de un modo de vibración, el valor del DAF máximo no necesariamente es 2 para las fuerzas internas del sistema, como sucede en las estructuras de puentes.

Sin embargo, observando la *Tabla 1*, se aprecian resultados de desplazamientos próximos a un  $DAF = 2$ , lo que se explica principalmente porque el modo fundamental es el que genera el desplazamiento total de un punto y, por tanto, se puede afirmar que el comportamiento en ese punto será bastante aproximado al de un sistema de 1 GDL. Caso contrario a lo que sucede con las fuerzas internas, que no son generadas por un modo predominante de vibración y, por tanto, su comportamiento no es asumible a un sistema de 1GDL. Esto implica que la combinación de fuerzas puede producir fuerzas internas mayores que las iniciales, tanto positivas como negativas, por tanto, respecto de las fuerzas internas podrán resultar valores del  $DAF > 2$  y  $DAF < 0$ .

Se analiza a continuación la sección LS/DS-B. En esta puede observarse que el método simplificado no es de aplicación en aquellos casos estáticos donde las fuerzas internas no alcancen valores suficientemente notables, ya que, al comparar los resultados del caso estático (prácticamente despreciables) con los derivados del análisis vibratorio, pueden aparecer valores del DAF considerablemente altos, como sucede en el caso de FV, con un valor de  $DAF = 7,93$ , el cual es muy mayor que el

DAF = 2 que indican las normativas. Esto se explica debido a la gran influencia que el peso propio tiene sobre las estructuras de puentes de viga continua, que resulta en altos valores de sus momentos flectores en comparación con los generados por la vibración, incluso cuando el DAF sea elevado. Por lo tanto, solo tendría sentido considerar esta sección (LS/DS-B) cuando se trate de estructuras dominadas por cargas móviles y, en consecuencia, se excluirá esta sección de los posteriores análisis.

Por otro lado, se observa tanto en los máximos, como a lo largo de las gráficas mostradas en la *Figura 65* y *Figura 66*, que en la sección LS/DS-F ocurre lo contrario, los valores de los momentos flectores se sitúan lejos del DAF = 2 que indican las normativas, por lo tanto, aplicarlo implicaría sobredimensionar significativamente la sección. Finalmente, puede observarse cómo, al considerar los efectos de ARFT, tanto en el ensayo OH, como en el US, y un amortiguamiento del 5 %, no se alcanza en ningún caso el valor de DAF = 2, incluso se obtiene un margen considerable en la sección LS/DS-F.

Otro dato interesante de analizar es el **Factor de Reducción Dinámica, DRF** (por sus siglas en inglés: *Dynamic Reduction Factor*), el cual se refiere a la relación entre la respuesta dinámica real y la respuesta dinámica teórica de la estructura. Es decir, el DRF relaciona el momento flector considerando los ajustes debidos al amortiguamiento o a la interacción del carro de avance con el puente, con el momento flector ideal, en condiciones sin disipación de energía.

En la *Tabla 2* se muestran los resultados del DRF obtenidos para los casos en estudio, indicando la reducción que la ARFT tiene respecto del caso de FV (situación ideal, sin disipación de energía), tanto en la situación OH, como en la US.

Tabla 2. Factor de Reducción Dinámica (RAF) para los momentos flectores de las secciones analizadas [1].

Puente	DRF								OH <sub>5%</sub> / US <sub>5%</sub>	
	Tipo	FV	OH			US				
	Amortiguamiento	0%	0%	2%	5%	0%	2%	5%		
	Sección									
Bioceánico	IS/PS-B	1,00	0,89	0,78	<b>0,70</b>	0,92	0,85	<b>0,77</b>	<b>0,92</b>	
	LS/DS-B	1,00	0,73	0,42	<b>0,30</b>	0,70	0,50	<b>0,40</b>	<b>0,73</b>	
	LS/DS-F	1,00	0,81	0,43	<b>0,25</b>	0,67	0,44	<b>0,31</b>	<b>0,80</b>	
	LS/PS-T	1,00	0,44	0,36	<b>0,30</b>	0,86	0,69	<b>0,62</b>	<b>0,49</b>	
Chilina	DS	1,00	0,86	0,73	<b>0,63</b>	-	-	-	-	
	PS	1,00	0,85	0,66	<b>0,49</b>	-	-	-	-	

Una primera observación es el hecho de que la ARFT afecta de manera diversa en las distintas situaciones. Para el ensayo OH se observan variaciones respecto del ensayo de FV que oscilan entre un 25 % y un 70 %, mientras que para el ensayo US las variaciones oscilan entre un 31 % y un 77 %; esto significa que se requiere un análisis dinámico para cada caso sobre el que se quiera conocer la amplificación real.

Finalmente, en la *Tabla 2* también se analizó la diferencia que existe entre los ensayos ARFT-OH y ARFT-US, comparando uno a uno los distintos casos con un amortiguamiento del 5 %. De esta comparación se cuantifica que existe una variabilidad entre los distintos casos estudiados, que van desde un 8 % en la sección IS/PS-B, hasta un 51% en la sección LS/PS-T. Sin embargo, en cualquier caso, se puede afirmar que es más efectiva la reducción de las fuerzas internas en el ensayo con el carro de avance OH que en el carro US.

## 5. Conclusiones

Para finalizar el documento, se procede a exponer las conclusiones. Por un lado, las del propio estudio llevado a cabo en el presente trabajo, y, por otro lado, las que me llevo personalmente como aprendizaje a lo largo de todo este proceso.

### 5.1. Conclusiones de la investigación

Este estudio tiene como objetivo analizar la influencia que el carro de avance tiene sobre las fuerzas internas, y compararlo con los resultados obtenidos del método simplificado establecido en las distintas normativas vigentes. Así, se muestran resultados obtenidos para la caída accidental de un carro de avance (ARFT) durante las fases de construcción de puentes. Para ello, se aborda el análisis desde la

perspectiva propuesta por las normativas vigentes, aplicando métodos simplificados, así como desde análisis experimentales y numéricos que permitan comparar los resultados.

Para realizar los análisis experimentales se construyó una maqueta a escala del Puente Bioceánico en su fase de construcción para poder simular los ensayos de ARFT. Seguidamente, con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales, se definieron y calibraron los modelos de elementos finitos (MEF) empleados para los análisis numéricos, quedando así definida la fuerza que el puente soporta durante el tiempo que dura el proceso de vuelco del carro de avance a lo largo de las fases críticas del proceso constructivo.

El estudio se realizó tanto para el Puente Bioceánico, atirantado, como para el Puente Chilina, de tipología viga continua, considerando un análisis del MEF frente a la ARFT en sus secciones críticas.

De los distintos análisis de esta investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- Las normativas consultadas describen dos enfoques para abordar el problema de la caída accidental del carro en el diseño de puentes. Por un lado, el método simplificado, considerando un factor de ampliación dinámica (DAF) de 2 respecto del caso estático, y, por otro lado, un análisis dinámico específico del cual no se prescriben pautas de aplicación.
- Para este estudio, se han analizado los resultados del DAF obtenido y se han realizado análisis dinámicos. Así, durante los ensayos experimentales llevados a cabo para esta investigación se utilizaron carros de avance con propiedades mecánicas modificadas, puesto que los carros ensayados tienen menor momento de inercia polar y mayor excentricidad de la carga que los carros de avance reales.

A partir de estos datos, se han obtenido las funciones Fuerza-Tiempo, que se pueden considerar conservadoras (más ligeras y cortas que las reales), y que logran un buen ajuste frente a los resultados experimentales. Estas funciones Fuerza-Tiempo, consideradas de forma rectangular, se pueden resumir en función del peso propio total que cae ( $SW_T$ ).

Para el caso del carro de avance situado sobre el tablero (OH, por sus siglas en inglés: *OverHead*), la fuerza aplicada sobre el puente puede asumirse

como  $SW_T/3$  durante 0,9 s. Mientras que para el caso del carro de avance situado bajo el tablero (US, por sus siglas en inglés: *UnderSlung*), la fuerza aplicada sobre el puente puede asumirse como  $SW_T/5$  durante 0,5 s.

Estas fuerzas deben aplicarse en sentido opuesto al movimiento producido por el desplazamiento estático inicial debido al peso propio en la posición equilibrada antes de la caída.

- Las funciones Fuerza-Tiempo descritas en esta investigación se han obtenido a partir de pruebas experimentales del carro de avance que cae desde un puente atirantado, y se han utilizado para simular el comportamiento dinámico mediante modelos numéricos en otras tipologías de puente, asumiendo la hipótesis de que esta función no cambiaría significativamente si el mismo carro de avance cayera desde un puente diferente.

Sin embargo, sería interesante, aunque no se ha llevado a cabo en esta investigación, verificar experimentalmente esta hipótesis mediante pruebas de caída de carros de avance en otras tipologías de puente.

- Finalmente, cabe mencionar que se realizó una comparación entre los carros de avance OH y US. Destacando la tipología OH como más segura en relación a la US desde el punto de vista de ARFT, ya que, como se puede observar en la última columna de la *Tabla 2*, durante el proceso de vibración, con la tipología OH las fuerzas internas sobre el puente se redujeron entre un 8% (en el caso de la sección IS/PS-B analizada) y hasta un 51% (en el caso de la sección crítica LS/PS-T).
- Los cálculos dinámicos que utilizan estas funciones de Fuerza-Tiempo para considerar la ARFT proporcionan resultados más precisos y fiables que los arrojados por el método simplificado propuesto por las normativas, que proponen multiplicar el caso estático por un DAF de 2.

Así, los resultados del análisis realizado en esta investigación muestran que, dependiendo del valor de amortiguamiento seleccionado, de la tipología de puente, y de la posición del carro de avance, así como de la fase de construcción, el DAF en secciones críticas puede ser significativamente mayor que 2 (alcanzando  $DAF = 2,54$ ) o claramente inferior ( $DAF = 1,14$ ).

Esto es debido a que los puentes son sistemas de múltiples grados de libertad, por lo que al simplificar su análisis como al de un sistema de un solo

grado de libertad, igual que en el método simplificado de las normativas, puede llevar a una pérdida de precisión. Es decir, debido al comportamiento multimodal propio de los puentes complejos, existen algunos casos en los que el método simplificado puede sobredimensionar la estructura, y otros en los que la minora, o lo que es lo mismo, que infravalora el comportamiento real de la estructura, quedando del lado de la inseguridad.

- Así, podemos concluir que, para aquellos casos en los que las normativas recomiendan un análisis dinámico específico, esta investigación ha desarrollado una metodología que puede ser de fácil aplicación para el diseño de puentes, y, a pesar de su carácter conservador, obtiene resultados mucho más realistas que el método simplificado de las normas, ya que trata a los puentes como lo que son: sistemas de múltiples grados de libertad.

## 5.2. Aprendizaje

No quería dejar pasar este apartado como una mera enumeración de las conclusiones técnicas alcanzadas, sino también comentar otras reflexiones que han resultado en un aprendizaje para mí durante el desarrollo del trabajo.

Por un lado, se me ha permitido poder llevar a cabo el análisis de resultados de un ensayo real a escala, pudiendo observar las dificultades que esto entraña, lo raro que es hacer ensayos con un modelo aeroelástico debido a su coste de ejecución, así como las ventajas que pueden obtenerse del mismo.

Por otro lado, tener acceso a todos los datos y comentarios sobre ese modelo me han permitido tener una visión global más cercana tanto al puente real, como a lo que implica realizar este tipo de estudios y, por supuesto, me han permitido la comprensión del modelo de elementos finitos que posteriormente se definió.

Realizar el ajuste y calibración del MEF me hizo vivir de primera mano que el cálculo no es tan sencillo como en un problema de clase, aunque cuando entiendes los parámetros que estás trabajando, los resultados te brindan mucha más información que el propio enunciado de un problema, por lo que es importante tener bien asentadas las bases teóricas para poder realizar modelos prácticos. Así, por mucho que los programas informáticos calculen cada vez de manera más “autónoma”, es importante que la persona que lo está utilizando tenga claro lo que está haciendo, para qué lo está haciendo, y qué busca conseguir con ello.

Finalmente, uno de los aspectos que me han resultado más llamativos es el hecho de que parece que tengamos una confianza ciega en las normativas (porque funcionan), pero a veces no nos planteamos el porqué de las formulaciones que proponen, cuando, como hemos podido comprobar en este estudio, en ocasiones se trata de cálculos mayorados por pretender estar del lado de la seguridad, aun a veces sin conseguirlo, pero sin contrastar prácticamente una solución mejor o más ajustada.

Todo esto nos lleva a la necesidad de ser críticos a la hora de trabajar. Independientemente de lo potente que sea el programa o los años que lleve utilizándose un modo de cálculo, no hay que aplicarlo “porque lo dice aquí”, sino que hay que confiar en lo que se está haciendo porque previamente se ha entendido el proceso a llevar a cabo.

En conclusión, cuestionarse las cosas y entender los porqués son la clave para encontrar las mejores soluciones.

### 5.3. Relación con los ODS

Se puede afirmar que el presente trabajo, centrado en el análisis dinámico del comportamiento estructural de puentes ante la caída accidental del carro de encofrado durante su construcción, tiene su vinculación con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Aunque se trata de una investigación de carácter técnico-estructural, su impacto trasciende lo ingenieril y se alinea con metas globales en materia de sostenibilidad, resiliencia e innovación.

- **ODS 9. Industria, innovación e infraestructura**

El estudio contribuye directamente al ODS 9, cuya meta 9.1 promueve el desarrollo de infraestructuras fiables, sostenibles y resilientes. La metodología propuesta permite realizar análisis dinámicos más precisos y realistas frente a situaciones accidentales durante la construcción de puentes mediante voladizos sucesivos. Al superar las limitaciones de los métodos simplificados actualmente recogidos en las normativas, se fortalece la fiabilidad estructural y se promueve la innovación técnica en el diseño de infraestructuras críticas.

- **ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles**

Los puentes, como parte fundamental de las redes de transporte, desempeñan un papel esencial en la conectividad territorial. El análisis del comportamiento dinámico ante eventos accidentales durante la fase constructiva aporta directamente al ODS 11, en particular a la meta 11.2, al contribuir a que estas infraestructuras sean más seguras y duraderas. Reducir la probabilidad de fallos estructurales durante la ejecución de obras no solo protege a los trabajadores y usuarios futuros, sino que también preserva la funcionalidad del entorno urbano y/o rural que conecta esta estructura.

- **ODS 12. Producción y consumo responsables**

El uso de un modelo dinámico calibrado experimentalmente permite evitar tanto el sobredimensionamiento como el infra-dimensionamiento de elementos estructurales, lo que implica un uso más eficiente y racional de los materiales. Esto se vincula con la meta 12.2, orientada al uso sostenible de los recursos naturales. Además, la reducción de incertidumbres mediante modelos realistas mejora la toma de decisiones en etapas tempranas del proyecto, minimizando el riesgo de desperdicios, rehacer trabajos o sobrecostos, alineándose con los principios del diseño sostenible.

- **ODS 13. Acción por el clima**

Aunque el estudio no aborda directamente los efectos del cambio climático, se puede entender que su aportación metodológica también se alinea con la meta 13.1, al reforzar la capacidad de respuesta de las infraestructuras ante eventos extremos y repentinos, como es la ARFT. La metodología desarrollada podría extrapolarse y adaptarse a otros escenarios dinámicos, ayudando a crear estructuras más adaptativas y resilientes frente al contexto de variabilidad climática creciente.

En resumen, se puede concluir que este estudio contribuye de forma directa a los ODS 9 y 12, al fomentar infraestructuras más seguras e innovadoras mediante métodos de análisis dinámico realistas y eficientes, que optimizan el uso de recursos y materiales en la construcción de puentes. De forma complementaria, también se relaciona con los ODS 11 y 13, al favorecer estructuras más sostenibles y resilientes frente a eventos extremos y al servicio de comunidades mejor conectadas.

## 6. Bibliografía

- [1] J. Sánchez-Haro, G. Capellán, P. Pérez, y T. Argentini, «A simplified approach to assess dynamic amplification due to accidental release of formwork traveller during the construction stages of bridges», *Engineering Structures*, vol. 305, p. 117715, abr. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117715.
- [2] J. Manterola, «Evolución de los puentes en la historia reciente», *Informes de la Construcción*, vol. 35, n.º 359-360, Art. n.º 359-360, may 1984, doi: 10.3989/ic.1984.v35.i359-360.1949.
- [3] admin, «Carro de avance CVS | ULMA Construction». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ulmaconstruction.es/es-es/encofrados/encofrados-puentes/carro-avance-cvs>
- [4] E. Alarcón Álvarez, «Sistemas con un grado de libertad», en *Sistemas con un grado de libertad | En: Curso de cálculo dinámico en la ingeniería civil | pag. 1-53 | Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos | 1973*, Madrid: E.T.S.I. Industriales (UPM), 1973, pp. 1-53. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/28953/>
- [5] V. Meruane, «Vibraciones Mecánicas Apuntes para el curso ME4701», p. 146, mar. 2012.
- [6] *Eurocode 1: UNE-EN 1991-1-6*. 1991. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/une-en-1991112003/251314961>
- [7] ASSHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition*. 2020. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://trid.trb.org/View/1704698>
- [8] Service d'Études techniques des routes et autoroutes (SETRA), «Guide de conception: Ponts en béton precontraint construits par encorbellements successifs.» 2003.
- [9] «Norma Española. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera.» 2012. [En línea]. Disponible en: [https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/0820303.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0820303.pdf)
- [10] Universidad Industrial de Santander *et al.*, «Factor de amplificación dinámico ante la caída del carro de avance durante la construcción de un puente de viga cajón por el método de voladizos sucesivos», *revuin*, vol. 18, n.º 3, pp. 193-202, abr. 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n3-2019020.
- [11] E. Rodríguez, «Corredor Bioceánico y la importancia para el desarrollo económico del Cono Sur», CPI. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infraestructurapublica.cl/corredor-bioceanico-y-la-importancia-para-el-desarrollo-economico-del-cono-sur/>
- [12] «BIOCEÁNICO BRIDGE. Paraguay-Brazil | Arenas&Asociados». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.arenasing.com/projects/signature-bridges-cable-bridges/bioceanico-bridge-paraguay-brazil>

- [13] G. Capellán y M. Sacristán, «Chilina Bridge over the Chili River in Arequipa. Balanced cantilever segmental bridge in high seismicity area», en *IABSE Symposium Madrid 2014*, 2014, pp. 2110-2117. doi: 10.2749/222137814814068643.
- [14] «CHILINA BRIDGE. Peru | Arenas&Asociados». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.arenasing.com/projects/signature-bridges-rail-road-bridges/chilina-bridge-peru>
- [15] «Overhead Form Traveller|Shenghua Heavy Crane Group China Manufacturer and Supplier», HSHCL. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.shenghuacrane.com/products/form-traveller/overhead-form-traveller>
- [16] B. Ltd, «Underslung Form Traveller/ Bridge Builder», BECT Ltd. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bectltd.com/underslung-form-traveller.html>
- [17] E. F. Valero, «APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. TESIS DOCTORAL.».
- [18] «(PDF) Finite Element Model Updating of RC Bridge Structure with Static Load Testing: A Case Study of Vietnamese ThiThac Bridge in Coastal and Marine Environment», *ResearchGate*, abr. 2025, doi: 10.3390/s22228884.
- [19] «(PDF) Dynamic Analysis of Historic Railway Bridges in Poland in the Context of Adjusting Them to Pendolino Trains», *ResearchGate*, doi: 10.1515/ijame-2015-0019.
- [20] Yumpu.com, «Tutorial SSD / SOFiPLUS - A Quick Reference - SOFiSTiK», yumpu.com. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/read/27727066/tutorial-ssd-sofiplus-a-quick-reference-sofistik>
- [21] «SOFiSTiK | Documentation and Resources». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.sofistik.com/en/>
- [22] J. Sánchez-Haro, I. Lombillo, y G. Capellán, «Modelling criteria proposal for dynamic analysis of beam bridges under moving loads using fem models», *Structures*, vol. 50, pp. 651-669, abr. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.02.067.
- [23] «Diseño aeroelástico de puentes de gran vano: la lucha contra el viento», *Revista de Obras Públicas*. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistadeobraspublicas.com/articulos/disenio-aeroelastico-de-puentes-de-gran-vano-la-lucha-contra-el-viento/>
- [24] I. U. Spinelli, I. F. Calamelli, y I. G. Crespi, «Pruebas de túnel de viento sobre el modelo aeroelástico del Puente Binacional».

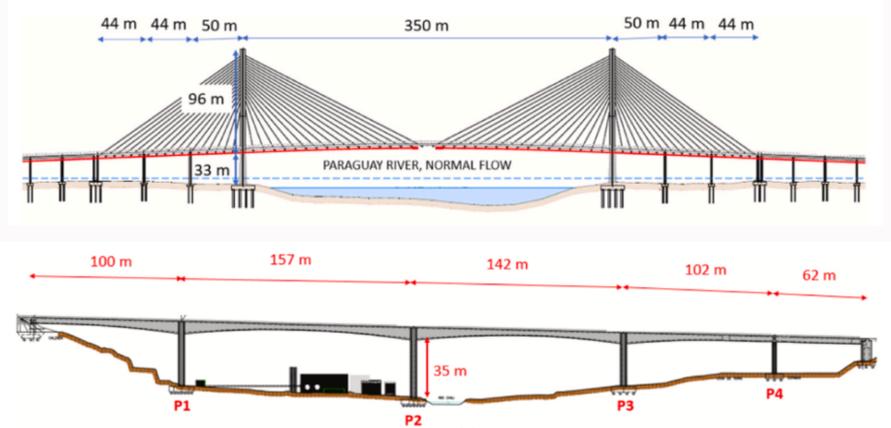
Autora: Paula Pérez García

## 1. OBJETIVO

El objetivo principal del estudio es analizar el factor de amplificación dinámica (DAF) de los esfuerzos generados por la **caída accidental de un carro de avance** durante la construcción de puentes mediante el método de voladizos sucesivos respecto del caso estático, centrándose en dos casos reales: el **Puente Bioceánico** (atirantado) y el **Puente Chilina** (de viga continua).

El estudio se fundamenta en la necesidad de evaluar si el  $DAF = 2$  recomendado por normativa es realmente adecuado y seguro para este tipo de situaciones accidentales.

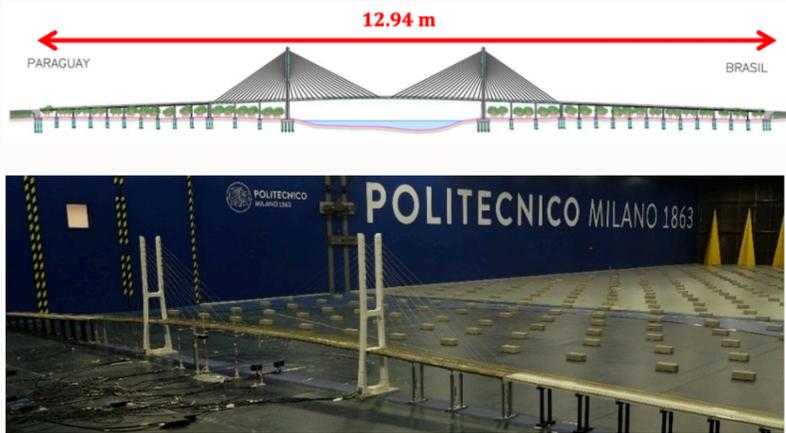
Puentes analizados: Puente Bioceánico (arriba) y Puente Chilina (abajo)



## 2. MATERIAL Y METODOLOGÍA DEL ENSAYO

### ENSAYOS EN MAQUETA A ESCALA 1:100

Maqueta a escala 1:100 del Puente Bioceánico para ensayos aeroelásticos y del comportamiento frente a la caída del carro en el Polimi.



### MODELO NUMÉRICO CON SOFISTIK Y COMPARACIÓN DE MODELOS

Comparación entre modelos ensayados en laboratorio y software con puentes reales ya construidos, o en fase de ejecución.

Puente Chilina. MEF VS Construcción real



Puente Bioceánico. MEF (IS) VS Construcción real

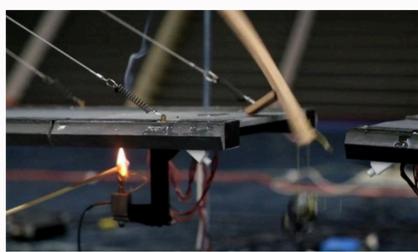
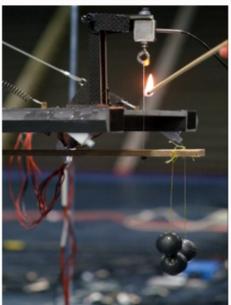


Puente Bioceánico. Maqueta del carro VS Carro real

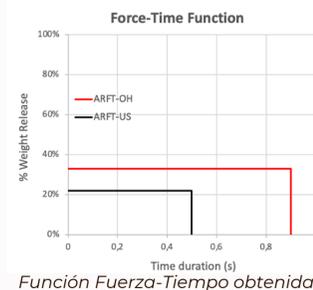
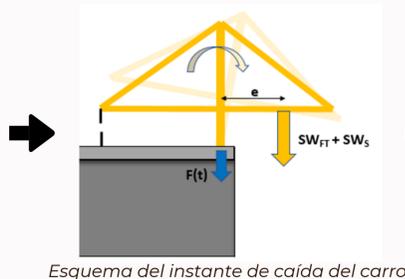


### CALIBRACIÓN DE LOS RESULTADOS

- Se estudian dos tipologías de carros: situados bajo el tablero del puente (**US**) y sobre el tablero (**OH**).
- Se calibran los resultados de los ensayos en laboratorio para obtener la **función Fuerza-Tiempo** debida a la caída del carro de avance. Esta depende de la **tipología del carro** y de **su peso** ( $SW_{FT} + SW_S$ ).

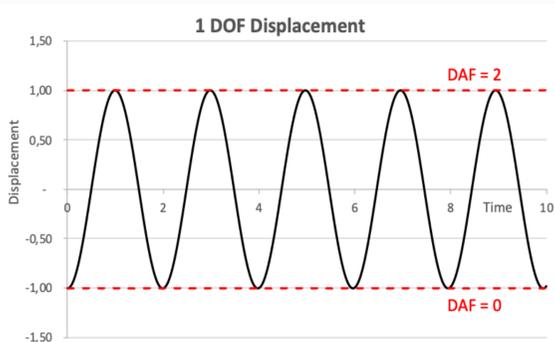


Maquetas de carros ensayados en laboratorio  
Carro US (izquierda) vs Carro OH (derecha)

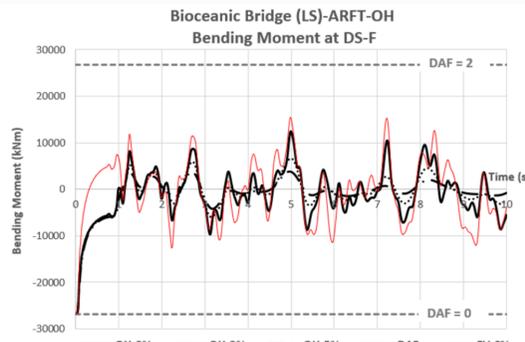


## 3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

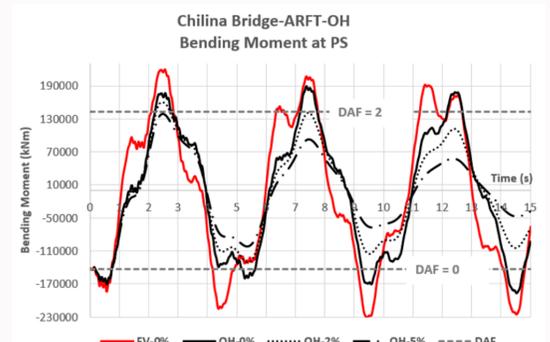
1. Para el caso accidental de la caída del carro, las normativas sugieren el método simplificado con un  $DAF = 2$  o un cálculo no simplificado no definido.
2. Los resultados muestran que, tras calibrar la función Fuerza-Tiempo, se verifica que el DAF puede estar por debajo o por encima del valor de 2, sobredimensionando la estructura o infravalorando la acción de caída del carro, por tanto, estando del lado de la inseguridad.
3. La función Fuerza-Tiempo obtenida en función de la tipología de carro y su peso sirve para realizar el cálculo no simplificado que mencionan las normativas.



DAF = 2 en sistema de 1 GDL



DAF < 2 en Puente Bioceánico con carro OH



DAF > 2 en Puente Chilina con carro OH