

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

Sistemas de Control Pasivo en Cables de Puentes
Atirantados. Diseño Basado en el Rendimiento.

Autor: Javier Jiménez Manfredi

Tutores: Javier Fernando Jiménez Alonso; Andrés Sáez Pérez

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

Sevilla, 2017



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

Sistemas de Control Pasivo en Cables de Puentes Atirantados. Diseño Basado en el Rendimiento.

Autor:

Javier Jiménez Manfredi

Tutores:

Javier Fernando Jiménez Alonso

Profesor Asociado

Andrés Sáez Pérez

Catedrático de Universidad

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Máster: Sistemas de Control Pasivo en Cables de Puentes Atirantados. Diseño Basado en el Rendimiento.

Autor: Javier Jiménez Manfredi

Tutores: Javier Fernando Jiménez Alonso
Andrés Sáez Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Índice

Resumen

1	Introducción y objetivos	1
1.1.	<i>Introducción.....</i>	<i>1</i>
1.2.	<i>Objetivos.....</i>	<i>2</i>
2	Mecanismos de generación de vibraciones en cables.....	4
2.1.	<i>Parámetros aerodinámicos.....</i>	<i>5</i>
2.1.1.	Número de Reynolds.....	5
2.1.2.	Número de Strouhal.....	6
2.1.3.	Número de Scruton.....	6
2.2.	<i>Excitación producida por desprendimiento de vórtices.....</i>	<i>7</i>
2.3.	<i>Vibraciones inducidas por lluvia y viento.....</i>	<i>8</i>
2.4.	<i>Vibraciones producidas por desprendimiento de vórtices en obstáculos precedentes al cable (Wake Galloping).....</i>	<i>11</i>
2.5.	<i>Galope (Galloping).....</i>	<i>12</i>
2.6.	<i>Bataneo (Buffeting).....</i>	<i>13</i>
2.7.	<i>Otros mecanismos.....</i>	<i>14</i>
3	Control de vibraciones en cables	15
3.1.	<i>Limitación de las vibraciones. Tolerancia de los usuarios.....</i>	<i>15</i>
3.2.	<i>Métodos de control de vibraciones en cables.....</i>	<i>16</i>
3.3.	<i>Sistemas de disipación de energía. Amortiguadores.....</i>	<i>18</i>
3.4.	<i>Tipos de amortiguadores pasivos.....</i>	<i>19</i>
3.4.1.	Amortiguadores viscosos.....	19
3.4.2.	Amortiguadores de fricción.....	22
3.4.3.	Amortiguadores de goma o elastoméricos.....	24
3.5.	<i>Diseño de sistemas amortiguadores pasivos.....</i>	<i>28</i>
3.5.1.	Definición del problema.....	28
3.5.2.	Estado del arte del diseño de amortiguadores de cables.....	29
3.5.3.	Criterios de optimización.....	35
3.6.	<i>Método de optimización mediante el uso de algoritmos genéticos.....</i>	<i>37</i>
3.6.1.	Perspectiva histórica.....	38
3.6.2.	Conceptos básicos.....	38

4	Evaluación experimental del ratio de amortiguamiento en cables	41
4.1.	<i>Evaluación de la fuerza y el amortiguamiento en los cables basado en el método vibratorio</i>	41
4.2.	<i>Medida de las frecuencias de los cables</i>	42
4.3.	<i>Estimación del amortiguamiento de los cables</i>	43
4.4.	<i>Reporte de casos</i>	44
4.4.1.	Puente Real (Badajoz)	45
4.4.2.	Puente de Andalucía (Córdoba).....	46
4.4.3.	Puente del Alamillo (Sevilla)	47
4.4.4.	Puente de la Constitución de 1812 (Cádiz)	47
5	Aplicación práctica: Puente del Alamillo	49
5.1.	<i>Vibraciones detectadas en los cables del Puente del Alamillo</i>	49
5.1.1.	Características de la estructura	50
5.1.2.	Problemas de vibraciones en los cables.....	50
5.1.3.	Ensayos realizados y medidas de mitigación empleadas	51
5.2.	<i>Modelización del problema</i>	53
5.2.1.	Software empleado.....	53
5.2.2.	Modelo del cable.....	54
5.2.3.	Modelo de los amortiguadores	56
5.2.4.	Acciones de viento	62
5.2.5.	Características de los análisis.....	72
5.3.	<i>Resultados de los análisis</i>	72
5.3.1.	Análisis Modal	72
5.3.2.	Resultados para la acción de viento turbulento	75
5.3.3.	Resultados para la acción de desprendimiento de vórtices.....	75
5.4.	<i>Medidas de mitigación. Diseño y optimización de los amortiguadores</i>	76
5.4.1.	Proceso de optimización en MATLAB. Parámetros y características	77
5.4.2.	Amortiguador viscoso	79
5.4.3.	Amortiguador elastomérico	82
5.4.4.	Amortiguador de fricción.....	85
5.5.	<i>Comparación de los resultados obtenidos con los modelos analíticos</i>	88
6	Conclusiones y desarrollos futuros.....	94
6.1.	<i>Conclusiones.....</i>	94
6.2.	<i>Desarrollos futuros.....</i>	96
7	Referencias	98

Índice de Figuras

FIGURA 1.1. PUENTE DE BROTONNE (FINLEY ENGINEERING GROUP , 2017)	2
FIGURA 2.1. FLUJO CIRCULANDO ALREDEDOR DE UN CILINDRO PARA $Re \cong 1$ Y $Re \cong 20$. (SÁ CAETANO, 2007)	5
FIGURA 2.2. FLUJO CIRCULANDO ALREDEDOR DE UN CILINDRO PARA $30 < Re < 5000$. (SÁ CAETANO, 2007)	5
FIGURA 2.3. FLUJO CIRCULANDO ALREDEDOR DE UN CILINDRO PARA $5000 < Re < 200\ 000$ Y $Re \geq 200\ 000$ (SÁ CAETANO, 2007)	6
FIGURA 2.4. EXITACIÓN DE UN CABLE POR VÓRTICES DE KARMAN (MAURER SÖHNE, 2006)	7
FIGURA 2.5. EVOLUCIÓN DE LA FRECUENCIA DE DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES CON LA VELOCIDAD DEL VIENTO. REPRODUCIDO DE (SÁ CAETANO, 2007)	8
FIGURA 2.6. CASO 1. REPRODUCIDO DE (MAURER SÖHNE, 2006).....	9
FIGURA 2.7. CASO 2. REPRODUCIDO DE (MAURER SÖHNE, 2006).....	10
FIGURA 2.8. FORMACIÓN DE VÓRTICES EN UN OBSTÁCULO (FLORES, 2011)	11
FIGURA 2.9. FUERZAS DE ARRASTRE Y LEVANTAMIENTO (SÁ CAETANO, 2007).....	12
FIGURA 3.1. DAÑOS EN ELEMENTOS DE LOS TIRANTES OCASIONADOS POR VIBRACIONES. (FLORES, 2011)	15
FIGURA 3.2. CROSSTIES YOBUKO BRIDGE (FUJINO & YAMAGUCHI, 1998) Y (FHWA, 2007)	17
FIGURA 3.3. TIPOS DE SUPERFICIE DE TIRANTES CON PROTUBERANCIAS (FHWA, 2007)	17
FIGURA 3.4. SISTEMA DE CONTROL ACTIVO CON PLACA SOLAR (MAURER SÖHNE, 2006)	19
FIGURA 3.5. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL PASIVO (VALDEBENITO & APARICIO, 2009) (SYMANS & CONSTANTINO, 1999).....	19
FIGURA 3.6. CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO DE UN AMORTIGUADOR VISCOSO LINEAL (CONNOR & LAFLAMME, 2014)	21
FIGURA 3.7. ESQUEMA DE UN AMORTIGUADOR VISCOSO TÍPICO (CONNOR & LAFLAMME, 2014).....	21
FIGURA 3.8. AMORTIGUADOR IRD (FREYSSINET, 2008).....	22
FIGURA 3.9. AMORTIGUADOR VISCOSO INTERNO [IZQUIERDA] Y EXTERNO [DERECHA] (BBR, 2014).....	22
FIGURA 3.10. AMORTIGUADORES VISCOSOS (DSI)	22
FIGURA 3.11. CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO DE UN AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN (CONNOR & LAFLAMME, 2014)	23
FIGURA 3.12. BBR SQUARE DAMPER (BBR, 2014)	23
FIGURA 3.13. VSL FRICTION DAMPER (VSL, 2013).....	24
FIGURA 3.14. RELACIONES TENSIÓN-DEFORMACIÓN (CONNOR & LAFLAMME, 2014)	25
FIGURA 3.15. CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO PARA UN MATERIAL VISCOELÁSTICO (CONNOR & LAFLAMME, 2014)	26
FIGURA 3.16. EJEMPLO DE CURVA DE UN AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO (MAURER SÖHNE, 2006).....	26
FIGURA 3.17. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN AMORTIGUADOR DE GOMA (MAURER SÖHNE, 2006)	27
FIGURA 3.18. ALMOHADILLA DE GOMA DE UN AMORTIGUADOR VSL R-DAMPER (VSL, 2013)	27
FIGURA 3.19. AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO INTERNO (DSI) [IZQ.] Y (FREYSSINET, 2008) [DCHA.]	27
FIGURA 3.20. ESQUEMA DEL SISTEMA CABLE-AMORTIGUADOR.....	29
FIGURA 3.21. CURVAS DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA (KOVÀCS, 1982).....	30

FIGURA 3.22. CURVA UNIVERSAL (PACHECO, FUJINO, & SULEKH, 1993).....	31
FIGURA 3.23. VARIACIÓN DEL MÁXIMO RATIO DE AMORTIGUAMIENTO RESPECTO AL PARÁMETRO DE RIGIDEZ A FLEXIÓN. (TABATABAI & MEHRABI, 2000).....	33
FIGURA 3.24. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL CABLE AMORTIGUADO (CHENG, DARIVANDI, & GHRIB, 2010)	34
FIGURA 3.25. COMPARACIÓN DE TRES CURVAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA ÓPTIMAS, BASADAS EN DIFERENTES CRITERIOS (ASAMI, NISHIHARA, & BAZ, 2002)	36
FIGURA 3.26. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN ALGORITMO GENÉTICO.	40
FIGURA 4.1. ACELERÓMETRO EN UN CABLE DEL PUENTE DEL ALAMILLO. (CASAS & APARICIO, 2009)	43
FIGURA 4.2. EXCITACIÓN DE UN CABLE DEL PUENTE DEL ALAMILLO. (CASAS & APARICIO, 2009).....	44
FIGURA 4.3. PUENTE REAL (BADAJOZ). (WORDPRESS, 2017)	45
FIGURA 4.4. PUENTE DE ANDALUCÍA (CÓRDOBA). (PUENTEMANIA, 2011).....	46
FIGURA 4.5. PUENTE DE LA CONSTITUCIÓN DE 1812. (CFCSL, 2015)	47
FIGURA 4.6. AMORTIGUADORES DURANTE EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN. (SANCHEZ, TROTIN, & LADRET, 2016)	48
FIGURA 4.7. MONTAJE DE AMORTIGUADOR EN EL PUENTE DE LA CONSTITUCIÓN DE 1812. (SANCHEZ, TROTIN, & LADRET, 2016).....	48
FIGURA 5.1. VISTA DEL PUENTE DEL ALAMILLO (APARICIO & CASAS, 1997)	50
FIGURA 5.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE CÁLCULO	54
FIGURA 5.3. ESQUEMA DEL PUENTE DEL ALAMILLO.....	55
FIGURA 5.4. ESQUEMA DEL MODELO DE CABLE EMPLEADO EN LOS ANÁLISIS.....	56
FIGURA 5.5. ESQUEMA DEL ELEMENTO COMBIN14 Y DETALLE DE LA UBICACIÓN DEL AMORTIGUADOR.....	58
FIGURA 5.6. GRÁFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO DE UN ELEMENTO COMBIN14 SOMETIDO A UNA CARGA CÍCLICA.....	58
FIGURA 5.7. ESQUEMA DEL ELEMENTO COMBIN40	59
FIGURA 5.8. ESQUEMA DE UBICACIÓN DEL AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN.....	60
FIGURA 5.9. DETALLE DE UBICACIÓN DEL AMORTIGUADOR DE TIPO ELASTOMÉRICO	60
FIGURA 5.10. CURVA FUERZA-DESPLAZAMIENTO DEL AMORTIGUADOR DE ELASTOMÉRICO SOMETIDO A UNA CARGA ARMÓNICA.....	61
FIGURA 5.11. CURVA F-D DEL ELEMENTO COMBIN39	62
FIGURA 5.12. ESQUEMA DE LAS ALTURAS EN LAS QUE SE HA OBTENIDO LA SEÑAL DEL VIENTO	63
FIGURA 5.13. INTERFAZ GRÁFICA DE NOWS	64
FIGURA 5.14. SEÑALES DE VIENTO GENERADAS A VARIAS ALTURAS.....	65
FIGURA 5.15. ESPECTRO FRECUENCIA-AMPLITUD DE LAS SEÑALES GENERADAS.....	66
FIGURA 5.16. FUERZAS GENERADAS A LA ALTURA H5 Y H10 PARA LA ACCIÓN TURBULENTO DEL VIENTO	67
FIGURA 5.17. INTERFAZ GRÁFICA DE VOWS.....	69
FIGURA 5.18. SEÑALES DE VIENTO GENERADAS PARA EL DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	70
FIGURA 5.19. DISTRIBUCIÓN DE LA FUNCIÓN DE POTENCIA ESPECTRAL DE LA SEÑAL	70
FIGURA 5.20. FUERZAS GENERADAS A PARTIR DE LA SEÑAL DE DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.....	71
FIGURA 5.21. RESULTADOS EN MITAD DE LA LONGITUD DEL CABLE (NODO 55). VIENTO TURBULENTO	75
FIGURA 5.22. RESULTADOS EN MITAD DE LA LONGITUD DEL CABLE (NODO 55). DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	76
FIGURA 5.23. DESPLAZAMIENTOS CON Y SIN AMORTIGUADOR VISCOSO. VIENTO TURBULENTO	80

FIGURA 5.24. DESPLAZAMIENTOS CON Y SIN AMORTIGUADOR VISCOSO. DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.....	82
FIGURA 5.25. DESPLAZAMIENTOS CON Y SIN AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO. VIENTO TURBULENTO	83
FIGURA 5.26. DESPLAZAMIENTOS CON Y SIN AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO. DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	85
FIGURA 5.27. DESPLAZAMIENTOS CON Y SIN AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN. VIENTO TURBULENTO	86
FIGURA 5.28. DESPLAZAMIENTOS CON Y SIN AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN. DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	88
FIGURA 5.29. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA FORMULACIÓN DE PACHECO	90
FIGURA 5.30. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA FORMULACIÓN DE KRENK	91
FIGURA 5.31. COMPARACIÓN DEL DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EN DIFERENTES CASOS.....	92

Índice de Tablas

TABLA 3.1. COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO ÓPTIMO Y MÁXIMO RATIO PARA UN AMORTIGUADOR VISCOSO (HUANG, 2011).	34
TABLA 3.2. CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN TÍPICOS DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA. (ASAMI, NISHIHARA, & BAZ, 2002) ..	35
TABLA 3.3. DIFERENCIAS ENTRE UN ALGORITMO CLÁSICO Y UN ALGORITMO GENÉTICO (MATHWORKS, 2017).	38
TABLA 5.1. FRECUENCIAS NATURALES (HZ) DE LOS CABLES OBTENIDAS EN LOS TEST DINÁMICOS EN 1992 Y 2004 (CASAS & APARICIO, 2009).....	51
TABLA 5.2. FUERZAS EN LOS CABLES (KN) EN 1992 Y EN 2004 (CASAS & APARICIO, 2009).	52
TABLA 5.3. PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO Y ACELERACIONES EN LOS CABLES EN 2004 Y 2008 (CASAS & APARICIO, 2009).	52
TABLA 5.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS TIRANTES EMPLEADOS EN LOS ANÁLISIS.....	56
TABLA 5.5. ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA MODELIZACIÓN DE LOS AMORTIGUADORES.	57
TABLA 5.6. ALTURAS EN LAS QUE SE SIMULAN SEÑALES DE VIENTO. CABLE Nº 13.	63
TABLA 5.7. CATEGORÍAS DE TERRENO DEFINIDOS EN EL EUROCÓDIGO 1.	68
TABLA 5.8. ALTURAS EN LAS QUE SE SIMULAN SEÑALES DE VIENTO. CABLE Nº 1.	68
TABLA 5.9. FRECUENCIAS NATURALES OBTENIDAS EN EL CASO DEL TIRANTE NÚMERO 13	73
TABLA 5.10. CUATRO PRIMEROS MODOS DE VIBRACIÓN DEL TIRANTE NÚMERO 13	73
TABLA 5.11. FRECUENCIAS NATURALES OBTENIDAS EN EL CASO DEL TIRANTE NÚMERO 1.	74
TABLA 5.12. CUATRO PRIMEROS MODOS DE VIBRACIÓN DEL TIRANTE NÚMERO 1.	74
TABLA 5.13. DESPLAZAMIENTOS EXTREMOS A MEDIA LUZ DEL CABLE PARA LA CARGA DE VIENTO TURBULENTO.	75
TABLA 5.14. NÚMERO DE VARIABLES CONSIDERADAS PARA CADA AMORTIGUADOR	78
TABLA 5.15. VALOR ÓPTIMO DE LAS VARIABLES PARA EL AMORTIGUADOR VISCOSO. VIENTO TURBULENTO.	79
TABLA 5.16. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL AMORTIGUADOR VISCOSO PARA VIENTO TURBULENTO.....	80
TABLA 5.17. VALOR ÓPTIMO DE LAS VARIABLES PARA EL AMORTIGUADOR VISCOSO. DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.	81
TABLA 5.18. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL AMORTIGUADOR VISCOSO PARA DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.....	81
TABLA 5.19. VALOR ÓPTIMO DE LAS VARIABLES PARA EL AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO. VIENTO TURBULENTO.	82
TABLA 5.20. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO PARA VIENTO TURBULENTO.	83
TABLA 5.21. VALOR ÓPTIMO DE LAS VARIABLES PARA EL AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO. DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.	84
TABLA 5.22. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL AMORTIGUADOR ELASTOMÉRICO PARA DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.	84
TABLA 5.23. VALOR ÓPTIMO DE LAS VARIABLES PARA EL AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN. VIENTO TURBULENTO.....	85
TABLA 5.24. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN PARA VIENTO TURBULENTO.	86
TABLA 5.25. VALOR ÓPTIMO DE LAS VARIABLES PARA EL AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN. VIENTO TURBULENTO.....	87
TABLA 5.26. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN PARA DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.	87
TABLA 5.27. DECAIMIENTO LOGARÍTMICO EN CADA UNO DE LOS CASOS ESTUDIADOS.	92

RESUMEN

En las últimas décadas se ha producido un importante auge de los puentes atirantados, convirtiéndose en alternativas económicas frente a otras tipologías estructurales. En dichos puentes, juegan un papel fundamental los cables, que constituyen elementos flexibles y con un bajo nivel de amortiguamiento. Esto hace que sean propensos a sufrir vibraciones, por lo que se han tenido que realizar reparaciones en numerosas ocasiones, debiendo tomar en muchos casos medidas de mitigación externas.

En el presente trabajo, se abordan los aspectos teóricos más importantes en el estudio de fenómenos vibratorios en cables, pasando por las posibles medidas de mitigación.

En el primer apartado, se realiza una revisión sobre los mecanismos de generación de vibraciones en cables. Se presta especial atención a los fenómenos relacionados con la acción del viento, definiendo una serie de parámetros aerodinámicos que permiten caracterizar la respuesta de los cables ante dichas acciones.

Posteriormente, en el segundo apartado, se aborda la problemática asociada a las vibraciones en los tirantes de estructuras, ya que estas pueden suponer un problema a largo plazo debido a daños por fatiga, rotura de elementos de los anclajes y problemas de confort. Este último aspecto ha sido considerado en ocasiones de menor importancia, sin embargo, los movimientos excesivos en los tirantes crean alarma social y falta de seguridad, por lo que se definirán unas tolerancias de usuario o requerimientos estructurales, que se materializan en unos límites de desplazamientos. Para ello se parte de los datos aportados por diversos estudios que han sido recogidos en la bibliografía.

Una vez definidos los requerimientos de la estructura y sus parámetros de control asociados, se abordan las diferentes medidas de mitigación de vibraciones, prestando especial atención a los sistemas de amortiguación de tipo pasivo. Se realiza una revisión de los sistemas amortiguadores presentes en el mercado, atendiendo a las principales características de cada uno de ellos y a los métodos de diseño que se han venido utilizando a lo largo de los últimos años para dimensionar estos sistemas. En este apartado, se plantea un enfoque de diseño diferente a los tradicionales, que se englobaría en lo que se conoce como "Diseño basado en el rendimiento" y que pretende aprovechar al máximo la capacidad de los amortiguadores para cumplir las condiciones impuestas en las diferentes normativas.

Para poner en práctica este procedimiento de diseño, se aplicará a un caso real de puente atirantado:

el Puente del Alamillo. Se realiza un modelo de elementos finitos en el que se incorporarán las propiedades mecánicas de los cables y de los diferentes tipos de amortiguadores considerados. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de optimización mediante algoritmos genéticos, con el fin de obtener los parámetros de los amortiguadores que cumplan las condiciones impuestas. Con los resultados obtenidos para cada tipo de amortiguador, se realiza un estudio comparativo, evaluando la eficacia de cada uno de los sistemas.

Los parámetros de los amortiguadores optimizados con el enfoque de diseño presentado en este documento se han comparado con los resultados obtenidos empleando otras metodologías.

Por último, se presentan una serie de conclusiones extraídas de los diferentes análisis desarrollados.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

Con el desarrollo de los materiales y tecnologías de construcción, las estructuras han ido ganando en esbeltez y flexibilidad, permitiendo salvar luces mayores con soluciones económicas. En este sentido, los cables se han erigido como elementos fundamentales en las grandes estructuras de ingeniería, como en el caso de puentes atirantados o estructuras de telecomunicaciones (Huang, 2011).

El caso más relevante dentro del ámbito de la ingeniería civil es el de los puentes atirantados, que han experimentado un gran auge a partir de la segunda mitad del siglo XX, debido principalmente a su buen comportamiento en terrenos poco resistentes y al hecho de constituir una alternativa económica frente a otras tipologías. Estas estructuras se ven sometidas habitualmente a una gran variedad de cargas dinámicas como las cargas de tráfico, viento, peatones y cargas sísmicas, que son difíciles de caracterizar.

Los cables se caracterizan por su gran flexibilidad y bajo amortiguamiento, muy inferior a otros elementos estructurales empleados en ingeniería civil, por lo que son elementos susceptibles de sufrir problemas de vibraciones. Dichas vibraciones pueden causar diversos problemas durante el periodo de servicio de la estructura, como problemas de fatiga y afecciones en el confort de los usuarios.

Uno de los primeros casos en los que se detectaron problemas asociados a oscilaciones de los tirantes fue en el Puente de Brotonne en Francia, en el año 1976 (Wianecki, 1979). En este caso las vibraciones eran de tal magnitud que los cables más largos, que inicialmente eran casi paralelos y separados entre sí una distancia de 2 metros, llegaron a entrar en contacto (Stiemer, Taylor, & Vincent, 1988).

Por tanto, existe una problemática relativa a los fenómenos vibratorios en cables, que ha sido abordada durante las últimas décadas mediante el empleo de diferentes soluciones, estando todas ellas relacionadas con mecanismos de control de vibraciones, ya sean mecánicos, estructurales o aerodinámicos.

Uno de los más empleados son los sistemas amortiguadores, que permiten suplementar la

capacidad de amortiguamiento de los cables, consiguiendo importantes reducciones en los niveles de oscilación de estos elementos.



Figura 1.1. Puente de Brotonne (Finley Engineering Group , 2017)

El diseño de estos amortiguadores constituye uno de los campos de investigación y desarrollo más importantes en el ámbito de los puentes atirantados, habiendo sido objeto de numerosos estudios en los últimos años. Modelos analíticos, numéricos y estudios experimentales han sido desarrollados por empresas e investigadores, con el fin de comprender el comportamiento conjunto del sistema estructural cable-amortiguador.

1.2. Objetivos

En el presente trabajo se pretende realizar una revisión de los aspectos teóricos más importantes en el estudio de los fenómenos vibratorios en cables. Además se abordarán las causas de las oscilaciones y las posibles medidas de mitigación que se pueden adoptar.

Para ello, se realizará una revisión de los mecanismos generadores de vibraciones y de los parámetros que controlan el comportamiento de los cables en estas situaciones, sin perder de vista las posibles soluciones existentes en el mercado para controlar las vibraciones.

Con el objetivo de superar la “frontera” existente entre los estudios teóricos y analíticos, y los sistemas reales de mitigación de vibraciones ofrecidos por los fabricantes, se abordará el diseño de los sistemas amortiguadores pasivos desde un enfoque que difiere en gran medida de los métodos tradicionales de diseño. Esto, se hará mediante un enfoque de diseño basado en el rendimiento, empleando para ello un proceso de optimización mediante algoritmos genéticos.

A partir de esta idea de diseño, se pretende poner en relación las limitaciones de vibraciones establecidas en las normativas, con el diseño de los amortiguadores, de forma que se consiga una solución lo más económica posible. Para ello, serán objetivos fundamentales del trabajo, la

modelización de los diferentes elementos que componen el sistema estructural, la obtención de las cargas que actúan sobre los cables, y por último, el análisis de los resultados.

Finalmente se extraerán una serie de conclusiones de los análisis realizados, tanto en lo relativo a los diferentes tipos de amortiguadores presentes en el mercado como al propio proceso de optimización utilizado.

2 MECANISMOS DE GENERACIÓN DE VIBRACIONES EN CABLES

Los fenómenos de generación de vibraciones en cables se pueden clasificar, por lo general, en dos categorías: vibraciones producidas por la acción del viento y vibraciones producidas por otras causas externas. En la primera categoría se encuadran los fenómenos más habituales, como las vibraciones producidas por la acción combinada de lluvia-viento, desprendimiento de vórtices, galope, etc. Mientras en el segundo grupo se encontrarían los fenómenos relacionados con la sobrecarga de tráfico o la excitación de modos generales de la estructura que involucren a los cables (Huang, 2011).

Los fenómenos producidos por el viento engloban fenómenos clásicos como el desprendimiento de vórtices alternantes, y suponen los mecanismos generadores de vibraciones en cables más habituales. Entre los que se dan con mayor frecuencia aparecen los siguientes (FHWA, 2007):

- Excitación producida por desprendimiento de vórtices.
- Vibraciones inducidas por la combinación de lluvia y viento.
- Galope (Galopping).
- Bataneo (Buffeting).

Todos ellos se caracterizan por una interacción directa con el viento, por lo que los parámetros aerodinámicos de los cables cobran gran importancia en el comportamiento estructural. Los más importantes se resumen en el apartado 2.1.

También se han documentado otros fenómenos menos frecuentes como es el caso del galope en cables con acumulaciones de hielo, desprendimiento de vórtices en estelas de cables debido a obstáculos, vibraciones producidas por fluctuaciones en el nivel de tensión de los cables, etc.

Otra fuente de oscilaciones en los cables pueden ser los movimientos producidos en el tablero y en las torres debido al viento, a las cargas de tráfico o eventualmente a un terremoto. El movimiento en estos elementos produce una excitación indirecta sobre los cables, mediante el movimiento de los anclajes (Sá Caetano, 2007).

2.1. Parámetros aerodinámicos

Existen una serie de parámetros aerodinámicos que influyen en el comportamiento de los cables ante acciones de viento. Los más relevantes se describen a continuación (FHWA, 2007).

2.1.1. Número de Reynolds

Es un parámetro clave en la descripción de un fluido compresible que circula alrededor de un objeto, como en el caso del viento alrededor de los tirantes.

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

Donde ρ =densidad del aire, V =velocidad del viento, D =diámetro del cable y μ =viscosidad del aire

Para bajas velocidades de viento, por ejemplo, valores de $R_e \approx 1$, las fuerzas viscosas son dominantes y el fluido circula alrededor del cable. Conforme aumenta la velocidad del viento, el número de Reynolds aumenta, separándose el flujo a $R_e \approx 20$ y produciéndose dos vórtices simétricos en ambos lados. Al llegar a $R_e \approx 30$, se rompe la simetría de los vórtices y comienzan a producirse vórtices alternantes. En el rango $5000 < R_e < 200\,000$, el flujo comienza la transición a régimen turbulento. Finalmente, para números de Reynolds muy elevados ($R_e \approx 200\,000$), la estela se estrecha, actuando fuerzas reducidas sobre el cable (Sá Caetano, 2007).

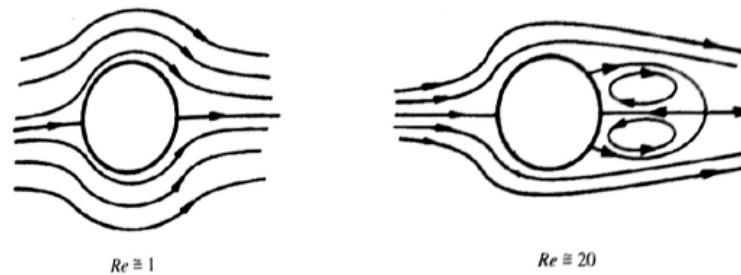


Figura 2.1. Flujo circulando alrededor de un cilindro para $R_e \approx 1$ y $R_e \approx 20$. (Sá Caetano, 2007)

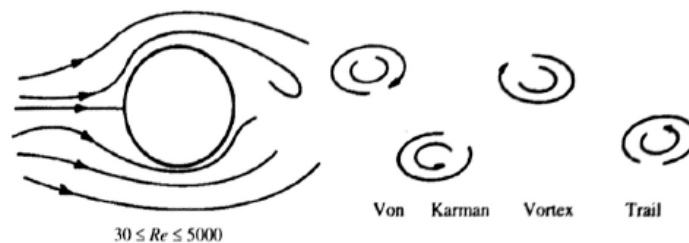


Figura 2.2. Flujo circulando alrededor de un cilindro para $30 < R_e < 5000$. (Sá Caetano, 2007)

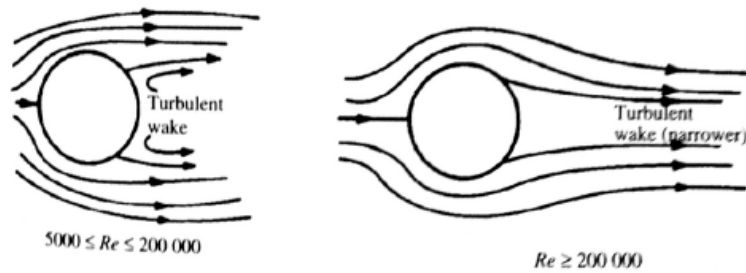


Figura 2.3. Flujo circulando alrededor de un cilindro para $5000 < Re < 200\,000$ y $Re \geq 200\,000$ (Sá Caetano, 2007)

2.1.2. Número de Strouhal

Se trata de un parámetro adimensional relevante para el caso de excitación por desprendimiento de vórtices.

$$S = \frac{N_s D}{V} \quad (2.2)$$

Donde N_s = frecuencia de excitación de los vórtices. A partir de la expresión anterior, se pueden obtener las velocidades que pueden excitar alguna de las frecuencias naturales de los cables.

El número de Strouhal permanece constante para un amplio rango de velocidades de viento. Para secciones de cables circulares con números de Reynolds entre 1×10^4 a 1×10^5 , S es aproximadamente 0.2.

2.1.3. Número de Scruton

El número de Scruton es posiblemente el parámetro más utilizado, ya que se ha observado que cables con un valor de este parámetro superior a un cierto umbral no presentan oscilaciones ante fenómenos de lluvia-viento.

$$S_c = \frac{m \zeta}{\rho D^2} \quad (2.3)$$

De esta relación se desprende que un incremento de la masa y amortiguamiento de los cables aumenta el número de Scruton.

Como se verá más adelante, la mayoría de las recomendaciones para el control de vibraciones, adoptan criterios de diseño encaminados a obtener un número de Scruton adecuado para mitigar la aparición de vibraciones.

2.2. Excitación producida por desprendimiento de vórtices

El desprendimiento de vórtices es un fenómeno clásico, producido cuando un flujo se encuentra con un obstáculo y se ve forzado a circular por dos caminos, generándose vórtices alternativamente en ambos lados. Se caracteriza por vibraciones de limitada amplitud con bajas velocidades de viento.

En caso de que el obstáculo tenga forma circular (como en el caso de los cables), se producen vórtices en ambas caras del cable, produciendo una excitación aproximadamente sinusoidal, normalmente de baja amplitud. Cuando la frecuencia del vórtice coincide con alguna de las frecuencias naturales se produce un fenómeno de resonancia. Por lo general, este tipo de amplificación dinámica está limitada a cables de pequeño diámetro, como los de las pasarelas peatonales (FHWA, 2007).

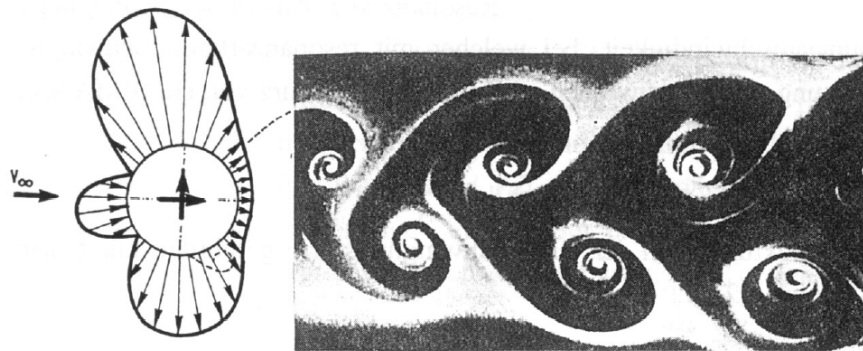


Figura 2.4. Excitación de un cable por vórtices de Karman (Maurer Söhne, 2006)

La velocidad del viento a la que la frecuencia de los vórtices alcanza la frecuencia natural del cable (N_r) se puede obtener como:

$$V = \frac{N_r \cdot D}{S} \quad (2.4)$$

Siendo V la velocidad del viento, D el diámetro del cable, N_r la frecuencia natural y S el número de Strouhal, que para un cilindro circular es 0.20.

Cuando se produce la resonancia, el cable interactúa con el flujo que lo rodea, produciéndose el fenómeno conocido como Lock-in. Este fenómeno aeroelástico se caracteriza porque un incremento de la velocidad del viento no produce cambios en la frecuencia de desprendimiento de vórtices, que coincide con la frecuencia natural del cable. Esto conlleva la aparición de fuerzas de viento transversal adicionales que se traducen en una pérdida de amortiguamiento efectivo, favoreciéndose el fenómeno de desprendimiento de vórtices (Sá Caetano, 2007).

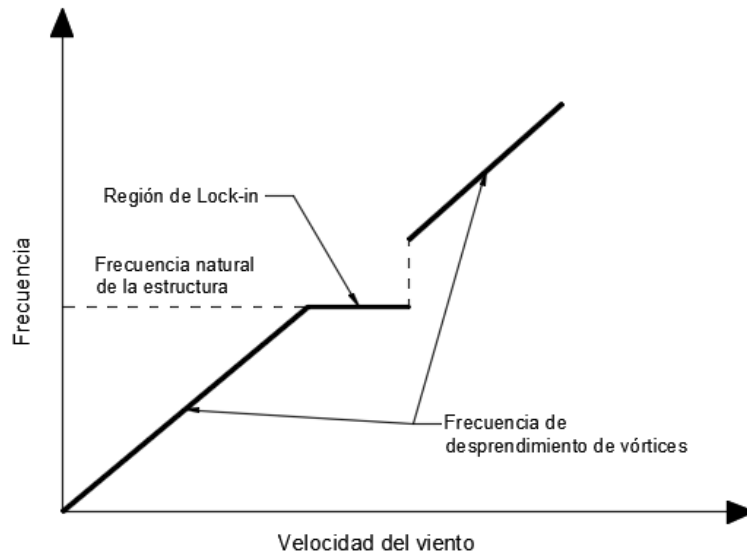


Figura 2.5. Evolución de la frecuencia de desprendimiento de vórtices con la velocidad del viento.

Reproducido de (Sá Caetano, 2007)

La amplitud de la oscilación es inversamente proporcional al número de Scruton. Aumentando la masa y el amortiguamiento de los cables aumenta dicho número y, por tanto, se reduce la amplitud de las oscilaciones.

Los cables que pueden sufrir fenómenos de desprendimiento de vórtices son aquellos en los que las primeras frecuencias naturales se encuentran por encima de 2 Hz. Esto es debido a que, para una velocidad de viento dada, el desprendimiento de vórtices podría producir la excitación de alguno de los modos de vibración del cable. Sin embargo, se puede observar que la velocidad del viento que podría excitar los primeros modos de vibración ($f < 2$ Hz) es muy baja, por lo que no presenta valores importantes de energía (SETRA, 2002).

2.3. Vibraciones inducidas por lluvia y viento

Los primeros casos de vibraciones inducidas por la acción combinada de lluvia y viento en puentes atirantados fueron reportados por Hikami en 1986, durante la construcción del Puente Meiko-Nishi (Hikami, 1986) (Hikami & Shiraishi, 1988). Actualmente se considera que las vibraciones producidas por este fenómeno suponen el 95% de los casos que se dan en puentes atirantados (Wagner & Fuzier, 2003).

La combinación de lluvia con velocidades de viento moderadas (8-15 m/s) puede producir vibraciones de gran amplitud en los cables. Estas vibraciones suelen tener frecuencias bajas, por lo general inferiores a 3 Hz, y pueden alcanzar grandes amplitudes, en el rango comprendido entre 0.25 m y 1 m.

Diversos test en túnel de viento han demostrado que el flujo de agua por la superficie del cable es

uno de los principales causantes de inestabilidad (FHWA, 2007). Bajo ciertas condiciones de lluvia y viento, el agua recorre el cable en dos estelas, una en equilibrio estable en la parte inferior del cable y la otra en equilibrio inestable en la parte superior (SETRA, 2002). La formación de estas estelas de agua alrededor de los cables, produce un cambio en el balance de fuerzas gravitatorias, aerodinámicas y superficiales, que lleva finalmente a una sección transversal no simétrica.

En general, podemos distinguir dos casos:

- La dirección del viento es la misma que la del cable (Caso 1).
- La dirección del viento es transversal al cable (Caso 2).

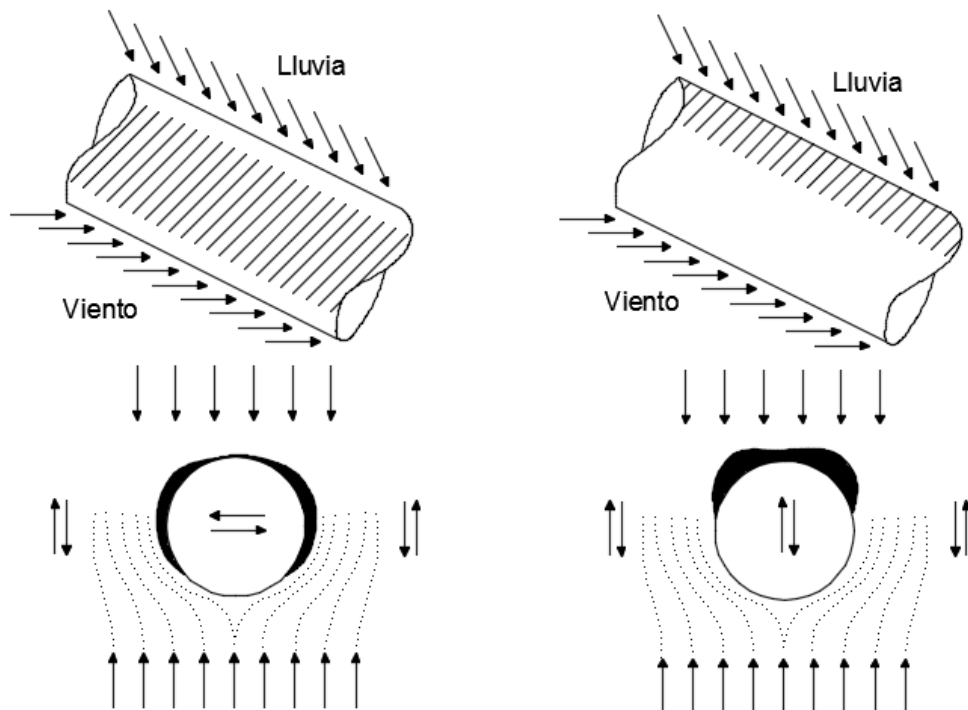


Figura 2.6. Caso 1. Reproducido de (Maurer Söhne, 2006)

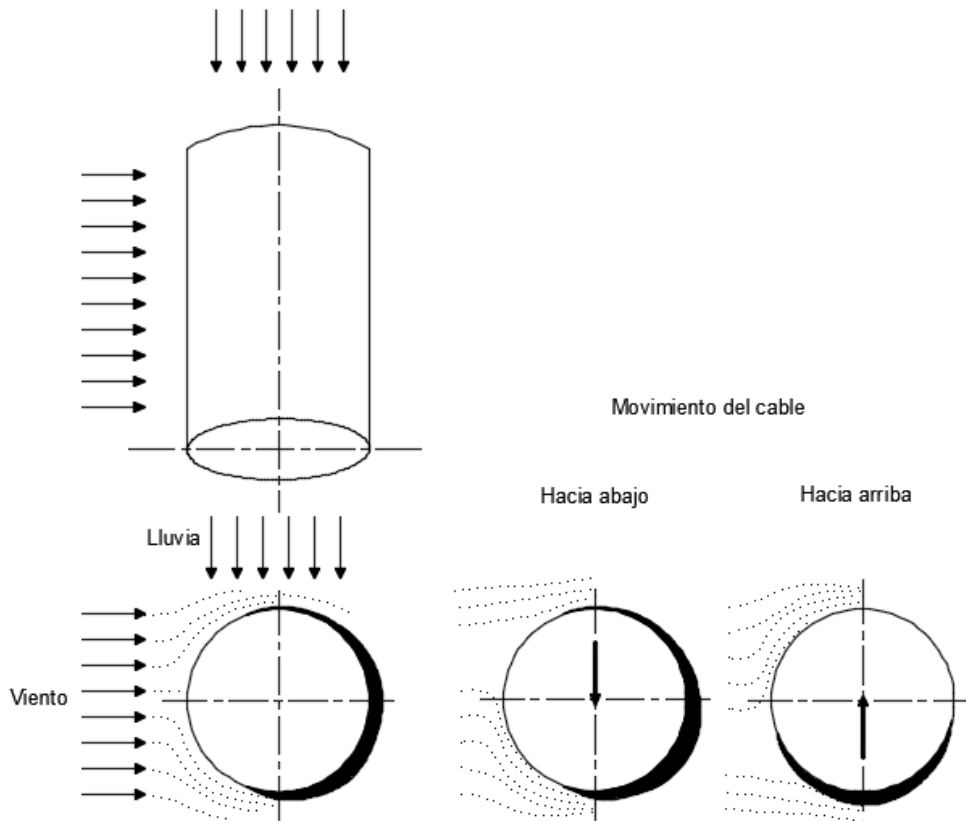


Figura 2.7. Caso 2. Reproducido de (Maurer Söhne, 2006)

Cuando el viento no sopla, el agua comienza a circular hacia abajo a través de la superficie del cable. Una vez que el viento vuelve a actuar, el agua se mueve hacia arriba, produciéndose finalmente una oscilación del agua igual a la que sufre el cable. De esta forma se produce un incremento de la amplitud de las vibraciones.

(Saito, Matsumoto, & Kitazawa, 1994) proponen el siguiente criterio, referido al número de Scruton para evitar que se produzcan vibraciones por el efecto combinado de lluvia y viento.

$$\frac{m\zeta}{\rho D^2} > 10 \quad (2.5)$$

Este criterio permite estimar el amortiguamiento necesario que hay que añadir para evitar las vibraciones producidas por viento y lluvia.

Debido a que este tipo de vibraciones están influenciadas por el recorrido del agua a lo largo de la superficie del cable, parece claro que la forma de esta influirá notablemente en este tipo de inestabilidad.

2.4. Vibraciones producidas por desprendimiento de vórtices en obstáculos precedentes al cable (Wake Galloping)

Estas vibraciones se caracterizan por un movimiento elíptico causado por el desprendimiento de vórtices en la parte “aguas abajo” del flujo de viento debido a la presencia de un obstáculo en la estela del cable. Este fenómeno ocurre a altas velocidades de viento y produce oscilaciones de gran amplitud, pudiendo ocasionar problemas de fatiga.

Es habitual que los tirantes de un puente estén en la estela de otros elementos estructurales. El obstáculo puede ser incluso otro cable, como el caso en el que el viento tiene una dirección paralela al eje del puente, ya que un tirante puede ejercer de obstáculo y causar la turbulencia que afecta a los que están junto a este. Sin embargo, debido a las bajas frecuencias de desprendimiento de vórtices en los cables y la distancia entre ellos, este fenómeno solo puede ocurrir con velocidades de viento muy elevadas (SETRA, 2002).

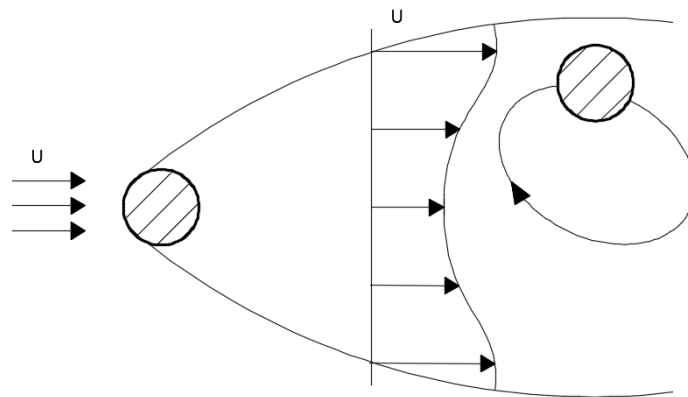


Figura 2.8. Formación de vórtices en un obstáculo (Flores, 2011)

Una ecuación aproximada para obtener la velocidad mínima que provoca estas vibraciones es (FHWA, 2007):

$$U_{crit} = cfD\sqrt{S_c} \quad (2.6)$$

Donde c =constante, f =frecuencia natural, D =diámetro del cable y S_c =número de Scruton

Para secciones circulares, la constante c tiene un valor medio de 40. En puentes atirantados, c depende del espacio libre entre cables. Valores usuales son (FHWA, 2007):

- $c = 25$ para cables separados $2D-6D$.
- $c = 80$ para separaciones de $10D$ y mayores.

Este tipo de vibraciones puede producir problemas de servicio. La ecuación de U_{crit} revela algunas posibilidades de mitigación, como aumentar el número de Scruton o la frecuencia natural, siendo este último método el más efectivo. Para aumentar la frecuencia natural se pueden unir los cables

mediante otros cruzados transversalmente (Crossties).

2.5. Galope (Galloping)

El galope es una forma de inestabilidad aeroelástica que puede ocurrir en estructuras elásticas y esbeltas que se encuentran bajo el efecto de un flujo nominal (SETRA, 2002).

El fenómeno de galope se caracteriza, de forma similar al desprendimiento de vórtices, por oscilaciones transversales a la dirección del viento, que ocurren a frecuencias próximas a la frecuencia natural de la estructura. Sin embargo, este fenómeno es diferente al del desprendimiento de vórtices, ya que este último produce pequeñas amplitudes de oscilación en rangos restringidos de viento, mientras que el galope ocurre para todas las velocidades de viento por encima de un valor crítico y produce oscilaciones de gran amplitud (Sá Caetano, 2007).

Cuando la dirección del viento es normal al cable no se produce este fenómeno de galope. Sin embargo, cuando la velocidad del viento tiene una componente que no es normal al eje del cable sí puede aparecer este fenómeno. Esto es debido a que, para un cable aislado inclinado, el viento actúa sobre una superficie transversal elíptica del cable.

Para comprender el fenómeno de galope, consideraremos un cuerpo de sección prismática en un flujo laminar.

Suponiendo que el cuerpo está fijo y que el ángulo de ataque del flujo es β y la velocidad es U_r , se desarrollarán unas fuerzas $F_D(\beta)$ y $F_L(\beta)$ en la dirección paralela y transversal al viento (Sá Caetano, 2007).

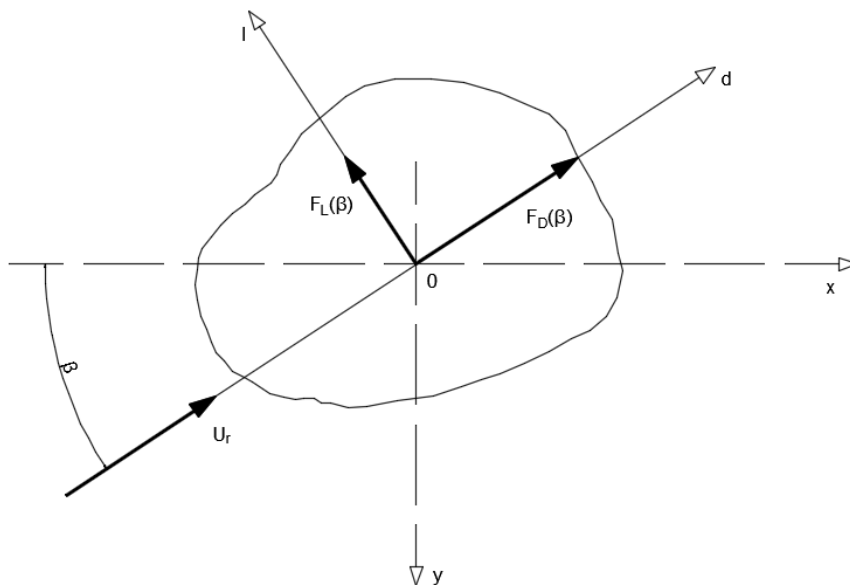


Figura 2.9. Fuerzas de arrastre y levantamiento (Sá Caetano, 2007)

El criterio de Glauert-Den Hartog (Simiu & Scanlan, 1996) permite estimar la estabilidad del cable,

sometido a las fuerzas anteriores:

$$\left(\frac{dC_L}{d\beta} + C_D\right)_{\beta=0} < 0 \quad (2.7)$$

C_L es el coeficiente de sustentación, C_D el coeficiente de resistencia y β el ángulo de ataque del viento.

De la ecuación anterior se puede observar que una sección transversal circular nunca estará sujeta a inestabilidad por galope, ya que el término $\frac{dC_L}{d\beta}$ es siempre cero debido a la simetría. Únicamente cuando la forma externa del cable se vea alterada, como en el caso de presencia de hielo o agua, se puede producir inestabilidad por galope.

Sin embargo, los estudios desarrollados por (Matsumoto, Shiraishi, & Shirato, 1992) y por (Saito, Matsumoto, & Kitazawa, 1994) han demostrado que se puede producir galope en cables circulares inclinados.

(Saito, Matsumoto, & Kitazawa, 1994) proponen un criterio para la inestabilidad del cable frente a este fenómeno a partir de la siguiente expresión.

$$\frac{U}{fD_{crit}} = 40\sqrt{S_c} \quad (2.8)$$

La ecuación anterior es la misma que se enunció en el caso del *Wake Galloping* (apartado 2.4), tomando el valor de la constante $c = 40$.

Estos datos se refieren al caso en el que el ángulo entre el eje del cable y la dirección del viento se encuentra entre 30° y 60°. Este criterio resulta difícil de cumplir, especialmente para cables de gran longitud, que tienen un diámetro de entre 150 a 200 mm.

Finalmente, cabe mencionar que la información existente sugiere que el galope de los cables inclinados es uno de los fenómenos peor comprendidos y más desconocidos en lo referente a vibraciones en cables (FHWA, 2007).

2.6. Bataneo (Buffeting)

El bataneo es un tipo de vibración aleatoria, inducida por la componente turbulenta del viento. A diferencia de otros fenómenos vibratorios presentes en cables, este mecanismo no está asociado con un fenómeno de resonancia, sino que depende de la naturaleza turbulenta del viento (Huang, 2011).

Las ráfagas aleatorias de viento pueden producir vibraciones importantes en los cables, aunque su amplitud se ve limitada debido a la ayuda que ejerce la alta tensión de atirantamiento de los cables.

En cables de gran longitud, las ráfagas de viento pueden excitar los modos de vibración más bajos, sin llegar a ser considerado un fenómeno de inestabilidad aeroelástica. Incluso estructuras aerodinámicamente muy estables pueden sufrir grandes movimientos si son flexibles, no debiendo confundirse estos fenómenos con uno de inestabilidad.

La amplitud de las vibraciones aumenta con la velocidad del viento, pero este efecto no es tan peligroso como los fenómenos de inestabilidad, en los que se pueden producir vibraciones de gran amplitud para velocidades de viento moderadas.

2.7. Otros mecanismos

Existen otros mecanismos responsables de la aparición de vibraciones en los cables que no están relacionados con la acción del viento sobre ellos. Estos mecanismos están asociados a condiciones meteorológicas particulares como en el caso de presencia de hielo, el paso de los vehículos por el puente o al movimiento de los elementos en los que se anclan los cables.

La acumulación de una capa de hielo sobre los cables provoca un cambio en su forma, que puede producir un fenómeno de inestabilidad aerodinámica. Este es un problema más habitual en cables de transmisión de energía, y en puentes se suele confiar su solución asegurando que los cables no tienen un amortiguamiento demasiado bajo (FHWA, 2007).

También se pueden producir vibraciones en los cables cuando la capa de hielo cae, reduciendo la masa asociada al cable repentinamente (Maurer Söhne, 2006). Estas vibraciones se producen normalmente con frecuencias bajas y grandes amplitudes.

Las fuerzas fluctuantes pueden producir variaciones en la tensión interna de los cables, llevando a oscilaciones de las fuerzas en los anclajes. Davenport concluyó que la fluctuación de la tensión axial en los cables podía constituir otro mecanismo de excitación (Hikami, 1986). Este fenómeno se ve condicionado por la relación entre los desplazamientos en los anclajes y la tensión en el cable. Una combinación de variación de tensión y movimientos en los anclajes, puede aumentar la energía en los cables y producir una amplificación del movimiento.

Por último, los fenómenos de excitación paramétrica y excitación externa han resultado de importancia en ciertas ocasiones. El primero de ellos se refiere a una amplificación del movimiento aplicado en los anclajes en la dirección perpendicular al eje del cable, mientras que el segundo, se refiere a una amplificación en la dirección del eje del cable. En resumen, se trata de una inestabilidad dinámica debida a pequeños movimientos periódicos del tablero o la torre. Estos movimientos pueden ser causados por el viento o por las vibraciones inducidas por la sobrecarga de tráfico.

Para considerar adecuadamente los fenómenos de excitación indirecta, es importante desarrollar modelos en los que se incluya la interacción entre los cables y el resto de elementos del puente.

3 CONTROL DE VIBRACIONES EN CABLES

Las vibraciones suponen, por lo general, un fenómeno indeseable en las estructuras, debiendo orientarse los diseños a configuraciones que minimicen el riesgo de sufrir fenómenos oscilatorios. En el caso de los cables, la gran flexibilidad y el reducido amortiguamiento que presentan de forma natural, hace necesario aplicar medidas externas de control de vibraciones, que garanticen el correcto comportamiento de la estructura durante su vida útil. El límite máximo de la amplitud de las vibraciones se convierte en un tema con numerosos matices subjetivos, ya que depende de la percepción de los usuarios y del confort de los mismos. En este sentido, es necesario establecer una serie de tolerancias o límites de los desplazamientos máximos permisibles.

3.1. Limitación de las vibraciones. Tolerancia de los usuarios

Los episodios de vibraciones de gran amplitud en cables provocan alarma social y sensación de falta de seguridad, afectando de forma importante al confort de los usuarios. Sin embargo, salvo en casos extremos, los daños son reducidos y se concentran en elementos secundarios de los anclajes (Figura 3.1), sin llegar a perder su funcionalidad. A largo plazo, los daños por fatiga sí pueden llegar a ser importantes y afectar a elementos principales de los tirantes.

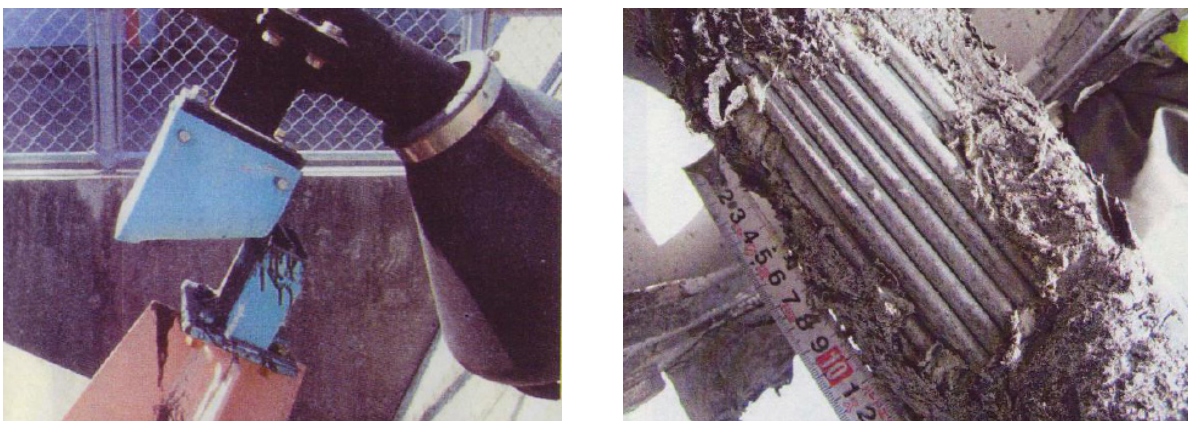


Figura 3.1. Daños en elementos de los tirantes ocasionados por vibraciones. (Flores, 2011)

Por tanto, se deben poner una serie de limitaciones a las vibraciones, de forma que se asegure el correcto comportamiento de la estructura durante la etapa de servicio. Mientras que en el caso de los daños por fatiga es posible determinar los desplazamientos que pueden producir problemas, no

existe actualmente un criterio común entre las numerosas normativas y recomendaciones en cuanto a la tolerancia de los usuarios a estas vibraciones.

(FHWA, 2007) considera la amplitud de la vibración y la velocidad como los dos factores más importantes que afectan al confort de los usuarios. Como el rango de frecuencias es limitado, parece razonable que los criterios de confort estén relacionados con la amplitud de la oscilación. Por tanto, se utiliza este parámetro para establecer los límites en los fenómenos vibratorios.

Por otra parte, (FIB, 2003) recomienda limitar la amplitud de las vibraciones en cables para el primer modo a $L/2000$ para evitar problemas en los tirantes. El Eurocódigo 3 (CEN, 2006) indica que, para el confort y seguridad del usuario, la amplitud de las vibraciones no debe superar el valor de $L/500$ para velocidades moderadas de viento de 15 m/s.

(SETRA, 2002) recomienda que para asegurar que los usuarios tengan una sensación de seguridad adecuada, la amplitud no debe superar el 10 cm cuando actúa viento moderado.

(FHWA, 2007) establece una serie de requerimientos basados en encuestas a usuarios para determinar el criterio de confort ante vibraciones. El parámetro que determina el criterio es la amplitud de las oscilaciones.

- 0.5 D (Preferible)
- 1.0 D (Recomendado)
- 2.0 D (No excedencia)

Siendo D el diámetro exterior del cable. Por tanto, se establecen tres umbrales con distintos niveles de exigencia en función de la amplitud de vibración máxima permitida.

Se puede comprobar, por tanto, que cuando se introducen tolerancias teniendo en cuenta la percepción de los usuarios, se obtienen limitaciones más exigentes que las que se impondrían únicamente pensando en la seguridad estructural.

3.2. Métodos de control de vibraciones en cables

Atendiendo a las tolerancias recogidas en el punto anterior, queda patente que si se previenen vibraciones de amplitud mayor a los umbrales establecidos, será necesario tomar medidas de control que permitan estar dentro de un rango aceptable de desplazamientos.

Para ello, existen diversos métodos, entre los que se encuentran métodos de tipo mecánico, estructural y aerodinámico.

De forma general, los sistemas para mitigar las vibraciones en cables se pueden resumir en los siguientes.

- Cables transversales cruzados. Unen varios cables, modificando así las frecuencias de vibración (Crossties).

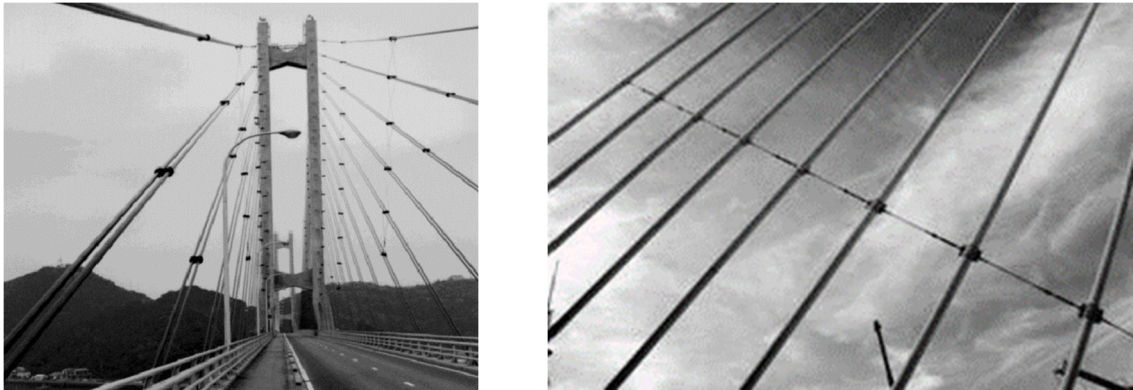


Figura 3.2. Crossties Yobuko Bridge (Fujino & Yamaguchi, 1998) y (FHWA, 2007)

Los cables cruzados han demostrado ser útiles, pero no son muy empleados debido a razones estéticas. El hecho de introducir un elemento transversal es considerado normalmente como antiestético, ya que se rompe la armonía de las distribuciones habituales en forma de arpa o abanico.

- Modificar mediante protuberancias la superficie de los cables, de forma que tengan una superficie aerodinámicamente más favorable.

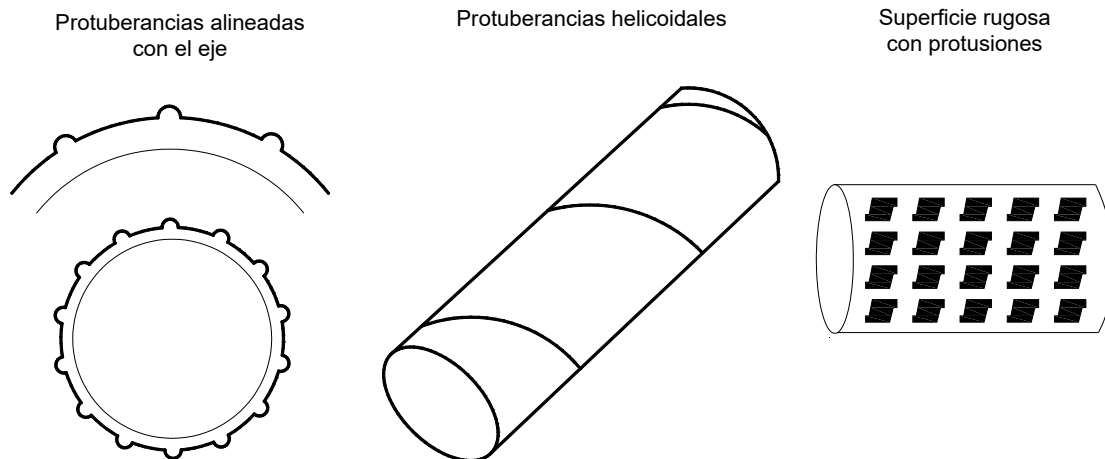


Figura 3.3. Tipos de superficie de tirantes con protuberancias (FHWA, 2007)

Las protuberancias en la superficie del tubo de protección son muy habituales hoy en día, sobre todo en nuevas construcciones, ya que han resultado muy efectivas para mitigar las vibraciones producidas por viento y lluvia. Sin embargo, tienen escasa aplicación en tirantes que ya están en servicio, ya que la rugosidad de la superficie debe estar presente desde el momento de instalación de los tirantes por motivos constructivos.

- Sistemas amortiguadores. Permiten elevar el nivel de amortiguamiento.

Dentro de los métodos de control, los de tipo mecánico, y en concreto los amortiguadores, son los que presentan un mayor atractivo desde el punto de vista del diseño y el desarrollo tecnológico. Son, además, los elementos más empleados en la actualidad para mitigar los fenómenos vibratorios en cables, debido a su gran eficacia y fiabilidad. Dichos amortiguadores ya se utilizaban con éxito desde los años 20 en las líneas de transmisión de energía, y se han utilizado más recientemente en multitud de puentes atirantados.

En este trabajo nos centraremos en los sistemas de control basados en el uso de amortiguadores.

3.3. Sistemas de disipación de energía. Amortiguadores

El amortiguamiento es el proceso por el que los sistemas pueden disipar la energía que es introducida por excitaciones externas, reduciendo la energía de deformación y la respuesta del sistema, especialmente cerca de condiciones de resonancia, donde el amortiguamiento gobierna la respuesta.

Para bajos ratios de amortiguamiento, se necesitan muchos ciclos para que la energía sea disipada. Sin embargo, conforme aumenta el amortiguamiento, aumenta la cantidad de energía disipada por ciclo. Por tanto, ubicando dispositivos amortiguadores en algunos puntos de la estructura se pueden suplementar las capacidades naturales de disipación de energía.

En concreto, en los cables, los amortiguadores se sitúan cerca de la zona de anclaje, a una distancia aproximada del 2-3% de la longitud del cable desde el anclaje más cercano.

En líneas generales, se pueden distinguir dos grandes tipos de sistemas: sistemas pasivos y sistemas activos.

- **Sistemas de control activo.** Ajustan los parámetros del amortiguador en función del comportamiento de la estructura. No han tenido una aplicación real en puentes hasta la aparición de sistemas *semi-activos* que emplean sustancias magneto-reológicas. La resistencia a cortante de este fluido puede variarse mediante la aplicación de un campo magnético. Es decir, se puede variar la capacidad del amortiguador variando el campo magnético (Zhou, 2005).

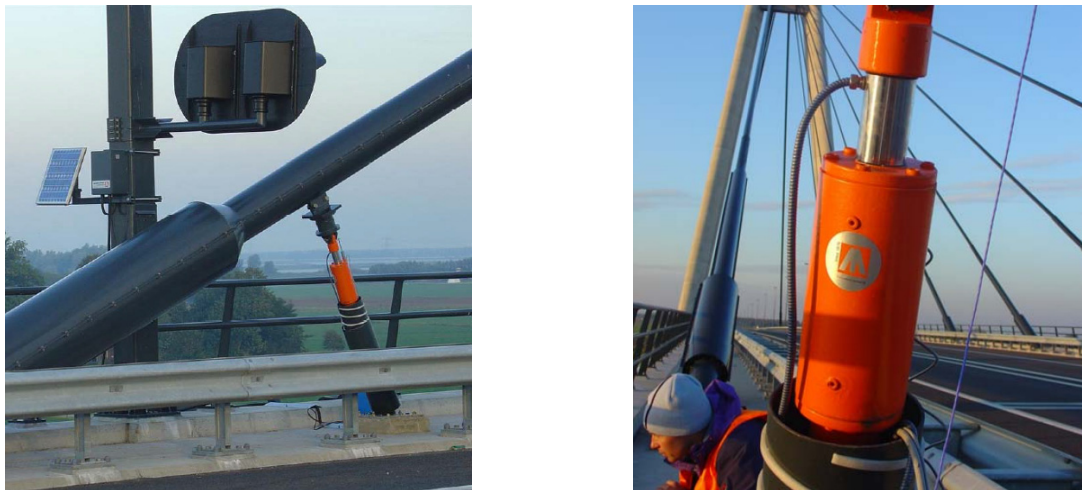


Figura 3.4. Sistema de control activo con placa solar (Maurer Söhne, 2006)

- **Sistemas de control pasivo.** Sus parámetros están predeterminados en el momento de ser fabricados. Son los más comunes y han sido utilizados en multitud de puentes atirantados. Se pueden definir como sistemas que no requieren una fuente de alimentación externa para funcionar, siendo las fuerzas de control que desarrollan determinadas por los movimientos de la estructura.

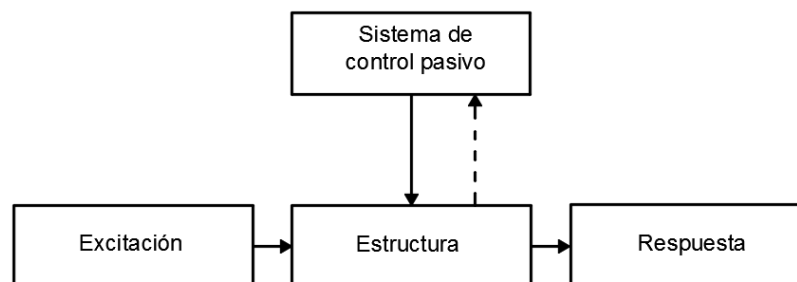


Figura 3.5. Esquema de funcionamiento de un sistema de control pasivo (Valdebenito & Aparicio, 2009)
(Symans & Constantinou, 1999)

Los sistemas de control pasivo han tenido un mayor desarrollo y han sido utilizados en numerosos casos, constituyendo las alternativas más habituales ofrecidas por los fabricantes. Por tanto, este documento se centrará en el estudio de los sistemas pasivos.

Dentro de los amortiguadores pasivos existen diversos tipos, atendiendo al principio de funcionamiento de cada uno de ellos y a los materiales que lo forman. A continuación, se realiza una síntesis de los tipos de amortiguadores que ofrecen diversos fabricantes.

3.4. Tipos de amortiguadores pasivos

3.4.1. Amortiguadores viscosos

El amortiguamiento viscoso se define como el mecanismo de disipación de energía donde la fuerza

de amortiguamiento es función del ratio de cambio del desplazamiento (Connor & Laflamme, 2014).

$$F = f(\dot{u}) \quad (3.1)$$

Donde F es la fuerza de amortiguamiento y \dot{u} es la velocidad. La dirección de F es contraria a \dot{u} . La forma lineal de la expresión anterior queda:

$$F = -c\dot{u} \quad (3.2)$$

Siendo c el coeficiente de amortiguamiento, que es una propiedad del dispositivo amortiguador.

Según (Connor & Laflamme, 2014), se puede obtener la energía disipada en un intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$ como:

$$W_{viscoso} = \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} F du = \int_{t_1}^{t_2} F \dot{u} dt \quad (3.3)$$

Si consideramos una excitación periódica:

$$u = \hat{u} \text{sen}(\omega t) \quad (3.4)$$

Tenemos que, en un ciclo completo el trabajo realizado es:

$$W_{viscoso} = -c\pi\omega\hat{u}^2 \quad (3.5)$$

Esta expresión representa la energía disipada por ciclo por el amortiguador cuando está sometido a un movimiento periódico de amplitud \hat{u} y frecuencia ω . La gráfica fuerza-desplazamiento tiene la siguiente forma:

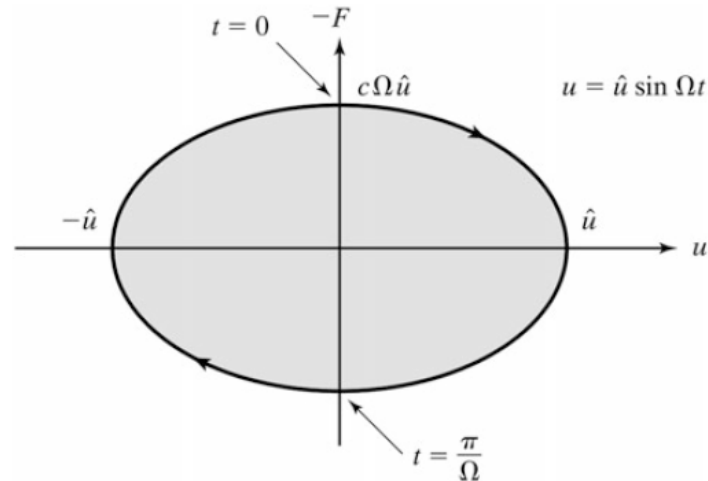


Figura 3.6. Curva Fuerza-Desplazamiento de un amortiguador viscoso lineal (Connor & Laflamme, 2014)

Los amortiguadores viscosos constituyen una de las alternativas mejor aceptadas, ya que son capaces de disipar una gran cantidad de energía ante grandes excitaciones.

Habitualmente, se componen de un cilindro relleno con un fluido (aceite, por ejemplo) y un pistón, que lo divide en dos partes y tiene libertad de movimientos a lo largo del eje del cilindro. En caso de movimientos o vibraciones, el fluido pasa de un lado a otro del pistón, produciéndose la disipación de energía. En el caso de movimientos lentos, como expansiones térmicas, el flujo es obstruido, de forma que durante el servicio normal el fluido es aproximadamente rígido. A continuación, se muestra un esquema.

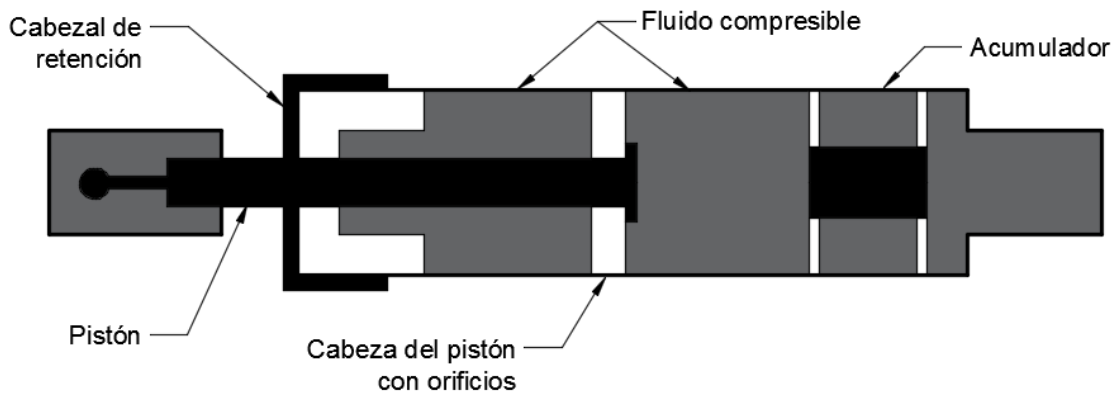


Figura 3.7. Esquema de un amortiguador viscoso típico (Connor & Laflamme, 2014)

Actualmente, los fabricantes de amortiguadores viscosos permiten diseñar dispositivos para un gran rango de velocidades y fuerzas (Valdebenito & Aparicio, 2009).

Los amortiguadores viscosos presentan algunas ventajas sobre el resto, como son su gran capacidad de amortiguamiento, la madurez tecnológica en su fabricación y su relativo bajo coste. Sin embargo, estos sistemas solo pueden proporcionar amortiguamiento en su dirección axial, por lo que es habitual ubicar dos o tres pistones, para controlar las vibraciones en el plano y fuera del plano del

cable.

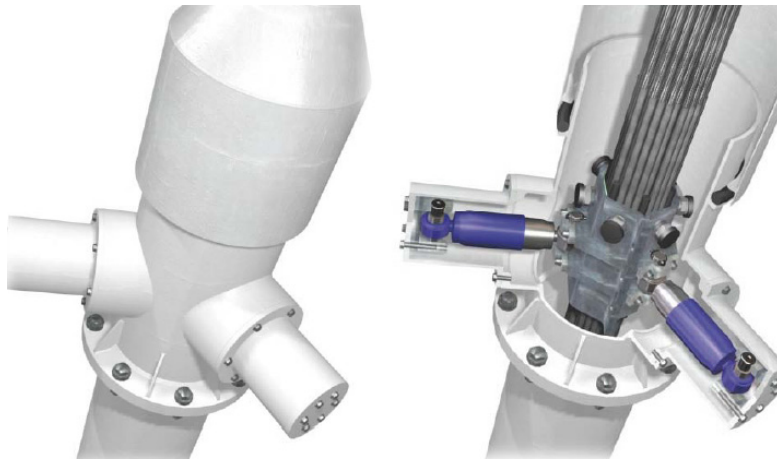


Figura 3.8. Amortiguador IRD (Freyssinet, 2008)

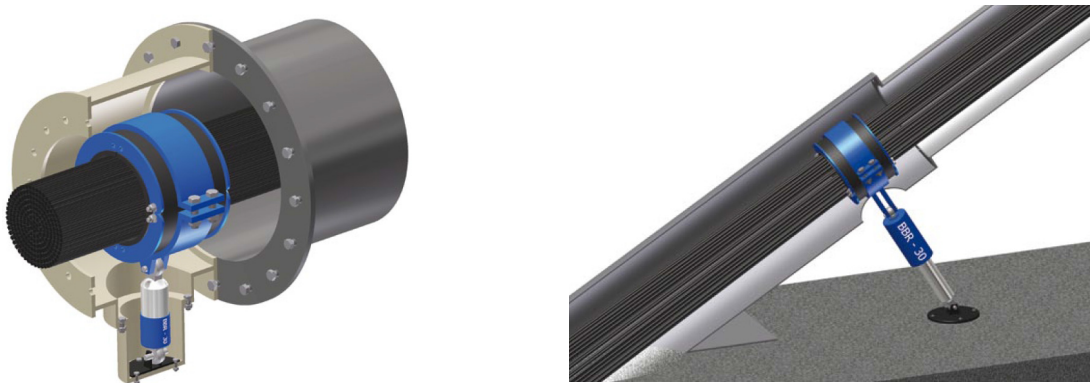


Figura 3.9. Amortiguador viscoso interno [Izquierda] y externo [Derecha] (BBR, 2014)

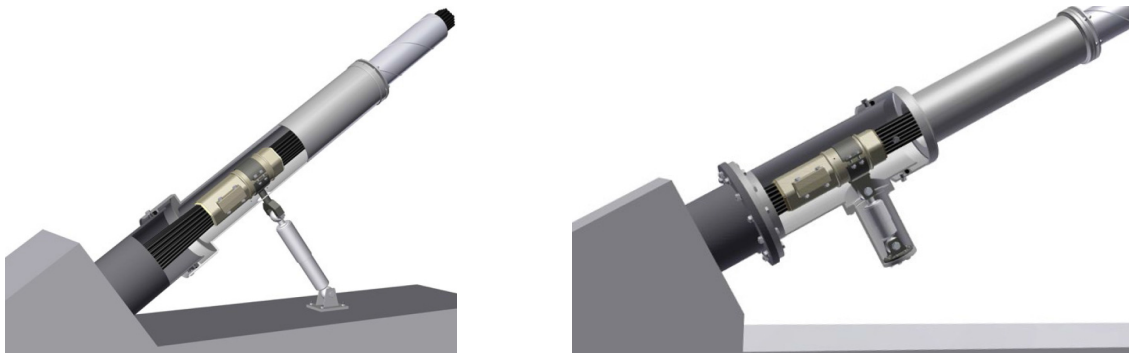


Figura 3.10. Amortiguadores viscosos (DSI)

3.4.2. Amortiguadores de fricción

Este tipo de amortiguamiento también es conocido como de Coulomb, siendo la fuerza de amortiguamiento igual al producto de la fuerza normal entre las partes deslizantes y el coeficiente de fricción. Matemáticamente se puede expresar como:

$$F = -\bar{F} \cdot \text{sgn}(\dot{u}) \quad (3.6)$$

Siendo $\text{sgn}(\dot{u})$ el signo de la velocidad.

Para una excitación periódica, el trabajo realizado por ciclo será el área encerrada por la curva fuerza-desplazamiento mostrada en la Figura 3.11.

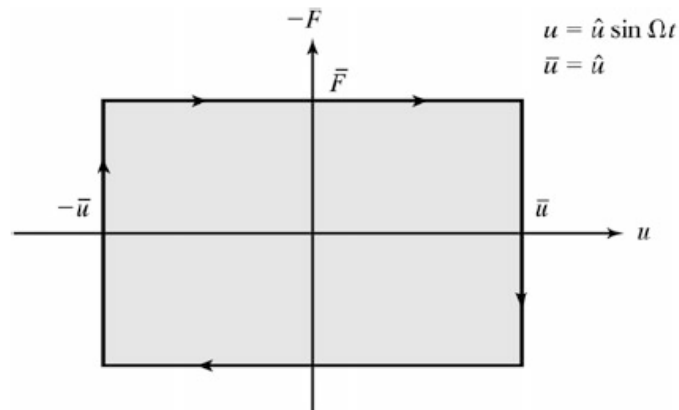


Figura 3.11. Curva Fuerza-Desplazamiento de un amortiguador de fricción (Connor & Laflamme, 2014)

Disipan energía mediante el movimiento relativo entre dos superficies en contacto, aplicando el mismo principio que los discos de freno, en los que la disipación de energía se lleva a cabo mediante la fricción entre dos partes (VSL, 2013).

En cuanto a su ubicación, pueden alojarse en el interior de la vaina o de forma externa.

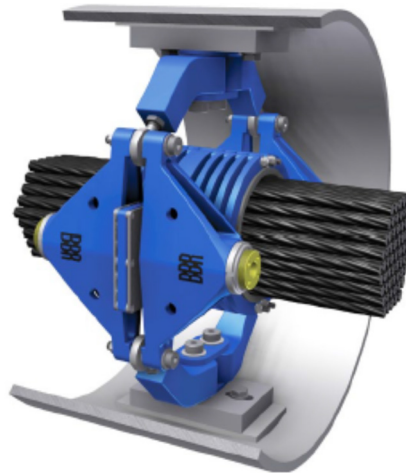


Figura 3.12. BBR Square Damper (BBR, 2014)

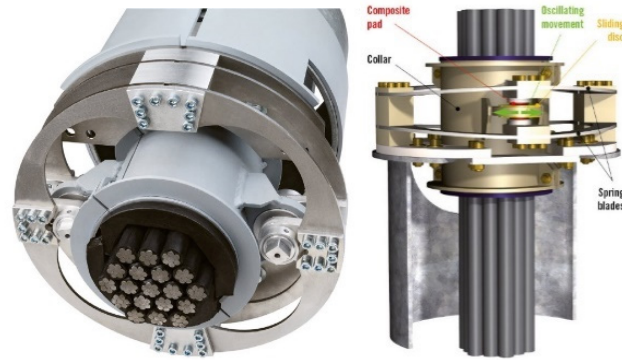


Figura 3.13. VSL Friction Damper (VSL, 2013)

Cuando se produce un movimiento en el cable y la fuerza transversal de este supera la fuerza de fricción del amortiguador, este comienza a moverse con el cable, produciéndose la disipación de energía (BBR, 2014).

3.4.3. Amortiguadores de goma o elastoméricos

Dentro de esta categoría se engloban los amortiguadores que emplean materiales elastoméricos, proporcionando un amortiguamiento adicional a los tirantes. Se caracterizan por la presencia de un material de tipo polímero (goma) que disipa energía deformándose cuando se ve sometido a esfuerzos cortantes.

Este tipo de amortiguador se caracteriza por tener un comportamiento aproximadamente viscoelástico.

Un material se considera elástico cuando las tensiones debidas a una excitación son únicamente función de la deformación asociada. De forma similar, se considera viscoso cuando el estado tensional depende de la velocidad de deformación. Por ejemplo, ante un estado de tensión cortante:

$$\text{Elástico: } \tau = G_e \gamma \quad (3.7)$$

$$\text{Viscoso: } \tau = G_v \dot{\gamma} \quad (3.8)$$

Atendiendo a la gráfica tensión-deformación, en el comportamiento elástico no hay retardo entre la tensión y la deformación, mientras que en el comportamiento viscoso el desfase es de $\pi/2$ radianes (Connor & Laflamme, 2014). Combinando ambos comportamientos se tiene:

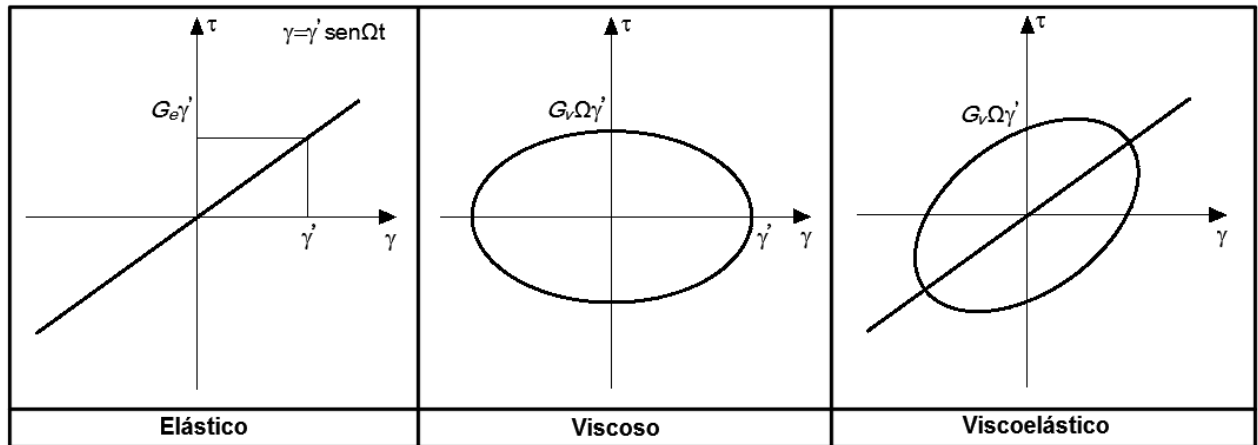


Figura 3.14. Relaciones tensión-deformación (Connor & Laflamme, 2014)

Ante una excitación periódica, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\gamma = \hat{\gamma} \text{sen} \Omega t \quad (3.9)$$

$$\tau = \hat{\gamma} (G_s \text{sen} \Omega t + G_l \text{cos} \Omega t) \quad (3.10)$$

Donde G_s es el “módulo de almacenamiento” y G_l es el “módulo de pérdida”. El cociente entre ambos se conoce como “factor de pérdida (η)”.

$$\eta = \frac{G_l}{G_s} = \tan \delta \quad (3.11)$$

Siendo el ángulo δ el desfase entre tensión y deformación. Este valor oscila entre 0 (comportamiento elástico) y $\pi/2$ (comportamiento viscoso).

La energía disipada por unidad de volumen en un ciclo es:

$$W_{\text{viscoelástico}} = \int_0^{2\pi/\Omega} \tau \dot{\gamma} dt \quad (3.12)$$

$$W_{\text{viscoelástico}} = \pi G_l \hat{\gamma}^2 \quad (3.13)$$

Si consideramos de nuevo una excitación periódica, se puede obtener la expresión que define la respuesta de un amortiguador viscoelástico.

$$u = \hat{u} \text{sen} \Omega t \quad (3.14)$$

$$F = f_d G_s \hat{u} (\text{sen} \Omega t + \eta \text{cos} \Omega t) \quad (3.15)$$

$$W_{\text{viscoelástico}} = \pi \eta f_d G_s \hat{u}^2 \quad (3.16)$$

f_d depende de la configuración geométrica del dispositivo.

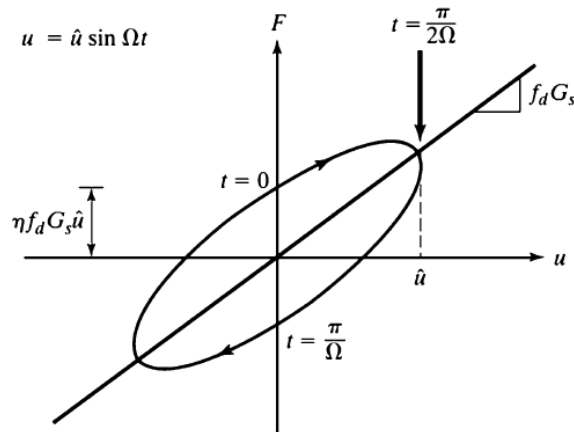


Figura 3.15. Curva fuerza-desplazamiento para un material viscoelástico (Connor & Laflamme, 2014)

Cuando estos materiales se someten a vibraciones, el diagrama tensión-deformación describe una curva como la que se muestra en la Figura 3.16, correspondiéndose el área encerrada por esta curva con la energía disipada por ciclo.

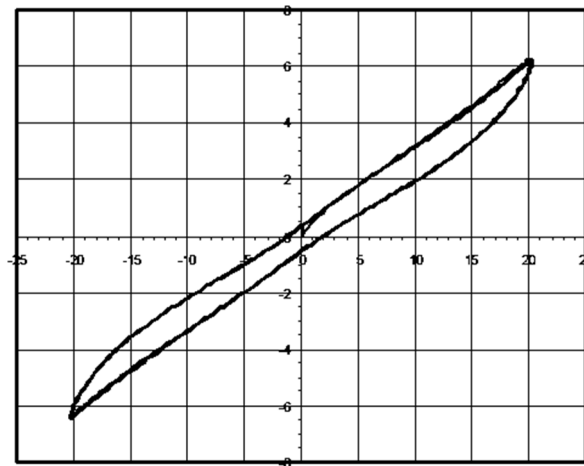


Figura 3.16. Ejemplo de curva de un amortiguador elastomérico (Maurer Söhne, 2006)

Por lo general, su instalación puede realizarse en el interior del tubo anti vandálico en el que se alojan los tirantes o de forma externa, fuera de dicho tubo y en una zona cercana a los anclajes.

En la siguiente imagen se puede observar un esquema de funcionamiento de un amortiguador elastomérico.

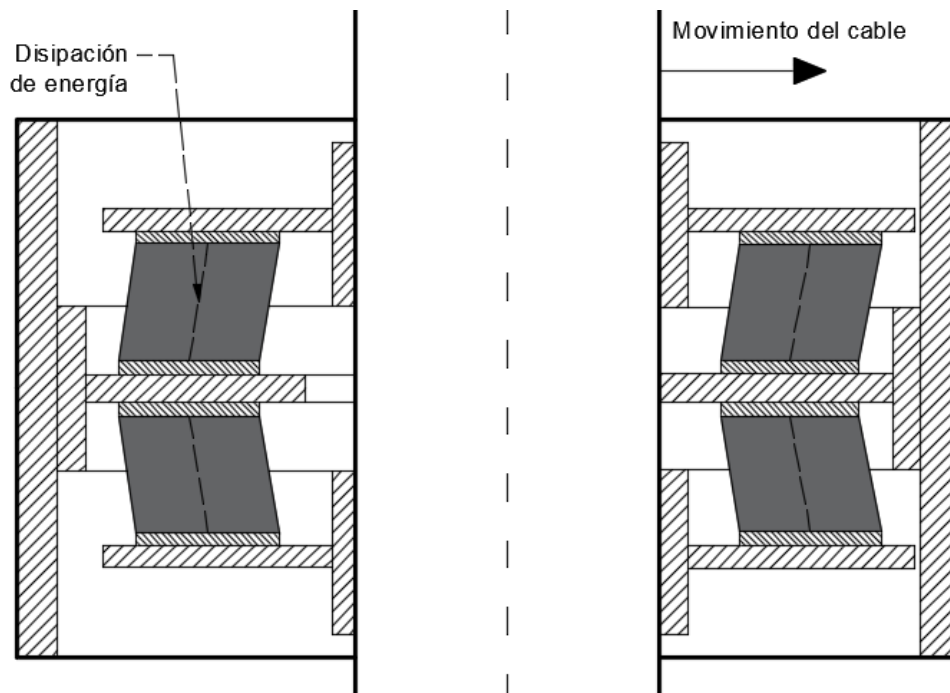


Figura 3.17. Esquema de funcionamiento de un amortiguador de goma (Maurer Söhne, 2006)

Los amortiguadores suelen estar compuestos de una serie de almohadillas, cuyo material es una goma de alto amortiguamiento (HDR). Dichas almohadillas se conectan a una parte móvil que está unida al cable y una parte fija conectada al tubo exterior (VSL, 2013).

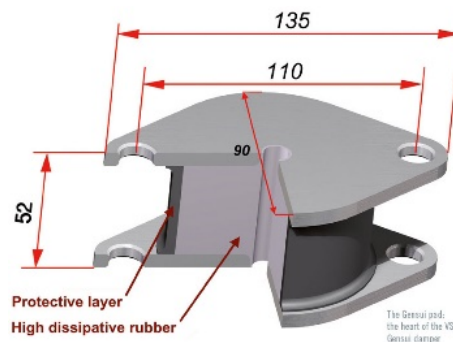


Figura 3.18. Almohadilla de goma de un amortiguador VSL R-Damper (VSL, 2013)

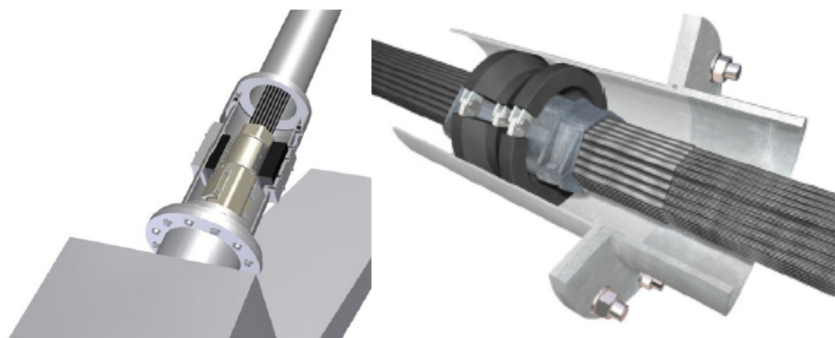


Figura 3.19. Amortiguador Elastomérico Interno (DSI) [Izq.] y (Freyssinet, 2008) [Dcha.]

3.5. Diseño de sistemas amortiguadores pasivos

Los amortiguadores de tipo pasivo suponen la alternativa de control más empleada en cables, habiendo sido instalados en numerosos puentes atirantados en las últimas décadas, demostrando su capacidad para aumentar considerablemente el amortiguamiento modal de los cables.

Dentro del campo del control de vibraciones en estructuras aparecen diversos enfoques que determinan el diseño de los sistemas de control, que son de aplicación en el caso de los amortiguadores de cables.

En el caso de los cables, diversos autores han desarrollado modelos y criterios para el diseño, coincidiendo la mayoría de ellos en tomar el ratio de amortiguamiento de un cable respecto al amortiguamiento crítico como una medida de la eficacia del sistema amortiguador.

Los criterios de diseño van encaminados a aumentar este ratio de amortiguamiento, ya que de forma natural los cables presentan rangos de amortiguamiento inferiores al 1%, lo que resulta insuficiente para evitar las vibraciones.

(PTI Guide Specification, 2000) y (FHWA, Wind-Induced Vibration of Stay Cables, 2007) coinciden en que un criterio para evitar las vibraciones inducidas por lluvia y viento en los cables es que el número de Scruton sea mayor que 10. Para ello, el parámetro que debe variarse es el ratio de amortiguamiento ξ .

$$S_c = \frac{m\xi}{\rho D^2} > 10 \quad (3.17)$$

Donde m es la masa, ξ es el ratio de amortiguamiento respecto al crítico, ρ es la densidad y D el diámetro del cable.

Por tanto, se busca cumplir esta condición mediante el incremento de ξ . La idea es, en definitiva, para una posición fija del amortiguador, buscar el tamaño del amortiguador que hace ξ máximo.

Sin embargo, existen configuraciones de amortiguadores, que pueden optimizar el comportamiento dinámico de los cables sin obtener el amortiguamiento máximo. En los próximos apartados se resumen las formulaciones desarrolladas históricamente, así como los enfoques de diseño que se pueden adoptar actualmente.

3.5.1. Definición del problema

El análisis del efecto que produce un amortiguador cuando se une a un cable en una zona cercana a los anclajes, ha sido abordado mediante diferentes modelos analíticos, numéricos y experimentales. El problema se puede representar por un sistema que se compone de un cable unido a los extremos mediante un anclaje inferior y otro superior, al que se le añade un amortiguador a una

cierta distancia del anclaje inferior.

De esta forma, se pretende suplementar las condiciones naturales de amortiguamiento de los cables que, en muchas ocasiones, resultan insuficientes para evitar problemas de inestabilidad dinámica.

El esquema mostrado en la Figura 3.20 ilustra el problema.

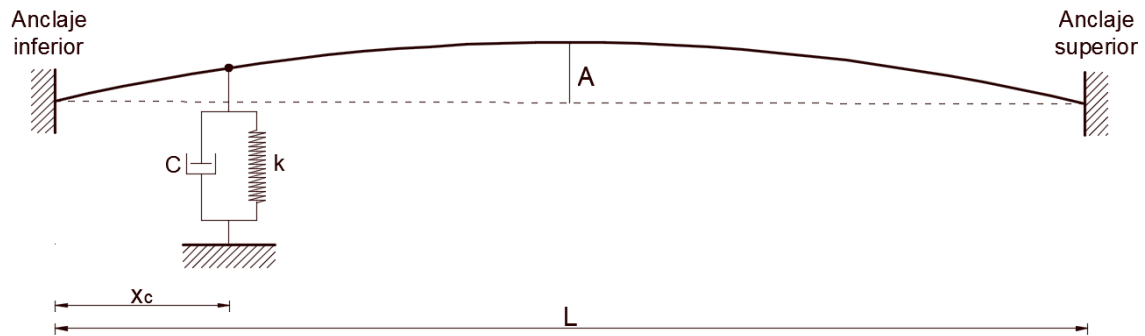


Figura 3.20. Esquema del sistema cable-amortiguador

El cable se caracteriza por sus propiedades mecánicas y por la tensión inicial, que determina su comportamiento dinámico, mientras que el amortiguador se caracteriza por la constante c . Este último suele estar compuesto normalmente por otros elementos adicionales, como muelles o deslizadores.

Un parámetro fundamental es x_c , que es la distancia entre el amortiguador y el anclaje inferior. La eficacia de un amortiguador viene determinada teóricamente según la relación x_c/L , donde L es la longitud total del cable. El decremento logarítmico máximo teórico será:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{\pi x_c}{L} \quad (3.18)$$

El comportamiento del sistema se entiende si se consideran las dos posibles situaciones extremas:

- Si la fuerza de amortiguamiento es reducida (c pequeña), el efecto del amortiguador es prácticamente nulo, produciéndose un movimiento como el de vibración libre.
- Si la fuerza de amortiguamiento es muy elevada (c grande), el comportamiento es similar al que se produce ubicando un apoyo en ese punto.

Por tanto, el punto óptimo se corresponde a una situación intermedia, en la que unos valores óptimos de las constantes que definen el amortiguador maximizan el amortiguamiento del sistema.

El parámetro de diseño a controlar suele ser la amplitud de las oscilaciones (A).

3.5.2. Estado del arte del diseño de amortiguadores de cables

El tamaño del amortiguador necesario para optimizar el ratio de amortiguamiento en el cable ha sido objeto de estudio para numerosos investigadores, existiendo en la actualidad numerosos modelos.

De acuerdo con (Huang, 2011), el estado del arte en el diseño de amortiguadores pasivos se puede resumir a partir de los análisis realizados por los siguientes investigadores.

3.5.2.1. Cable recto

Se asume un cable totalmente recto unido a un amortiguador viscoso, ignorando las deformaciones del cable.

(Kovács, 1982) estudió el efecto de añadir un amortiguador viscoso a un tirante, en función de la constante c (amortiguamiento), e introdujo la curva de amplificación dinámica, comparando la primera frecuencia natural para el caso de $c = 0$ y $c = \infty$. En el primer caso, una constante de amortiguamiento muy pequeña, hace que no haya efecto de cara a reducir las vibraciones. Mientras que, en el segundo, cuando hay una gran fuerza de amortiguamiento, el comportamiento es similar al que existiría en caso de ubicarse un apoyo en ese punto. Por tanto, el amortiguador óptimo, se caracteriza por una constante c_{opt} , que proporciona una curva de amplificación obtenida a partir de los casos extremos anteriores, tal y como se muestra en la figura.

Kovács estima el tamaño óptimo del amortiguador c_{opt} como:

$$\frac{c_{opt}}{mL\omega_{01}} \approx \frac{1}{2\pi \left(\frac{x_c}{L}\right)} \quad (3.19)$$

Donde $\frac{x_c}{L}$ representa la distancia desde el amortiguador respecto al anclaje en relación con la longitud total del cable y ω_{01} es la primera frecuencia natural.

El ratio de amortiguamiento modal máximo es:

$$\xi_{max} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{x_c}{L} \quad (3.20)$$

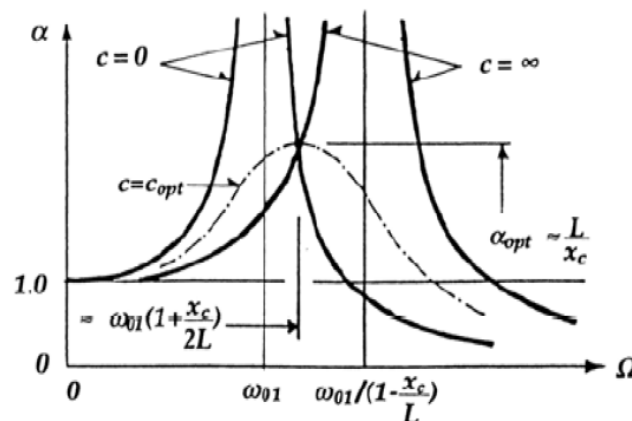


Figura 3.21. Curvas de amplificación dinámica (Kovács, 1982)

(Pacheco, Fujino, & Sulekh, 1993) proponen una curva universal, que representa el amortiguamiento modal de un cable recto para los primeros modos de vibración. Esta curva es válida para valores bajos de x_c/L y es de gran utilidad para el diseño preliminar de la capacidad del amortiguador. También se puede utilizar esta curva para estimar el ratio de amortiguamiento de un cable con un amortiguador dado.

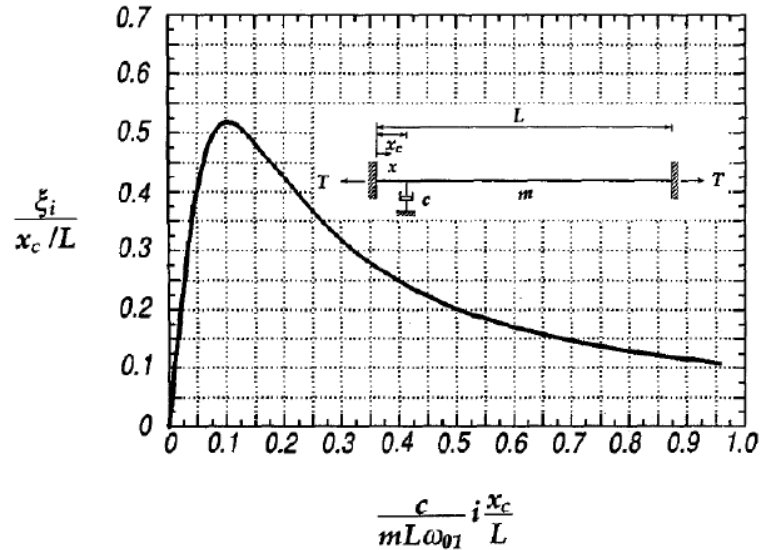


Figura 3.22. Curva universal (Pacheco, Fujino, & Sulekh, 1993)

La curva anterior se caracteriza por un valor máximo asociado al máximo ratio de amortiguamiento alcanzable ($\xi_{n,max}$) para el modo de orden n.

$$\xi_{n,max} = 0.52 \cdot \frac{x_c}{L} \quad (3.21)$$

$$c_{opt,n} = 0.10 \cdot \frac{mL\omega_{01}}{n \frac{x_c}{L}} \quad (3.22)$$

Estos resultados están en concordancia con el planteamiento anteriormente propuesto por (Kovács, 1982), así como por los resultados obtenidos por (Yoneda & Maeda, 1989) que propusieron, a partir de un modelo analítico de un cable amortiguado, que el tamaño óptimo del amortiguador se podía estimar como:

$$c_{opt} = \frac{6.25}{2\pi} \cdot \frac{mL\omega_{01}n \frac{x_c}{L}}{\text{sen}^2\left(\pi n \frac{x_c}{L}\right)} \quad (3.23)$$

Y el máximo ratio de amortiguamiento:

$$\xi_{max} = \frac{6.25}{2\pi} \left(0.45 + \frac{x_c}{L} \right) \quad (3.24)$$

Este planteamiento lleva a que el c_{opt} decrece con el incremento del modo de vibración.

(Krenk S. , 2000) realizó un análisis numérico en términos del problema de autovalores complejos y obtuvo una solución asintótica para el ratio de amortiguamiento en los modos de vibración más bajos, válida para amortiguadores situados cerca de un anclaje. *Krenk* propone que el máximo amortiguamiento modal se puede estimar como:

$$\xi_{max} \approx 0.5 \frac{x_c}{L} \quad (3.25)$$

$$c_{opt} = \frac{\sqrt{Tm}}{\left(\pi n \frac{x_c}{L} \right)} \quad (3.26)$$

Siendo T la tensión en el cable, n el número de modo y m la masa por unidad de longitud.

3.5.2.2. Cable con curvatura

Otros autores adoptan un modelo de cable con curvatura. A pesar de que la curva universal es válida para un gran número de aplicaciones, (Pacheco, Fujino, & Sulekh, 1993), advierten que, en comparación con un cable tenso recto, la curvatura puede provocar un menor amortiguamiento óptimo alcanzable. (Crémona, 1997), investiga este efecto, extendiendo el concepto de curva universal a cables con curvatura, basándose en la formulación de (Irvine & Caughey, 1974). Cremona llega a la conclusión de que, para los modos de vibración simétricos, el ratio de amortiguamiento depende del valor del parámetro de Irvine, afectando principalmente al primer modo. En el caso de los modos antisimétricos, las características de amortiguamiento son idénticas para un modelo de cable tenso y uno de cable con curvatura. En el caso de cables de gran longitud, la reducción del amortiguamiento alcanzable por este efecto es importante debido a que la curvatura del cable se debe a su peso propio.

3.5.2.3. Efectos de la rigidez del cable

Con el fin de considerar los efectos de rigidez a flexión de los tirantes y el aumento de longitud por la curvatura, (Tabatabai & Mehrabi, 2000) desarrollan una formulación numérica para obtener las frecuencias de vibración y ratios de amortiguamiento de cables con rigidez a flexión equipados con un amortiguador viscoso. Llegan a la conclusión de que el máximo ratio de amortiguamiento alcanzable es alrededor de un 8% superior que el máximo de la curva universal. También, se deduce que el efecto de la rigidez a flexión es más relevante para amortiguadores situados a poca distancia

del anclaje.

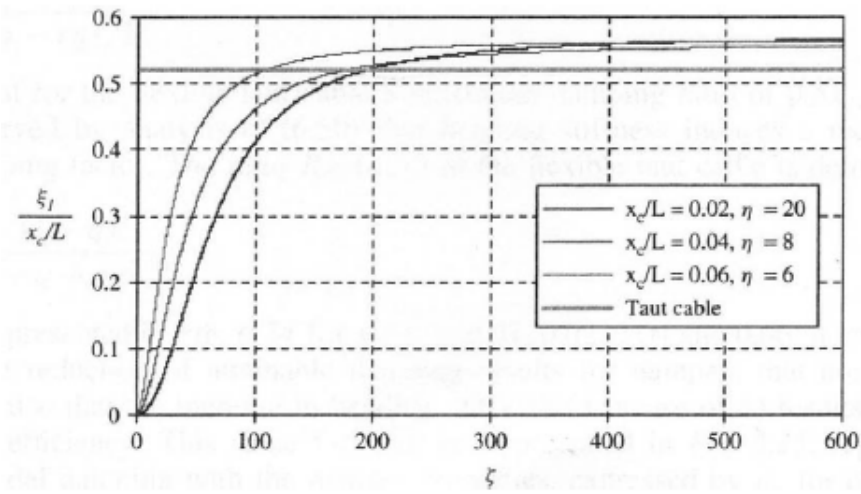


Figura 3.23. Variación del máximo ratio de amortiguamiento respecto al parámetro de rigidez a flexión.

(Tabatabai & Mehrabi, 2000)

(Zhou, 2005) desarrolla un análisis modal complejo, teniendo en cuenta la rigidez del amortiguador y llega a la conclusión de que un aumento de la rigidez del amortiguador supone un aumento del tamaño óptimo del mismo.

(Hoang & Fujino, 2007) incluyen el efecto de la rigidez a flexión en un estudio analítico y deducen una fórmula asintótica para el amortiguamiento modal alcanzado en un cable. El estudio se centra fundamentalmente en considerar el efecto de la rigidez a flexión del cable en el amortiguamiento modal máximo. Los resultados muestran que mientras la rigidez en el cable puede reducir el máximo amortiguamiento modal alcanzable un 20%, puede aumentar significativamente el tamaño óptimo del amortiguador.

(Cheng, Darivandi, & Ghrib, 2010) realizan una simulación numérica de un sistema de cable con amortiguador usando un enfoque energético. Para ello, tienen en cuenta los efectos de la curvatura del cable y la rigidez a flexión. El aumento del amortiguamiento del cable proporcionado por la presencia del amortiguador externo se determina examinando la serie temporal de energía cinética del cable, es decir, se emplea el ratio de decaimiento de la energía cinética para determinar la eficiencia del amortiguador.

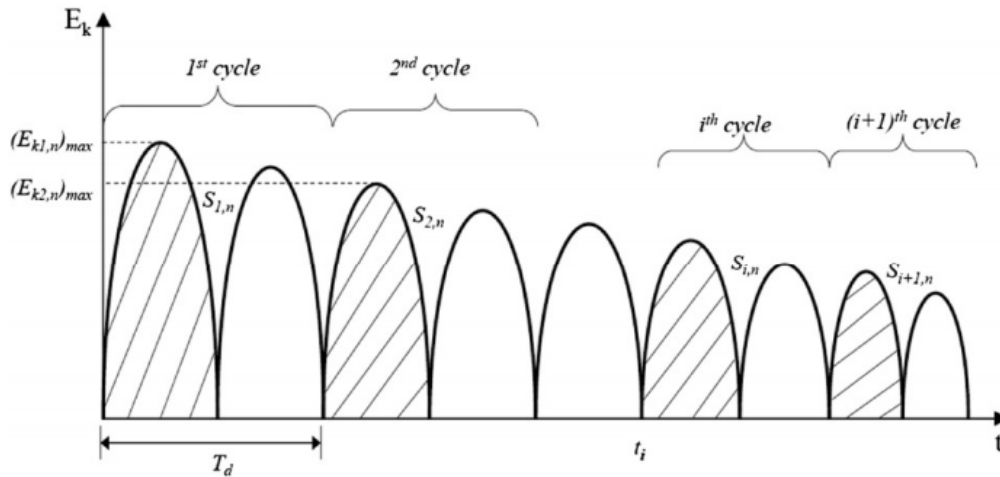


Figura 3.24. Evolución de la energía cinética del cable amortiguado (Cheng, Darivandi, & Ghrib, 2010)

A continuación, se muestra en la Tabla 3.1 un resumen de las fórmulas empíricas existentes para estimar el tamaño óptimo del amortiguador y el máximo ratio de amortiguamiento posible.

Tabla 3.1. Coeficiente de amortiguamiento óptimo y máximo ratio para un amortiguador viscoso (Huang, 2011).

Literatura	$C_{opt,n}$	$\xi_{n,max}$
Kovács (1982)	$\frac{1}{(2\pi)mL\omega_1} / (\frac{nx_c}{L})$	$0.5x_c/L$
Yoneda et al. (1989)	$6.25/(2\pi)(\frac{mL\omega_1 nx_c}{L}) / [sen^2(\frac{\pi nx_c}{L})]$	$\frac{6.25}{2\pi x_c} / L \cdot [0.45 + \frac{x_c}{L}]$
Uno et al (1991)	$6.25/(2\pi)(\frac{mL\omega_1 nx_c}{L}) / [n sen^2(\frac{\pi nx_c}{L})]$	$\frac{3.3}{2\pi x_c} / L$
Pacheco et al. (1993)	$0.10mL\omega_1/(nx_c/L)$	$0.52x_c/L$
Cheng et al. (2010)	$0.261e^{-0.00061[L/(H/EI)^{1/2}]}(x_c/L)^{-1.192}$	$48.52(x_c/L)^{1.03} \left[L / (\frac{H}{EI})^{1/2} \right]^{-0.033}$

Además de los modelos analíticos y numéricos anteriores, diversos investigadores han desarrollado estudios experimentales con el fin de comprender mejor los fenómenos vibratorios en los cables.

3.5.3. Criterios de optimización

La optimización de un amortiguador se refiere al ajuste de los parámetros del sistema para que la eficiencia sea máxima. Para ello, se deben encontrar las características del amortiguador que determinan el comportamiento óptimo del sistema estructural. Los estudios realizados por (Pacheco, Fujino, & Sulekh, 1993) confirmaron la existencia de un tamaño de amortiguador óptimo, que maximiza el ratio de amortiguamiento en los cables.

En el ámbito de los amortiguadores de cables, los criterios de diseño han ido encaminados a garantizar un determinado ratio de amortiguamiento, consiguiendo con ello mantener el número de Scruton por encima de un determinado valor. Sin embargo, existen criterios de optimización basados en el control de otras variables, como los desplazamientos, que se usan con gran asiduidad en otros campos del control de estructuras.

Se puede hablar de tres enfoques comunes dentro del control de vibraciones mediante amortiguadores, la optimización de las normas H_∞ y H_2 y los criterios de maximización de estabilidad. Mientras los dos primeros intentan mejorar la respuesta estacionaria del sistema, el tercero incide en la respuesta transitoria (Gidewon, 2015).

En la Tabla 3.2, se muestra un resumen de los objetivos de obtimización en cada uno de los criterios mencionados.

Tabla 3.2. Criterios de optimización típicos de un disipador de energía. (Asami, Nishihara, & Baz, 2002)

Criterio de Optimización	Objetivo
Optimización H_∞	Minimizar la máxima amplitud de respuesta del sistema
Optimización H_2	Minimizar la energía de vibración total del sistema
Maximización de estabilidad	Atenuar la vibración transitoria del sistema lo más pronto posible

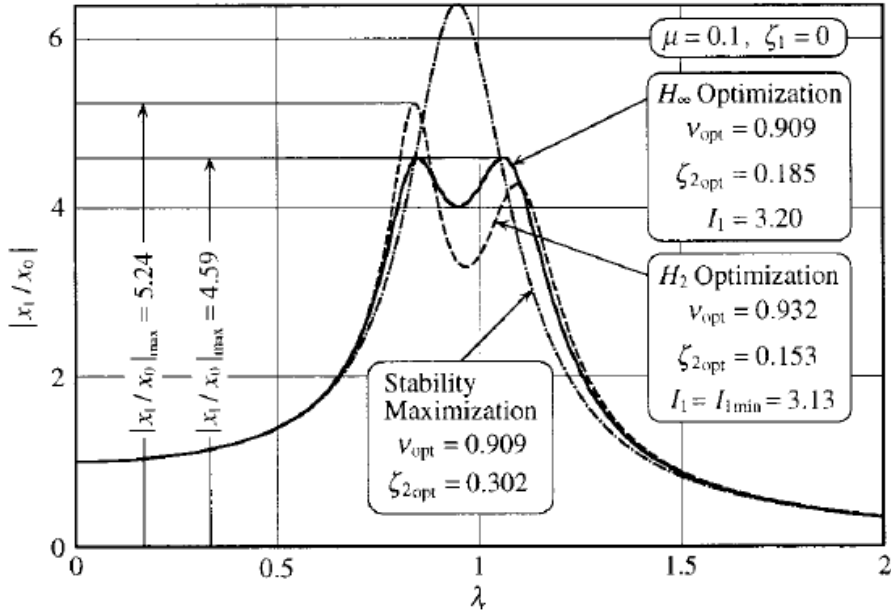


Figura 3.25. Comparación de tres curvas de respuesta en frecuencia óptimas, basadas en diferentes criterios (Asami, Nishihara, & Baz, 2002)

A continuación, se resumen brevemente los criterios basados en la optimización de las normas H_∞ y H_2 .

Además, se introduce lo que se conoce como optimización basada en el rendimiento de la estructura (*Performance based design*), ya que este es el enfoque que se pretende emplear en este trabajo.

3.5.3.1. Optimización H_∞ .

El ajuste de la norma H_∞ se centra en minimizar la máxima amplitud de respuesta, también llamada H_∞ ante una excitación externa.

Por tanto, la optimización H_∞ se alcanza determinando los parámetros óptimos del amortiguador para los que los picos de la función de respuesta tienen la altura mínima.

Matemáticamente, H_∞ se define como (Weber, Feltrin, & Huth, 2006).

$$\|G_p(r_p)\|_\infty = \max(r_p) |G_p(r_p)| \quad (3.27)$$

El objetivo de este criterio de optimización es encontrar los parámetros (ξ_s es el ratio de amortiguamiento) que minimizan $\|G_p(r_p)\|_\infty$:

$$\min(r_p, \xi_s) \|G_p(r_p)\|_\infty = \min(r_p, \xi_s) \max(r_p) |G_p(r_p)| \quad (3.28)$$

3.5.3.2. Optimización H_2 .

La optimización de la norma H_2 se basa en minimizar la energía de vibración total en el sistema. El

criterio se puede definir como (Weber, Feltrin, & Huth, 2006).

$$\|G_p(r_p)\|_2 = \sqrt{\int_{t=-\infty}^{t=\infty} (G_p(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{t=-\infty}^{t=\infty} |G_p(r_p)|^2 d r_p} \quad (3.29)$$

La optimización consiste en encontrar los parámetros que minimizan $\|G_p(r_p)\|_2$.

$$\min \|G_p(r_p)\|_2 = \sqrt{\int_{t=-\infty}^{t=\infty} (G_p(t))^2 dt} = \min \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{t=-\infty}^{t=\infty} |G_p(r_p)|^2 d r_p} \quad (3.30)$$

3.5.3.3. Optimización basada en el rendimiento.

Este criterio de optimización se basa en el control del rendimiento de la estructura. En el caso de los amortiguadores de cables, se busca optimizar los parámetros del amortiguador para que se cumpla una determinada condición de respuesta, sin llegar a reducir totalmente la amplitud de las oscilaciones. De esta forma, es posible obtener un desempeño óptimo del sistema, sin llegar al máximo ratio de amortiguamiento.

A diferencia del resto de criterios de optimización nombrados anteriormente, que se basaban en controlar la función de respuesta de la estructura, en este caso, se busca establecer una condición en la respuesta ante unas determinadas acciones y condiciones de la estructura.

El desarrollo de los métodos numéricos de simulación permite realizar modelos estadísticos y aleatorios de cargas dinámicas, como en el caso del viento. A partir de estas simulaciones, se obtienen series temporales con las que es posible evaluar el comportamiento de la estructura ante diversos fenómenos. Se trata, por tanto, de establecer una serie de condicionantes al comportamiento de la estructura ante estas cargas.

De esta forma, se puede obtener una configuración óptima del amortiguador para que cumpla la condición impuesta y no para obtener el máximo ratio de amortiguamiento en el cable.

Este es el enfoque que se pretende poner en práctica en el presente trabajo. Para ello, se simularán las acciones de viento y se realizarán diversos análisis numéricos, con el fin de evaluar la respuesta de los cables ante dichas acciones y posteriormente obtener los parámetros óptimos del amortiguador.

3.6. Método de optimización mediante el uso de algoritmos genéticos

En los últimos 30 años, ha habido un creciente interés en los métodos heurísticos de optimización.

Uno de los desarrollos más interesantes es la aplicación de algoritmos genéticos (GAs) (Reeves & Rowe, 2003), siendo los más extendidos en multitud de aplicaciones y disciplinas.

Los algoritmos genéticos se han utilizado en numerosas aplicaciones ingenieriles en las que se han empleado procesos de optimización. En el presente trabajo, se aborda su utilización para la optimización de los parámetros de los amortiguadores.

3.6.1. Perspectiva histórica

El término “Algoritmo genético” fue usado por primera vez por Holland en su libro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (1975). Otros científicos también desarrollaron ideas similares. En la década de 1960 (Rechenberg, 1973) y (Schwefel, 1977) desarrollaron en Alemania la idea de “Estrategia de evolución”, mientras que, en Estados Unidos, (Fogel, 1963) y otros, implementaron la idea de lo que llamaron “Programación evolutiva”. Todas estas propuestas tenían en común la idea de la mutación y la selección (Reeves & Rowe, 2003).

A pesar de algunos desarrollos exitosos y su prometedor futuro, estas técnicas no llegaron a explotar completamente hasta años más tarde, debido principalmente a que eran muy costosas computacionalmente para los ordenadores de la época.

3.6.2. Conceptos básicos

Un algoritmo genético (AG) es un método de optimización, basado en un proceso de selección natural que imita la evolución biológica. El principio de funcionamiento del algoritmo consiste en modificar repetidamente una población de soluciones individuales. En cada paso, el algoritmo genético selecciona individuos de la población actual aleatoriamente y los utiliza como padres para producir los hijos de la siguiente generación. Los algoritmos genéticos presentan notables diferencias respecto a los algoritmos clásicos de optimización (Mathworks, 2017).

Tabla 3.3. Diferencias entre un algoritmo clásico y un algoritmo genético (Mathworks, 2017).

Algoritmo clásico	Algoritmo genético
Genera un punto único en cada iteración	Genera una población de puntos en cada iteración
Selecciona el siguiente punto de la secuencia mediante un cálculo determinista	Selecciona la siguiente población mediante un cálculo que emplea generadores de números aleatorios

Los algoritmos genéticos se componen de varios elementos, cuya interacción puede observarse en el siguiente esquema básico de un AG obtenido de (Reeves & Rowe, 2003).

Elección de una población inicial de cromosomas;
Mientras no se satisfaga la condición de terminación, hacer
 Repetir
 Si la condición de paso es satisfecha **entonces**
 {Seleccionar individuos padres;
 Elegir parámetros de reproducción;
 Realizar reproducción};
 Si la condición de mutación es satisfecha **entonces**
 {Seleccionar individuos para la mutación;
 {Seleccionar puntos de mutación;
 Realizar mutación};
 Evaluar la función objetivo de los descendientes
 hasta que se hayan creado los suficientes;
 Seleccionar nueva población;
Fin

3.6.2.1. Población inicial.

La cuestión principal a considerar en primer lugar es el tamaño de la población y el método para elegir cada individuo. Esto ha sido objeto de estudio por numerosos autores, demostrando los resultados empíricos que poblaciones con un tamaño inferior a 30 eran suficientes en la mayoría de los casos.

Respecto a cómo debe elegirse la población inicial, se suele asumir que la inicialización debe ser aleatoria. Sin embargo, en algunas ocasiones esto puede no cubrir uniformemente todo el espacio de búsqueda.

En definitiva, los parámetros anteriores dependerán de la complejidad del problema y del número de variables involucradas en el proceso de optimización.

3.6.2.2. Condición de reproducción (Crossover).

Las estrategias de reproducción y mutación pueden ir juntas para generar nuevos descendientes. Es decir, se realiza un cruce o reproducción de los individuos, y posteriormente, se lleva a cabo la mutación. Sin embargo, la segunda estrategia realiza una de las dos tareas, pero no ambas.

La reproducción (crossover) consiste en cruzar dos pares de soluciones y mezclarlas para obtener una nueva solución (descendiente). Si entra en juego la mutación, se realizan cambios sobre algunas características de los descendientes.

3.6.2.3. Selección.

La selección se basa en su relación con la función objetivo del problema. Los individuos se seleccionan en función de los valores de la función objetivo obtenidos. De esta forma, las siguientes generaciones se realizan a partir de las mejores soluciones previas.

Habitualmente, la selección se lleva a cabo con funciones de naturaleza estocástica. Un ejemplo de

función es la Roulette Wheel Selection (RWS), que utiliza una función de probabilidad en la que la probabilidad de seleccionar un determinado individuo es directamente proporcional a su aptitud.

Un problema habitual en poblaciones de gran tamaño, es que puede llegar un punto en el que la reproducción se esté haciendo con soluciones iguales (clones) o prácticamente iguales, produciéndose una condición errónea de terminación. Para solucionar esto, existen varias alternativas, destacando dos en concreto:

- Ranking: Consiste en ordenar a los individuos en función de su aptitud (capacidad para optimizar la función objetivo). De esta forma, el algoritmo de selección se hace simple y eficiente, aunque presenta el inconveniente de perder información.
- Selección por torneo: una serie de individuos son comparados y el mejor de cada uno de ellos es elegido como padre.

3.6.2.4. Finalización.

Se debe establecer un criterio de parada del algoritmo, una vez que se alcancen unas determinadas condiciones. Criterios comunes consisten en establecer un valor determinado de la función objetivo, limitar el número de iteraciones o el tiempo de ejecución del algoritmo.

Es habitual asociar el criterio de parada con unas determinadas tolerancias de cálculo. Cuando los cambios entre una iteración y otra son menores que un determinado valor, la optimización se ha alcanzado y el algoritmo se puede detener.

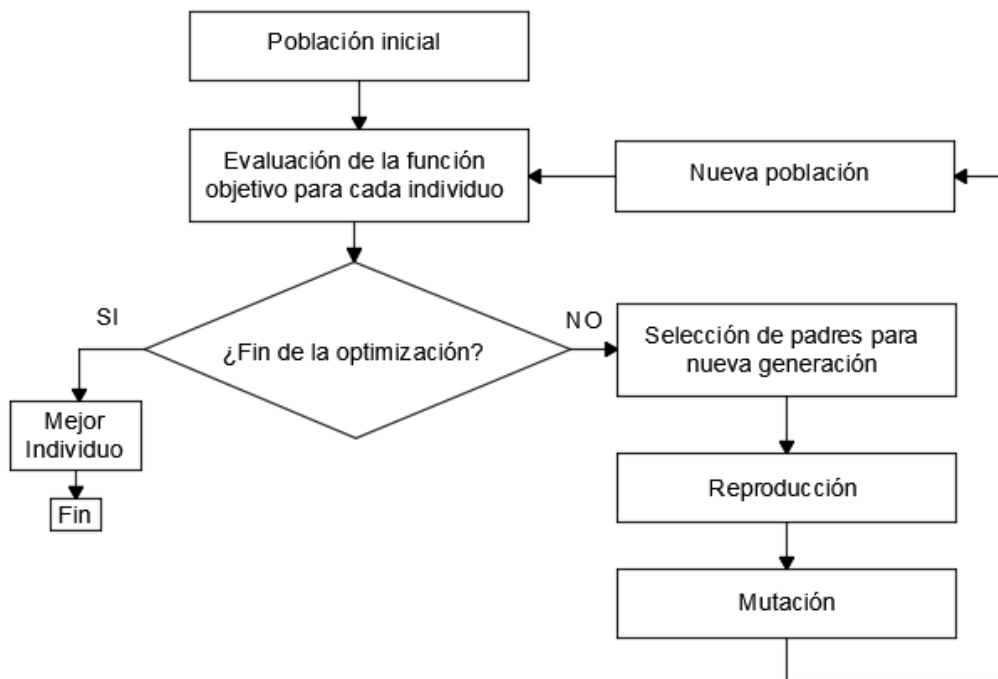


Figura 3.26. Diagrama de flujo de un algoritmo genético.

4 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL RATIO DE AMORTIGUAMIENTO EN CABLES

La evaluación de las fuerzas internas y el amortiguamiento en los cables durante la etapa en servicio de la estructura se puede abordar mediante diversos métodos de carácter experimental. En concreto, la fuerza en los cables se puede medir con métodos basados en (Sá Caetano, 2007):

- La medida directa de las tensiones durante el tesado de los cables.
- Mediante células de carga o galgas extensiométricas.
- La medida de la elongación de los cables cerca de los anclajes.
- Levantamientos topográficos.
- La medida indirecta de las vibraciones.

El primer método es utilizado durante la etapa de construcción de la estructura, pudiendo presentar errores en el entorno del 10% de la carga real. El segundo método se basa en la medida de las deformaciones en una galga o en las tensiones medidas en células de carga. El principal problema que presenta es el elevado coste originado por los numerosos sensores necesarios.

También pueden emplearse métodos basados en medir la elongación de una parte del cable cerca de los anclajes para estimar la deformación en el tirante.

La estimación indirecta de la tensión mediante la medida de las frecuencias naturales del cable se basa en la teoría de la cuerda vibrante. Este método presenta gran interés para la evaluación de las condiciones del cable durante su etapa de servicio.

4.1. Evaluación de la fuerza y el amortiguamiento en los cables basado en el método vibratorio

El método se basa en un resultado directo de la teoría de propagación de ondas (teoría de la cuerda vibrante), aplicada a un cable tenso que está anclado en ambos extremos. Así, se considera el cable como un medio no dispersivo, donde la velocidad de propagación de la onda es independiente de la frecuencia. Una perturbación transversal aplicada en cualquier punto a lo largo del cable se propaga

hasta el extremo y se refleja sucesivamente, resultando un sistema con ondas transversales estacionarias con forma sinusoidal, caracterizada por las siguientes frecuencias naturales (Sá Caetano, 2007).

$$f_n = \frac{n}{2l} \cdot c = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{H}{m}} \quad (4.1)$$

Siendo las frecuencias naturales función de la longitud entre los anclajes l y la velocidad de propagación de la onda $c = \sqrt{H/m}$, donde H es la tensión del cable y m es la masa por unidad de longitud.

Por tanto, conociendo las frecuencias naturales, la tensión en el cable se puede estimar como:

$$H = 4ml^2 \cdot \frac{f_n^2}{n^2} \quad (4.2)$$

(Casas J. R., 1994) propone un método para evaluar las fuerzas en un cable a partir de una simplificación de la teoría de la cuerda vibrante. Las hipótesis que se asumen en el método son las siguientes.

- El cable tiene una inercia a flexión despreciable, es decir, es perfectamente flexible. Se asume una articulación en los extremos.
- No existe desplazamiento relativo entre los puntos en los que el cable está anclado.
- Las flexiones transversales en el plano de modos simétricos no generan tensiones adicionales (el cable es inextensible).

El método vibratorio presenta problemas a la hora de estimar las fuerzas reales en cables cuando son extremadamente cortos, largos o tienen complejos dispositivos de anclaje. Para superar estos problemas, (Casas J. R., 1994) presenta una metodología que combina las fuerzas que proporciona la teoría de cuerda vibrante con otras técnicas experimentales (galgas extensiométricas, presiómetros en los gatos, etc.). De esta manera, es posible definir las fuerzas reales en los cables. En los estudios realizados por (Casas & Aparicio, 2009) en el Puente del Alamillo, la fuerza en los cables es obtenida mediante esta metodología.

4.2. Medida de las frecuencias de los cables

La medida de las frecuencias de los cables se lleva a cabo mediante acelerómetros situados en una zona cercana al anclaje. De esta forma, se recoge la respuesta temporal del cable ante una excitación externa, como por ejemplo, la vibración ambiental.

De acuerdo con (Sá Caetano, 2007), una buena práctica en cuanto a los parámetros empleados en

las mediciones es emplear series temporales y rangos de frecuencia de muestreo que abarquen un rango correspondiente a las 10 primeras frecuencias naturales del cable. Así, para el caso habitual de cables con la primera frecuencia natural en el rango de 0-2 Hz, se debería emplear un rango de 2-20 Hz en las medidas realizadas.



Figura 4.1. Acelerómetro en un cable del Puente del Alamillo. (Casas & Aparicio, 2009)

Por otra parte, se deben tener en cuenta el máximo error aceptable y las frecuencias naturales del cable. Si se prevee un error en las mediciones del 1% para un cable con una frecuencia natural f_1 , la resolución de las frecuencias debe ser de $0.01 \cdot f_1$. Por tanto, se necesita un registro temporal asociado con una medida de una longitud de $T_1 = 100/f_1$. Teniendo en cuenta otras consideraciones, se puede resumir que la longitud T de los registros temporales debe ser (Sá Caetano, 2007):

$$T = \frac{50 + 50n}{f_1} \quad (4.3)$$

En los casos en los que resulte difícil excitar los cables, también es posible evaluar su respuesta ante la excitación ambiental. En este sentido, se puede destacar el *Ánálisis Modal Operacional (OMA)* como una herramienta para la obtención de las frecuencias naturales y los modos de vibración de los cables. Este tipo de análisis cuenta con la ventaja de que la excitación se produce por las excitaciones ambientales a las que se ve sometida la estructura. Esto supone un aspecto de gran importancia, ya que no es necesario aplicar excitaciones externas adicionales, por lo que se trata de un análisis práctico y económico.

4.3. Estimación del amortiguamiento de los cables

La forma más habitual de estimar el ratio de amortiguamiento de un cable consiste en medir la respuesta en vibración libre después de someter el cable a una excitación que tenga una frecuencia

similar al modo de interés. Esto se puede realizar de forma relativamente sencilla, mediante el empleo de cuerdas o plataformas elevadoras, con el objeto de introducir manualmente una excitación a una altura de 10-15 metros desde el anclaje.

Una vez que se interrumpe la excitación, se puede evaluar el decremento logarítmico de la señal, lo que supone una medida directa del amortiguamiento del cable.

Este tipo de mediciones se hace más complicada cuando ya existe un amortiguador instalado en el cable, ya que existe una mayor dificultad para excitar el cable desde una altura cercana a la zona de anclaje. En estos casos, se deben usar martillos, no pudiendo realizarse la excitación de la estructura manualmente.



Figura 4.2. Excitación de un cable del Puente del Alamillo. (Casas & Aparicio, 2009)

4.4. Reporte de casos

Las medidas de evaluación experimentales que se han presentado en los puntos anteriores, suponen una herramienta de gran valor a la hora de evaluar y buscar soluciones en los casos en los que la estructura presenta problemas en su etapa de servicio. Los fenómenos vibratorios en cables suponen un problema relativamente moderno, ya que ha sido la expansión de las estructuras atirantadas la que ha traído aparejada esta problemática. Esto ha provocado que numerosos puentes atirantados se hayan proyectado y construido sin realizar estudios sobre la posibilidad de que se produzcan

vibraciones en los cables. A esto hay que unir la dificultad existente en la caracterización de las acciones dinámicas a las que se ven sometidas las estructuras, como es el caso del viento.

Por tanto, existen numerosos puentes construidos en los años 80 y 90, que han sido objeto de reparaciones años más tarde por motivos de vibraciones en los cables. A continuación, se presentan algunos casos de reparaciones, así como otros en los que se han instalado sistemas amortiguadores desde su construcción, como es el caso del Puente de la Constitución (Cádiz).

4.4.1. Puente Real (Badajoz)

El Puente Real está situado en Badajoz, sobre el río Guadiana. Se trata de un puente atirantado asimétrico con un vano principal de 136 metros, seguido de vanos de transición de 88 y 36 metros, junto a un viaducto de aproximación formado por seis vanos de 32 m. El tablero se trata de un cajón de hormigón pretensado con una anchura total de 23 m. El puente tiene un total de 28 tirantes, dispuestos en semi-abanico a lo largo del eje longitudinal del puente.

En el año 1995 se observaron importantes vibraciones que provocaron daños en los tubos antivandálicos. Además, se vio afectado el confort debido principalmente a la alarma social debida a los movimientos de los cables. En algún periodo temporal ha sido necesario cerrar el tráfico debido a las fuertes oscilaciones que sufrían los tirantes.



Figura 4.3. Puente Real (Badajoz). (WordPress, 2017)

Se detectaron dos mecanismos vibratorios diferentes: vibraciones producidas por lluvia-viento y

excitación paramétrica.

El primero mecanismo se asocia al primer modo de vibración, ocurriendo durante periodos en los que se combinan lluvia y viento y afectando a un grupo de varios cables. Las amplitudes máximas producidas por este fenómeno están en el entorno de 0.40 m. En cuanto al segundo mecanismo, se produjo en un solo cable, asociándose estas oscilaciones a la interacción dinámica con el tablero.

Como medida de mitigación, se instalaron amortiguadores de fricción en todos los cables, no habiéndose observado nuevos episodios oscilatorios desde entonces.

4.4.2. Puente de Andalucía (Córdoba)

El Puente de Andalucía, en Córdoba, es otro caso en el que se han producido fenómenos vibratorios en los tirantes. Este Puente, se sitúa sobre el río Guadalquivir y cuenta con dos vanos principales de 114 y 96 metros de luz. El tablero tiene una anchura de 29 metros, con una sección transversal de 2.3 metros de canto, consistente en un cajón de fondo curvo y costillas transversales.

El sistema de atirantamiento es de tipo “pretensado extradorsal”, un sistema estructural intermedio entre el puente atirantado y el puente con pretensado exterior. Esto implica cables de menor longitud, mediante el empleo de una torre de menor altura que en el caso de los puentes atirantados habituales (Manterola, Martínez, & Muñoz-Rojas).



Figura 4.4. Puente de Andalucía (Córdoba). (PuenteMania, 2011)

El Puente de Andalucía ha sufrido varios episodios de oscilaciones en los cables debido a la acción del viento durante algunos temporales, llegando incluso a ser cerrado al tráfico por estos problemas.

4.4.3. Puente del Alamillo (Sevilla)

El caso del Puente del Alamillo es uno de los más destacables de los existentes en España, por su singularidad y envergadura. Los tirantes de este puente han sufrido en numerosas ocasiones vibraciones debido a la combinación de lluvia y viento y a la acción aislada del viento. Para mitigar estos problemas, se han realizado diversos estudios técnicos, habiéndose optado por la instalación de amortiguadores en los cables más largos. Las características de la estructura, así como los fenómenos vibratorios y otros datos se presentan detalladamente en el apartado 5.

4.4.4. Puente de la Constitución de 1812 (Cádiz)

El Puente de la Constitución de 1812 es un puente de tipo atirantado, situado sobre la Bahía de Cádiz. El tramo atirantado tiene una longitud de 1180 m, con un vano central de 540 m, lo que supone récord en España y tercer vano más grande de Europa dentro de su clase (Sanchez, Trotin, & Ladret, 2016).



Figura 4.5. Puente de la Constitución de 1812. (CFCSL, 2015)

Para mitigar las posibles vibraciones en los tirantes, se ha empleado un sistema de amortiguadores hidráulicos y radiales internos. Para evitar las vibraciones producidas por la acción conjunta de lluvia y viento, los tirantes se encuentran alojados dentro de una vaina con doble hélice que perturba el flujo de agua a lo largo del cable.

En cuanto a los amortiguadores empleados, son IHD e IRD (Freyssinet, 2008). Los de tipo IHD se recomiendan para tirantes con una longitud inferior a 150 m, mientras que los IRD se utilizan hasta longitudes de 300 m.



Figura 4.6. Amortiguadores durante el proceso de construcción. (Sanchez, Trotin, & Ladret, 2016)

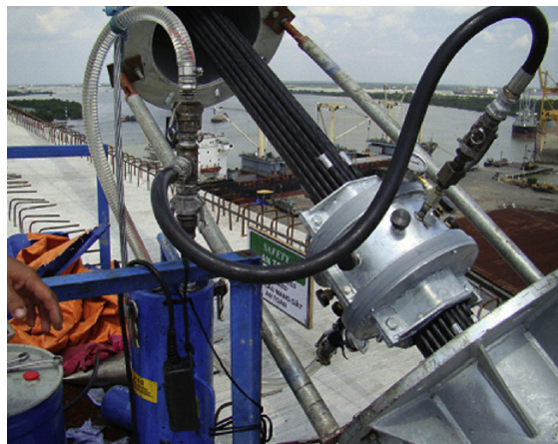


Figura 4.7. Montaje de amortiguador en el Puente de la Constitución de 1812. (Sanchez, Trotin, & Ladret, 2016)

5 APLICACIÓN PRÁCTICA: PUENTE DEL ALAMILLO

Después de haber realizado en los capítulos anteriores un recorrido teórico por los fenómenos de generación de vibraciones, las limitaciones de amplitud recogidas en la normativa y los métodos de control, se pretende en este apartado, realizar una serie de análisis numéricos, con el fin de evaluar la eficacia de los diferentes sistemas amortiguadores. Para ello, se toman los datos del Puente del Alamillo, ya que en esta estructura se detectaron problemas de vibraciones en los cables, debiendo instalarse amortiguadores para mitigar las oscilaciones.

Las acciones contempladas en los análisis son la de la acción turbulenta del viento y la de desprendimiento de vórtices. En primer lugar, se realiza una simulación numérica, con el fin de obtener el comportamiento de los cables ante estas dos acciones. También se abordará el diseño de los sistemas amortiguadores necesarios para reducir la amplitud de las oscilaciones en los cables, con el fin de cumplir los requisitos establecidos en las diferentes recomendaciones y en la bibliografía. Este análisis se realizará para varios tipos de amortiguadores, con el objetivo de realizar un estudio comparativo y evaluar la eficiencia de cada uno de ellos.

El diseño de los amortiguadores se aborda desde el enfoque del *diseño basado en el rendimiento*, a partir del que se estimarán los parámetros óptimos de los amortiguadores mediante el uso de algoritmos genéticos.

5.1. Vibraciones detectadas en los cables del Puente del Alamillo

Para el estudio que se pretende llevar a cabo, se han tomado como base las características mecánicas y geométricas de los cables de un puente real, el Puente del Alamillo, en Sevilla. En los cables más largos de este puente se reportaron problemas de vibraciones producidas por la acción conjunta de lluvia y viento, registrándose desplazamientos máximos de 0.5 m. Esto causó importantes problemas sobre el confort de los usuarios, por lo que se realizaron diversos test con el fin de tomar las medidas de mitigación necesarias (Casas & Aparicio, 2009).

5.1.1. Características de la estructura

El Puente del Alamillo se trata de una estructura atirantada, situada sobre el río Guadalquivir y construida con motivo de la Expo '92 en Sevilla. El tramo atirantado tiene una luz de 200 m, caracterizándose por la ausencia de tirantes de retenida que compensen las solicitaciones de los tirantes. El balance de fuerzas se consigue mediante la inclinación del pilono, que forma un ángulo de 32° con la vertical (Aparicio & Casas, 1997).

El tablero está compuesto de un cajón metálico con forma hexagonal, con un canto de 4.40 m. Este tablero se conecta al pilono mediante 13 pares de tirantes paralelos (un par cada 12 m), consistente cada uno en 60 cordones de 15.24 mm de diámetro, excepto el último par, que tiene una longitud de 292 m y se compone de 45 cables de 15.24 mm de diámetro.

La masa por unidad de longitud es 77 kg/m para los cables 1 a 12 y 60 kg/m para cables 13 y tienen un diámetro exterior $D=0.2$ m. (La izquierda y derecha de los cables se miden según el sentido de un peatón caminando por el puente en dirección al pilono).

La altura total del pilono respecto a la base peatonal (7 m) es de 134.25 m.



Figura 5.1. Vista del Puente del Alamillo (Aparicio & Casas, 1997)

5.1.2. Problemas de vibraciones en los cables

Después de años en servicio, se observaron vibraciones en los cables más largos (del 9 al 13) durante periodos lluviosos con velocidades de viento entre 15 y 20 m/s. Estas vibraciones se observaban en el segundo modo de vibración en el caso de los cables más largos, causando problemas de confort a los peatones. Además de la afección al confort, estas oscilaciones también

pueden producir problemas de fatiga a largo plazo en elementos como los anclajes.

(FIB, 2003) y (CEN, 2006) recomiendan un porcentaje de amortiguamiento crítico mayor que el 0.5% (decremento logarítmico superior a 0.03) en cables mayores de 80 m para evitar las vibraciones inducidas por lluvia-viento. En los test dinámicos realizados, la mayoría de los cables del Alamillo no cumplía esta condición de amortiguamiento.

En particular, el cable más problemático es el número 13 (el de mayor longitud), debido a su baja masa y bajo amortiguamiento. En este cable también se han observado vibraciones para velocidades de viento bajas, a diferencia del resto de cables, que han sufrido vibraciones solo cuando también había presencia de lluvia.

5.1.3. Ensayos realizados y medidas de mitigación empleadas

Se realizaron diversos test dinámicos en 1992 y posteriormente en el año 2004. Las frecuencias naturales de los cables se recogen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Frecuencias naturales (Hz) de los cables obtenidas en los test dinámicos en 1992 y 2004 (Casas & Aparicio, 2009).

Cable	f (derecha 1992)	f (derecha 2004)	f (izquierda 1992)	f (izquierda 2004)
1	2.276	2.189	2.195	2.317
2	1.722	1.704	1.702	1.755
3	1.429	1.433	1.430	1.453
4	1.119	1.141	1.123	1.133
5	0.965	0.995	0.981	0.975
6	0.849	0.862	0.854	0.859
7	0.761	0.777	0.775	0.759
8	0.685	0.692	0.693	0.684
9	0.619	0.621	0.624	0.622
10	0.555	0.550	0.553	0.535
11	0.501	0.492	0.507	0.489
12	0.452	0.445	0.453	0.435
13	0.501	0.482	0.498	0.489

También se estimó la fuerza en los cables en los dos momentos, resultando los valores que se muestran en la Tabla 5.2. Puede observarse que los cables más largos tienen una carga menor doce años después, mientras que los más cortos soportan una carga mayor. Esto se asocia a una redistribución interna de las fuerzas entre los cables, posiblemente causada por la fluencia del

hormigón en la torre (Casas & Aparicio, 2009).

Tabla 5.2. Fuerzas en los cables (kN) en 1992 y en 2004 (Casas & Aparicio, 2009).

Cables	Fuerza (1992)	Fuerza (2004)
1	5778	5833
2	5847	5973
3	6112	6228
4	5307	5461
5	5405	5537
6	5082	5189
7	5239	5249
8	5121	5101
9	5013	5018
10	4640	4447
11	4562	4309
12	4199	3964
13	4365	4127
Total	66680	66436

Finalmente, se instalaron amortiguadores externos en el año 2007 para aumentar el amortiguamiento de los cables y se realizaron nuevos test dinámicos en febrero de 2008 para verificar el nivel de amortiguamiento alcanzado tras la instalación de los “dampers”.

En la Tabla 5.3 se muestran los valores de amortiguamiento estimados antes y después de la instalación de los amortiguadores.

Tabla 5.3. Porcentaje de amortiguamiento crítico y aceleraciones en los cables en 2004 y 2008 (Casas & Aparicio, 2009).

Cable	Sin amortiguadores (2004)				Con amortiguadores (2008)			
	ζ_1	ζ_2	ζ_3	A	ζ_1	ζ_2	ζ_3	A
	(%)	(%)	(%)	(m/s ²)	(%)	(%)	(%)	(m/s ²)
5L	-	0.43	-	2.10	-	0.56	-	0.70
5R	-	-	-	-	0.70	0.64	0.49	1.20
6L	-	-	-	-	0.99	1.00	0.64	1.90
6R	-	-	-	-	-	0.37	-	0.50
7L	-	0.19	0.19	6.00	0.64	0.65	0.43	1.00

7R	-	-	-	-	-	-	-	*
8L	-	-	-	-	-	-	0.51	0.90
8R	-	0.49	0.18	5.00	-	-	0.59	1.00
9L	-	0.32	0.16	1.00	-	0.56	-	1.00
9R	-	-	-	-	-	-	-	*
10L	-	-	0.21	4.00	-	0.48	-	0.30
10R	-	-	-	-	-	0.65	-	0.50
11L	-	-	-	-	-	0.57	-	0.80
11R	-	-	-	-	-	-	-	*
12L	-	-	-	-	-	0.57	0.51	0.70
12R	-	-	-	-	-	0.51	0.21	1.00
13L	-	-	-	-	-	0.91	0.38	1.00
13R	-	0.16	0.05	4.00	-	1.19	0.33	1.00

* Señal no adecuada para el análisis, R=derecha, L=izquierda

5.2. Modelización del problema

Debido a que el cable número 13 del Puente del Alamillo es el más susceptible a las acciones del viento, se realizarán análisis numéricos con el fin de evaluar su comportamiento ante la acción turbulenta del viento. Además, se estudiará el comportamiento del cable número 1 frente a las acciones de desprendimiento de vórtices, debido a que presenta unas frecuencias de vibración que pueden propiciar la aparición de este fenómeno.

Para ello, se realiza un modelo de elementos finitos, incluyendo las características geométricas y mecánicas del cable.

En este apartado, se explica y justifica detalladamente el modelo adoptado, basándose en las posibilidades que ofrecen los programas de cálculo en la actualidad, así como las distintas recomendaciones y experiencias aportadas en las referencias y normativas.

5.2.1. Software empleado

Se ha realizado un modelo de elementos finitos con el software ANSYS v15, en concreto, se ha utilizado el lenguaje MAPDL (Mechanical Ansys Parametric Design Language). De esta forma ha sido posible parametrizar los datos de entrada del modelo: geometría, propiedades de los amortiguadores, ubicación del amortiguador, etc.

ANSYS incorpora una amplia gama de elementos que permiten la modelización de los elementos amortiguadores. Esto permite modelizar de forma sencilla y aproximada los diferentes tipos de amortiguadores, mediante el empleo de los elementos de tipo "COMBIN".

Se ha utilizado MATLAB para la obtención de las fuerzas producidas por la componente turbulenta del viento y las producidas por el fenómeno de desprendimiento de vórtices a partir de las velocidades de viento. Estas últimas han sido generadas mediante el empleo de los simuladores NOWS (NatHaz On-line Wind Simulator) (Kwon & Kareem, 2006) y VOWS (Vortex Winds) (Kwon, Carassale, & Kareem, 2011).

Para estimar los parámetros de los amortiguadores, se han empleado las herramientas de optimización incluidas en MATLAB. De esta forma, se realiza un proceso iterativo, en el que se calculan los parámetros idóneos de los amortiguadores mediante algoritmos genéticos. El algoritmo estima los valores de los parámetros y calcula en ANSYS los resultados de las variables para esos valores. En diversas iteraciones se van comparando las soluciones, hasta que se encuentran los parámetros óptimos.

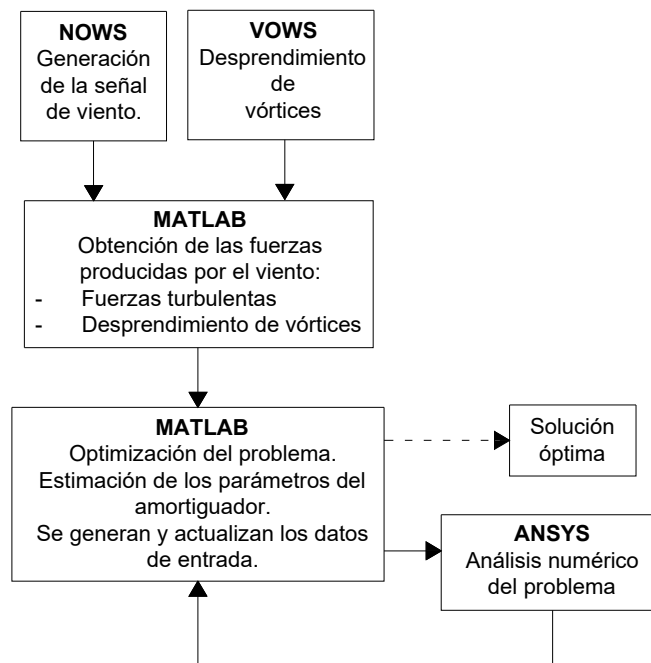


Figura 5.2. Esquema del proceso de cálculo

5.2.2. Modelo del cable

El modelo del cable es un aspecto que presenta cierta variabilidad en los estudios que se aportan en las referencias para la evaluación del efecto de un amortiguador externo. Como se vió en el apartado de diseño de los amortiguadores, numerosos autores han desarrollado modelos que tienen en cuenta cables totalmente rectos, otros han estudiado el efecto de la curvatura o la incidencia de tener en cuenta o no la inercia de los tirantes.

(Mehrabani & Tabatabai, 1998) incluyeron la curvatura del cable y la rigidez a flexión en la formulación del problema, presentando una solución para el sistema cable-amortiguador a partir del método de

las diferencias finitas. Para llevar a cabo la evaluación de estos efectos, emplearon propiedades reales de cables de puentes incluidos en una base de datos. Los resultados muestran que mientras el efecto de la curvatura no es significativo en la mayoría de los cables, ignorar la rigidez a flexión del cable puede producir una distorsión del comportamiento dinámico. La importancia de estos parámetros también ha sido estudiada por otros autores como (Krenk & Nielsen, 2002), (Krenk & Hogsberg, 2005), y más recientemente en los estudios analíticos realizados por (Hoang & Fujino, 2007). Los análisis realizados por (Cheng, Darivandi, & Ghrib, 2010) incluyen igualmente el efecto de la inercia a flexión.

Las simulaciones numéricas realizadas por (FHWA, 2014) también incluyen la inercia a flexión del cable, mediante un modelo con elementos tipo viga, en el que se incluye la inercia. (Pozos-Estrada, Flores, & Gómez, 2016) realizan una serie de simulaciones numéricas para evaluar la eficacia de un amortiguador externo ante la acción del viento, empleando para ello el elemento BEAM4 de ANSYS, que incluye capacidad a flexión.

En el presente trabajo, se realiza un modelo teniendo en cuenta la rigidez a flexión del cable que, aun siendo pequeña por las características propias de este tipo de elemento, se incluye en los análisis realizados.

Por tanto, para la modelización del cable se empleará el elemento BEAM4 de ANSYS. Este es un elemento de tipo uniaxial, con 6 grados de libertad en cada nodo: tres desplazamientos y tres giros. Además, permite grandes deflexiones y el efecto de rigidización por la tensión. Este último efecto es de gran relevancia en los tirantes, pues la tensión interna que soportan condiciona su comportamiento dinámico.

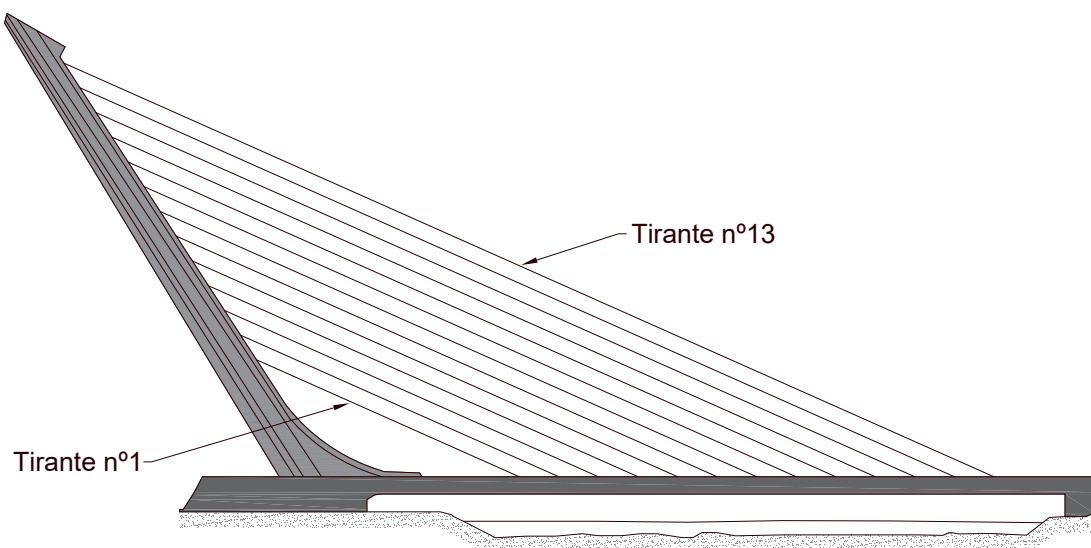


Figura 5.3. Esquema del puente del Alamillo

Las características de los tirantes se muestran en la tabla Tabla 5.4:

Tabla 5.4. Características de los tirantes empleados en los análisis

Características	Tirante número 1	Tirante número 13
Longitud (m)	59	292
Nº cordones	60	45
Área total efectiva (m ²)	0.0112	$8.38 \cdot 10^{-3}$
Masa por unidad de longitud (kg/m)	77	60
Fuerza en el cable (kN)	5833	4127
Módulo de elasticidad, E (MPa)	160000	160000
Diámetro exterior (m)	0.20	0.20

El tirante se ha discretizado en 100 elementos de igual longitud cada uno de ellos.

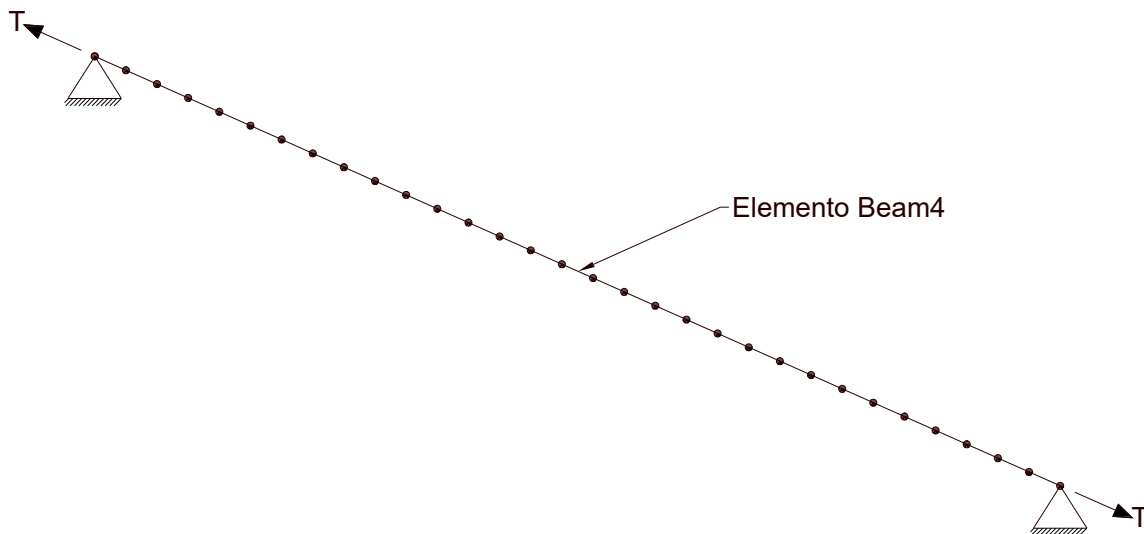


Figura 5.4. Esquema del modelo de cable empleado en los análisis

Para incluir el efecto de la tensión inicial en el cable se ha aplicado una deformación en la dirección axial del mismo, que produce una tensión equivalente a la que está sometido.

5.2.3. Modelo de los amortiguadores

La modelización numérica de los amortiguadores se ha realizado con elementos tipo COMBIN de ANSYS. Para cada tipo de amortiguador se ha utilizado el elemento cuyas características se ajustan con mayor precisión al comportamiento mecánico real.

Los amortiguadores se ubican a una cierta distancia (3%) del anclaje inferior, situándose de forma transversal al cable. Los elementos empleados para cada tipo de amortiguador se resumen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Elementos utilizados para la modelización de los amortiguadores.

Amortiguador	Tipo de elemento en ANSYS
Viscoso	COMBIN14
Fricción	COMBIN40
Elastomérico	COMBIN14

A continuación, se explica detalladamente el proceso de modelización de cada amortiguador, justificando las simplificaciones adoptadas y el uso de cada tipo de elemento.

5.2.3.1. Modelo del amortiguador viscoso.

Los amortiguadores viscosos se caracterizan fundamentalmente por la constante c de amortiguamiento. El elemento COMBIN14 de ANSYS incluye también un elemento tipo muelle (caracterizado por una constante k). Diversos autores recomiendan incluir un cierto grado de rigidez en los amortiguadores viscosos, pues el hecho de considerar un comportamiento totalmente viscoso no representa con total precisión la realidad. El efecto de considerar la rigidez de los amortiguadores fue estudiado por (Krenk & Hogsberg, 2005), llegando a la conclusión de que la consecuencia de la flexibilidad del amortiguador era una pérdida de eficiencia. La mínima rigidez (k) necesaria para que no se produzca una pérdida de eficiencia mayor del 5% se puede obtener como:

$$k \approx 0.053H/x_c \quad (5.1)$$

Siendo H la fuerza en el cable y x_c la distancia desde el amortiguador al anclaje.

En este estudio no se incluye el efecto de la rigidez del amortiguador, es decir, se prescindirá de la componente elástica aportada por el muelle, ya que, a pesar de tener cierta incidencia, no se considera relevante en el estudio comparativo que se pretende realizar entre los tres tipos de amortiguadores estudiados. Como se verá más adelante, la componente elástica sí jugará un papel fundamental en el modelo del amortiguador elastomérico.

Por tanto, el elemento utilizado es el COMBIN14, tomando una constante k igual a cero.

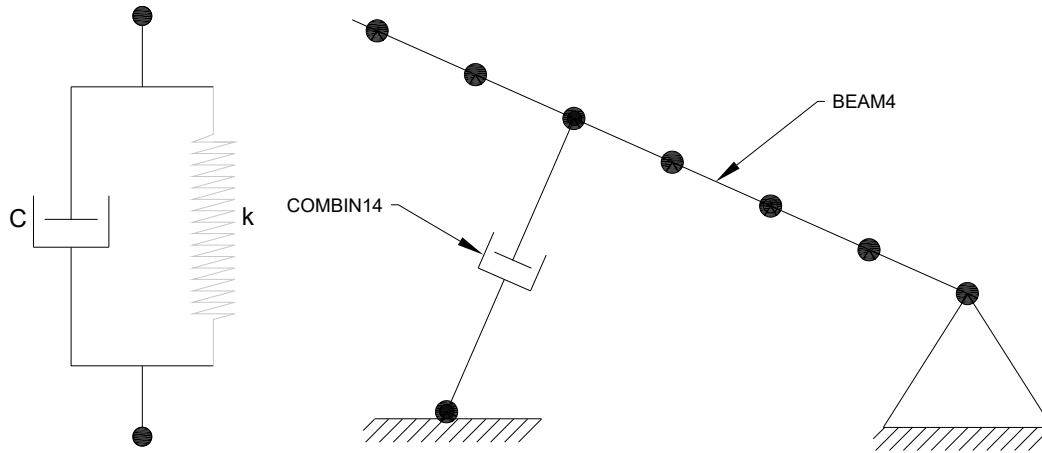


Figura 5.5. Esquema del elemento COMBIN14 y detalle de la ubicación del amortiguador

Para comprobar el modelo realizado del amortiguador viscoso, se ha realizado una simulación en ANSYS, sometiendo el elemento anterior a una carga cíclica. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.6.

La carga utilizada es del tipo:

$$F(t) = A \cos(\omega t) \quad (5.2)$$

Siendo A la amplitud y ω la frecuencia.

La curva fuerza-desplazamientos obtenida es:

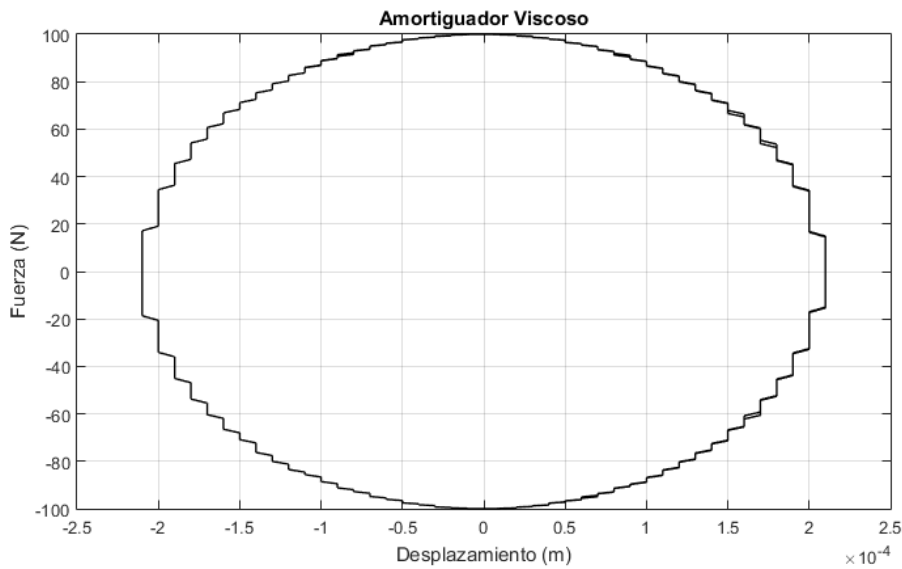


Figura 5.6. Gráfica fuerza-desplazamiento de un elemento COMBIN14 sometido a una carga cíclica

Se puede comprobar que los resultados concuerdan con el comportamiento teórico enunciado en apartados anteriores. En relación a la inclusión de una constante k en el amortiguador, se han realizado varios análisis, llegando a la conclusión de que, para valores pequeños de dicha constante,

el comportamiento viscoso apenas se ve modificado. De esta forma, se pone de manifiesto que sería posible incluir la rigidez asociada a los dispositivos amortiguadores sin perder el comportamiento del amortiguador viscoso que se pretende simular.

5.2.3.2. Modelo del amortiguador de fricción.

Los amortiguadores de fricción se caracterizan porque la disipación de energía se consigue mediante un movimiento friccionante entre dos partes. En un primer momento, cuando el cable presenta pequeñas vibraciones, la fuerza ejercida sobre el amortiguador no es suficiente para que se produzca el deslizamiento entre las partes. Por tanto, existe una fuerza mínima que debe ser superada para que el amortiguador comience a disipar energía.

El modelo se realiza con el elemento COMBIN40, que contiene un muelle con un “deslizador”, lo que permite simular el comportamiento real de este sistema.

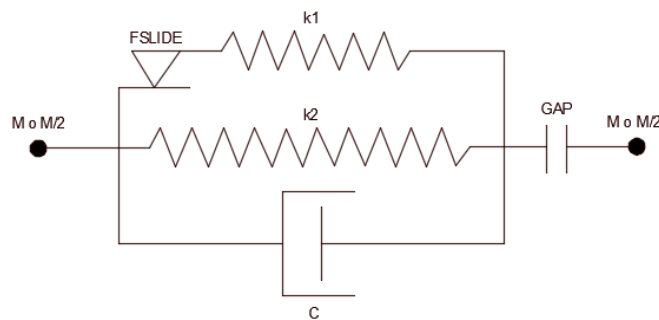


Figura 5.7. Esquema del elemento COMBIN40

En la Figura 5.7 se muestran los elementos que componen el COMBIN40. FSLIDE representa la fuerza necesaria para que comience el deslizamiento. El elemento también permite incluir un GAP y masas concentradas en los nodos (M o M/2), que no se utilizarán en este trabajo. También se suprime el muelle k2, quedando finalmente los siguientes elementos: FSLIDE, k1, C.

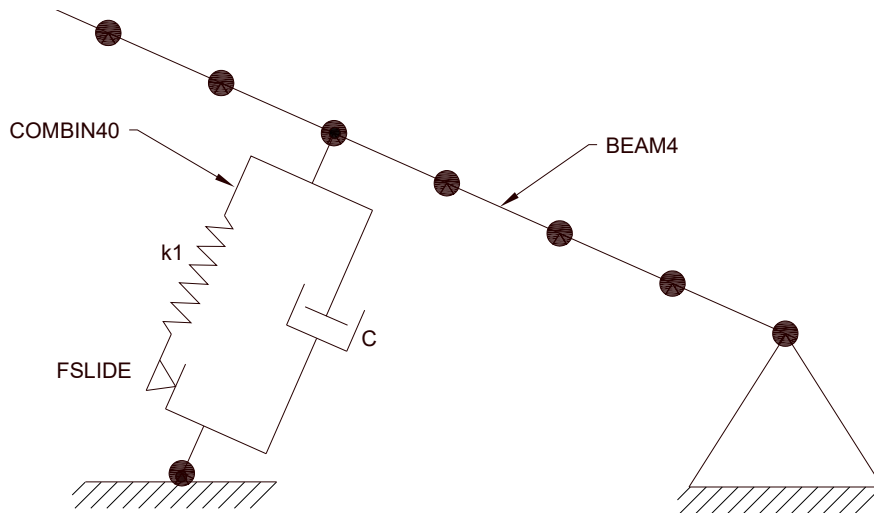


Figura 5.8. Esquema de ubicación del amortiguador de fricción

5.2.3.3. Modelo del amortiguador elastomérico.

Los amortiguadores de tipo elastomérico disipan energía mediante deformación cuando se someten a esfuerzos cortantes. Cuando se producen vibraciones en los cables, la curva tensión-deformación del amortiguador es una curva de histéresis. Para modelizar este comportamiento en ANSYS, se ha recurrido de nuevo al elemento COMBIN14.

Desde el punto de vista teórico, un amortiguador de goma o elastomérico tiene un comportamiento de amortiguador viscoelástico, que se puede caracterizar por una componente viscosa y una componente elástica. Por tanto, se utilizará el elemento COMBIN14, incluyendo ahora también el muelle como una parte fundamental del modelo. Se tienen dos elementos, representados por dos constantes: c y k .

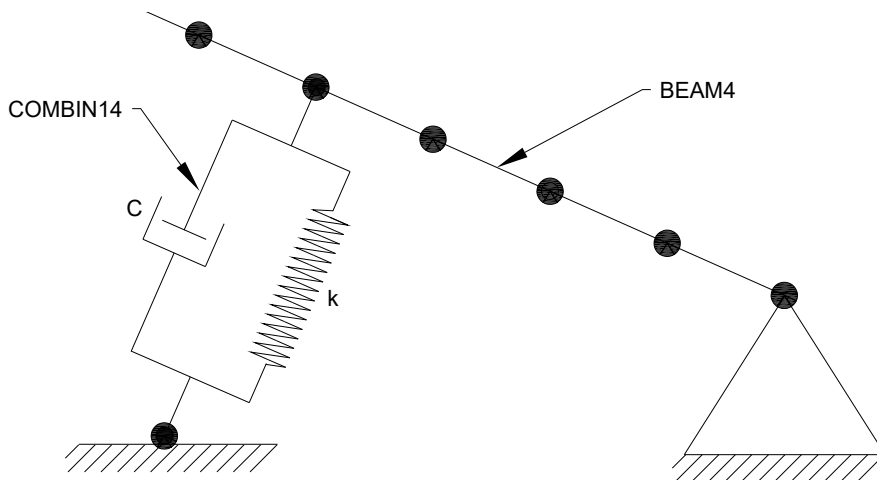


Figura 5.9. Detalle de ubicación del amortiguador de tipo elastomérico

Si suponemos un amortiguador con “comportamiento inicial” de tipo viscoso y sometido a una carga

armónica, se tiene que al añadir un muelle y conforme aumenta su constante k , se produce una “inclinación” de la curva tensión-deformación.

De nuevo se ha realizado una simulación en ANSYS con el fin de corroborar el modelo del amortiguador. La curva fuerza-desplazamiento obtenida se muestra en la Figura 5.10, que como se puede observar, concuerda con los planteamientos teóricos.

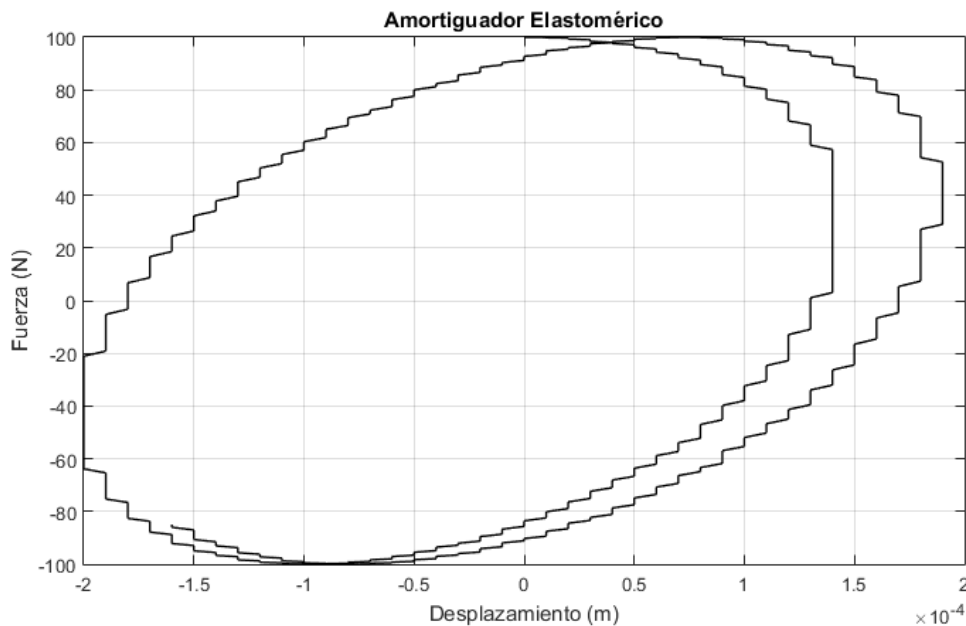


Figura 5.10. Curva fuerza-desplazamiento del amortiguador de elastomérico sometido a una carga armónica

Otra opción, más compleja, para modelizar el amortiguador viscoelástico podría ser empleando el elemento COMBIN39. Esta opción puede ser interesante en el caso de disponer de curvas tensión-deformación experimentales, de forma que se podrían ajustar los parámetros del modelo para representar con mayor exactitud el amortiguador.

El COMBIN39 se trata de un elemento tipo amortiguador no lineal, que permite definir la curva tensión-deformación. Esto se hace introduciendo una serie de puntos caracterizados cada uno por una fuerza y un desplazamiento. Además, mediante “Keyoptions”, se puede definir la descarga por una rama paralela a la de carga, por lo que se puede simular la curva de histéresis.

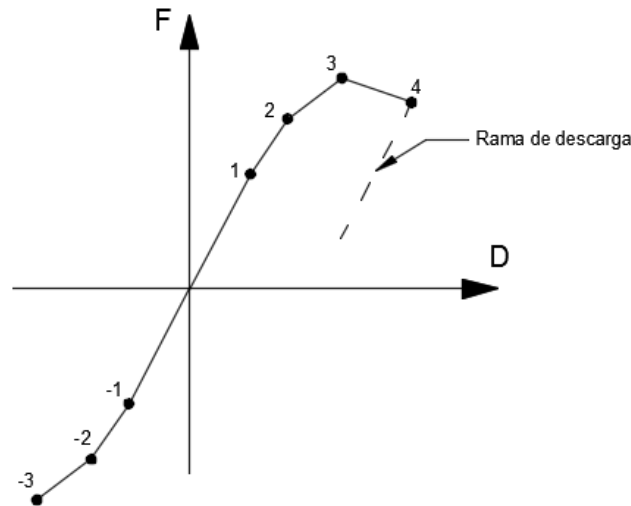


Figura 5.11. Curva F-D del elemento COMBIN39

De esta forma, definiendo los puntos necesarios $P_n(D_n, F_n)$ se aproxima la curva de histéresis del amortiguador elastomérico.

En este trabajo, se utilizará el COMBIN14, pues la metodología encaja mejor con el planteamiento del diseño y optimización que se pretende realizar.

5.2.4. Acciones de viento

Las acciones asociadas al viento y a la combinación de este con la lluvia (*rain-wind induced vibrations*) constituyen uno de los mecanismos más importantes de generación de vibraciones en cables. Son especialmente susceptibles a estos fenómenos los cables que presentan un bajo nivel de amortiguamiento y baja masa. Cuando se unen ambas características, hacen que las vibraciones asociadas a los fenómenos de viento deban ser estudiados con detenimiento.

Existen numerosos mecanismos y condicionantes que contribuyen en la acción del viento sobre los cables, sin embargo, la caracterización de estas acciones a partir de un perfil de velocidades de viento resulta muy difícil sin tener un conocimiento detallado de las condiciones estructurales y aerodinámicas de los cables y el viento involucrado (FHWA, 2014). Por lo tanto, es habitual realizar una aproximación cuasi-estática en la que se ignora la interacción dinámica entre el cable y el flujo de viento.

Un paso fundamental es la generación de la señal de viento, para lo que se pueden emplear diversos métodos, como los métodos de tipo espectral o métodos basados en el filtrado digital de la señal, como el ARMA (autoregresivo y media móvil). En los análisis realizados, se han empleado señales de viento generadas a partir de dos aplicaciones web desarrolladas por el *NatHaz Modeling Laboratory* de la *Universidad de Notre Dame*.

Estas aplicaciones son los simuladores NOWS y VOWS. Se han utilizado señales de viento de 300

segundos, siendo esta duración igual a la empleada en la referencia *Mitigation of Wind-Induced Vibration of Stay Cables: Numerical Simulations and Evaluations*. (FHWA, 2014).

Para cada uno de los dos casos estudiados, se obtienen las dos componentes del viento, velocidad media y velocidad fluctuante, para una serie de alturas en las que se “discretiza” la altura total del cable. En concreto, se ha dividido la altura en 10 zonas, de tal forma que se obtiene una señal de viento en cada una de ellas.

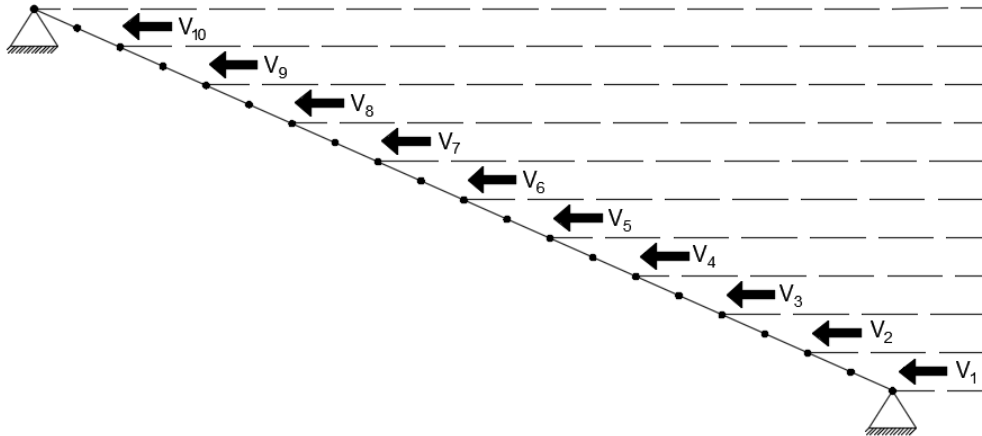


Figura 5.12. Esquema de las alturas en las que se ha obtenido la señal del viento

Posteriormente, se aplican las fuerzas obtenidas en cada zona a los nodos correspondientes del modelo de elementos finitos.

5.2.4.1. Acción turbulenta del viento.

En el caso del cable número 13, se simula el viento en las alturas que se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Alturas en las que se simulan señales de viento. Cable nº 13.

h_1	6.5 m	h_6	71.5 m
h_2	19.5 m	h_7	84.5 m
h_3	32.5 m	h_8	97.5 m
h_4	45.5 m	h_9	110.5 m
h_5	58.5 m	h_{10}	123.5 m

El simulador utilizado para la componente turbulenta del viento es *NOWS (NatHaz On-line Wind Simulator)* (<http://windsim.ce.nd.edu/>) (Kwon & Kareem, 2006) en el que se integran cuatro esquemas espectrales para la simulación de la señal de viento.

La interfaz gráfica del simulador es sencilla, y permite generar las señales de viento a partir de varios

parámetros de entrada. En la siguiente imagen se puede observar dicha interfaz.

Figura 5.13. Interfaz gráfica de NOWS

Entre los datos de entrada, es necesario especificar los puntos en los que se desea simular la señal de viento en una determinada dirección. En nuestro caso, como se ha explicado anteriormente, se ha dividido el cable en 10 alturas, que se corresponden con los puntos en los que se obtiene la señal.

También se deben introducir los datos para indicar la duración total de la señal, así como la categoría de exposición de la estructura (según norma ASCE) y la velocidad $U_{3-s,10}$.

Finalmente, se puede elegir entre los cuatro esquemas de simulación ya mencionados. En este caso, se ha utilizado el esquema de función de frecuencia discreta con descomposición de Cholesky y FFT.

En la siguiente gráfica se muestran las señales de viento generadas en las alturas h_1 , h_5 y h_{10} .

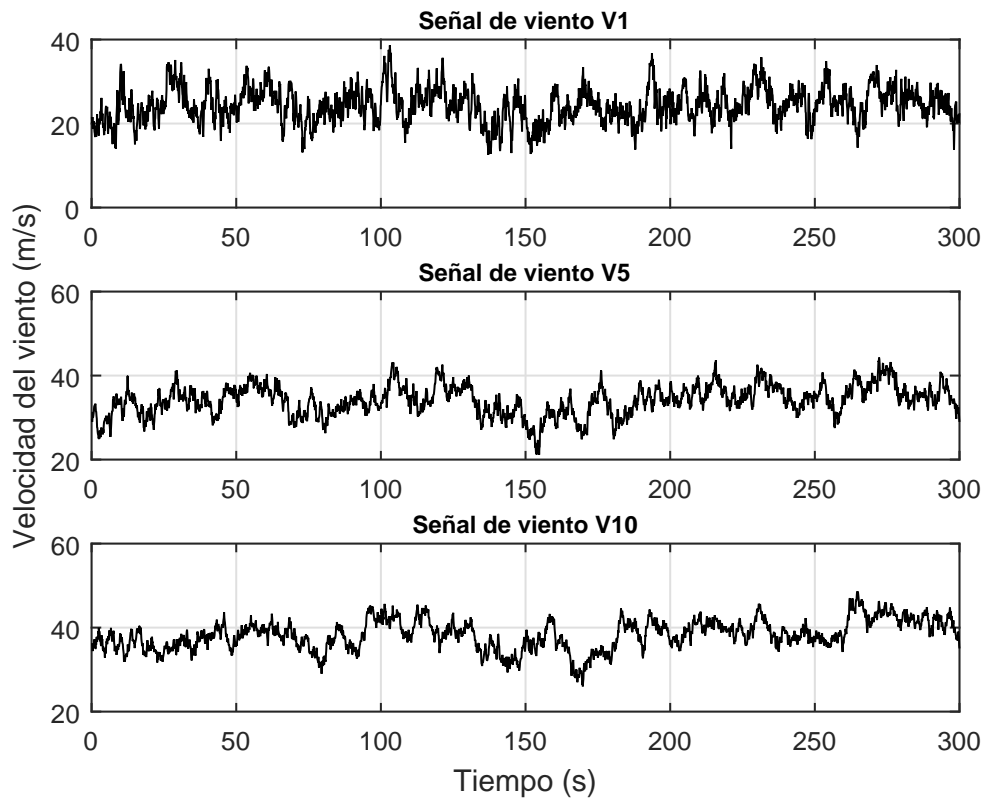


Figura 5.14. Señales de viento generadas a varias alturas

Si obtenemos el espectro de frecuencia-amplitud de la señal, se puede observar que las mayores amplitudes se concentran en frecuencias inferiores a 1 Hz, y especialmente para frecuencias menores de 0.5 Hz, donde aparecen picos importantes.

En el caso de la señal obtenida a mayor altura (V10), esta concentración en las frecuencias más bajas se hace aún más claro, reduciéndose bruscamente las amplitudes a partir de 0.5 Hz.

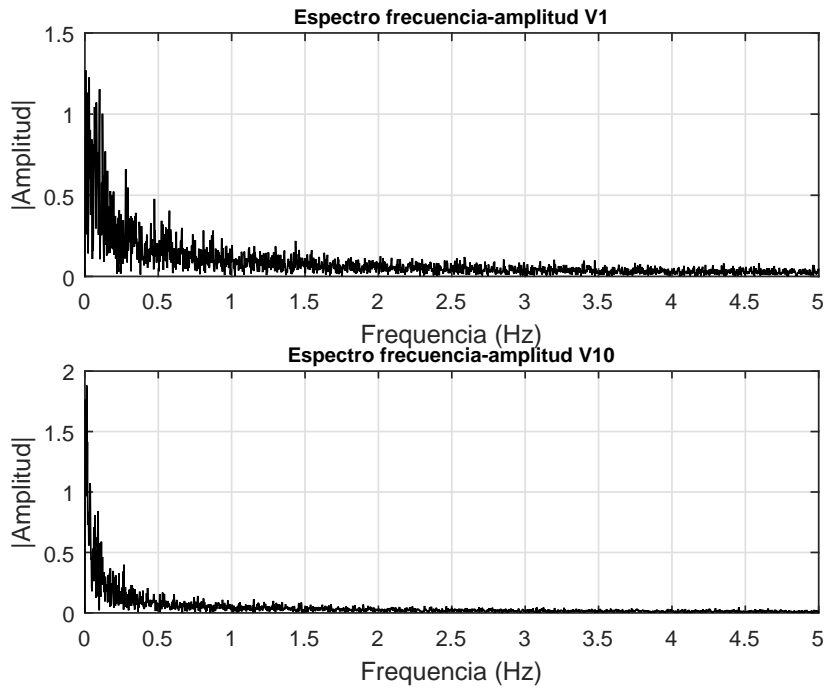


Figura 5.15. Espectro frecuencia-amplitud de las señales generadas

Una vez obtenidas las señales de viento en las diferentes alturas, se calculan las fuerzas de viento turbulento para cada una de ellas. Las fuerzas producidas por la componente turbulenta del viento pueden obtenerse a partir de la siguiente expresión (Kwon & Kareem, 2006):

$$F(t) = \rho \cdot C_D \cdot A \cdot U \cdot u(t) \quad (5.3)$$

Donde, $F(t)$ es la fuerza fluctuante del viento; ρ la densidad del aire; C_D el coeficiente de resistencia; A el área del cable expuesta al viento; U la velocidad media del viento; $u(t)$ la velocidad fluctuante del viento.

Se ha tomado la densidad del aire $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$ y $C_D = 1.2$.

Se obtienen de esta forma 10 vectores de fuerzas, que se aplicarán en los nodos del modelo de elementos finitos.

En la Figura 5.16 se han representado las fuerzas generadas en las alturas h_1 y h_{10} .

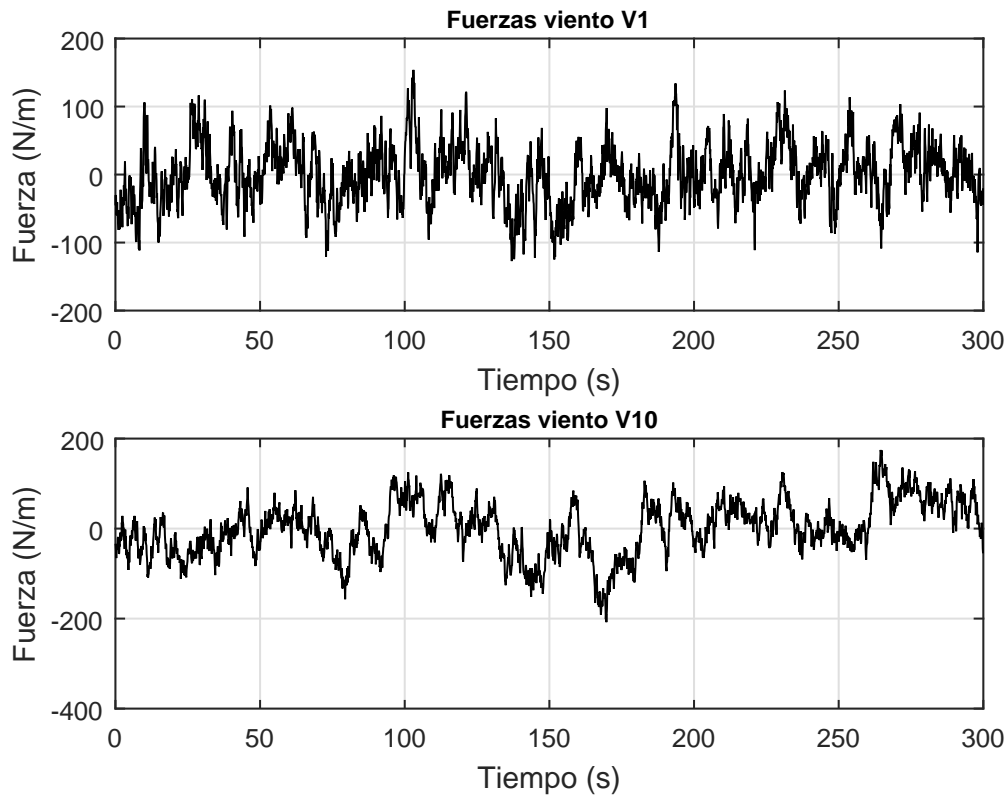


Figura 5.16. Fuerzas generadas a la altura h_5 y h_{10} para la acción turbulenta del viento

5.2.4.2. Desprendimiento de vórtices

El desprendimiento de vórtices se puede considerar un proceso estacionario, gaussiano y aleatorio, en el que la velocidad del viento se compone de la suma de un término de velocidad media y un término variable aleatorio.

La velocidad media varía a lo largo de un eje (por ejemplo, en altura (z)), pudiendo obtenerse su amplitud según varias alternativas. Una de ellas consiste en una variación en z según el siguiente perfil logarítmico (Carassale).

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ para } z > z_{min} \quad (5.4)$$

$$U(z) = U(z_{min}) \text{ para } z \leq z_{min}$$

Donde κ es la constante de Von Karman (se asume igual a 0.4), z_0 es la longitud de rugosidad y u_* es la velocidad de fricción. u_* es un parámetro de escala, mientras que z_0 determina la forma del perfil de velocidades de acuerdo a las características superficiales del terreno.

Algunos valores típicos, se pueden observar en la Tabla 5.7 (Eurocódigo 1. Parte 1-4).

Tabla 5.7. Categorías de terreno definidos en el Eurocódigo 1.


Categoría de terreno		z_0 (m)	z_{min} (m)
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0.003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0.01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0.05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0.3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1.0	10

Al igual que en el caso de viento turbulento, se ha discretizado la altura en diez tramos. Las alturas a las que se han generado las señales de viento se recogen en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Alturas en las que se simulan señales de viento. Cable nº 1.

h_1	2.25	h_6	13.50
h_2	4.50	h_7	15.75
h_3	6.75	h_8	18.00
h_4	9.00	h_9	20.25
h_5	11.25	h_{10}	22.50

El NatHaz (Natural Hazards) Modeling Laboratory ha desarrollado una aplicación para la simulación del desprendimiento de vórtices: VOWS (VORTEX-winds) (Kwon, Carassale, & Kareem, 2011). Por tanto, se hará uso de esta aplicación para realizar la simulación de las señales del fenómeno de desprendimiento de vórtices.



A VIRTUAL ORGANIZATION TO REDUCE THE
TOLL OF EXTREME WINDS ON SOCIETY

**Wind Simulation
User Interface**

Researchers | Document

Please select options and fill out input values in SI units: [m] & [m/s] [On-line Unit Converter]


■ Available input options (place mouse cursor on parameter to see its description)

u_* : z_0 : z coordinates are necessary
 U_{ref} : z_0 : z coordinates are necessary
 V_b : z_0 : Eurocode-based input z coordinates are necessary
 U : Sig : L :

■ Total # of locations and their 3-D coordinates (x,y,z) of the locations for wind simulation
[acceptable coordinate : delimited by comma(,) or MATLAB-compatible, e.g., 4,8,12 or 4:4:12]

Total number of locations :

x :
y :
z :



■ Total number of points in time (Nt), Time step (Δt)
[Note that it is recommended to use Nt as power of 2 (2^x) in order to benefit simulation speed]

Nt (max.=36000) : Δt [sec] :

■ Wind turbulence component (u, v or w)

Wind turbulence component : u v w

Figura 5.17. Interfaz gráfica de VOWS

Al igual que en el caso de la simulación de la acción turbulenta, los datos de entrada son reducidos. Eligiendo la opción de entrada basada en el Eurocódigo, se debe introducir la velocidad básica del viento y el parámetro z_0 .

Los datos de entrada empleados en VOWS son: $U=26$ m/s y $z_0=0.3$.

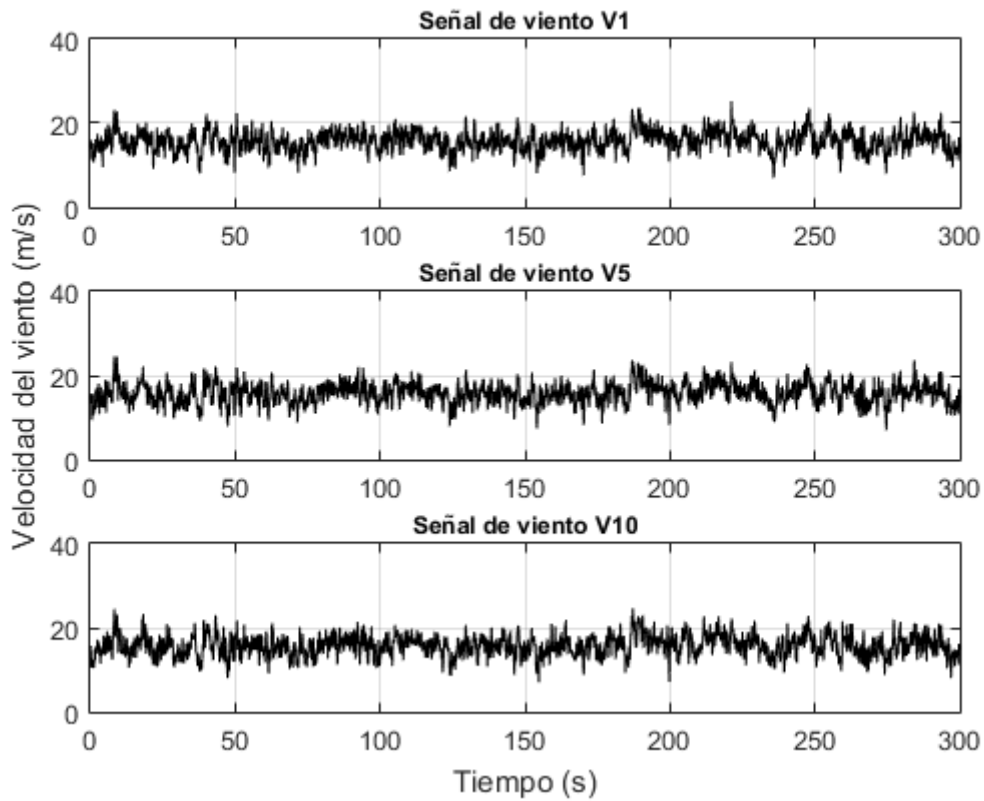


Figura 5.18. Señales de viento generadas para el desprendimiento de vórtices

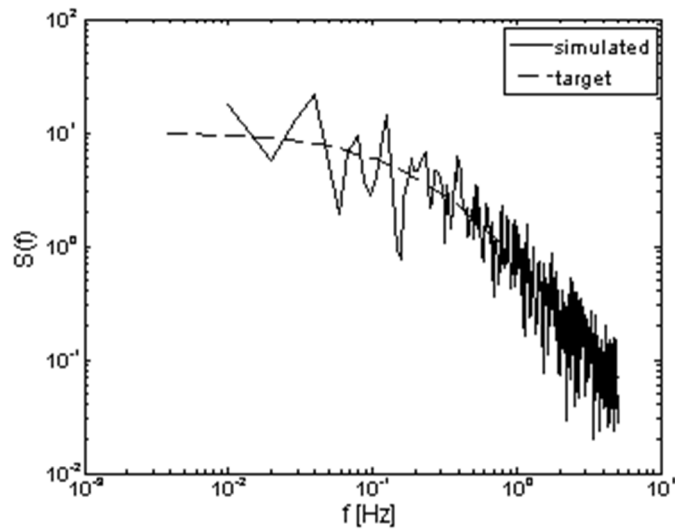


Figura 5.19. Distribución de la función de potencia espectral de la señal

Las fuerzas de desprendimiento de vórtices se obtienen a partir de la señal generada para la simulación de este fenómeno. De esta forma, la acción producida por el desprendimiento de vórtices será:

$$F(t) = \rho \cdot C_L \cdot A \cdot U \cdot u(t) \quad (5.5)$$

El coeficiente C_L depende de la amplitud de la oscilación y del número de Reynolds, pero se puede tomar un valor de $C_L = 0.3$, que se encuentra dentro del orden de magnitud de los casos estudiados en diversos puentes atirantados (FHWA, 2007). El número de Strouhal permanece constante para un amplio rango de velocidades de viento, por lo que, por simplicidad, se considera un valor de 0.2. Por tanto, se obtienen como resultado unas fuerzas actuantes con las siguientes características en cada una de las zonas, como se puede observar en la Figura 5.20.

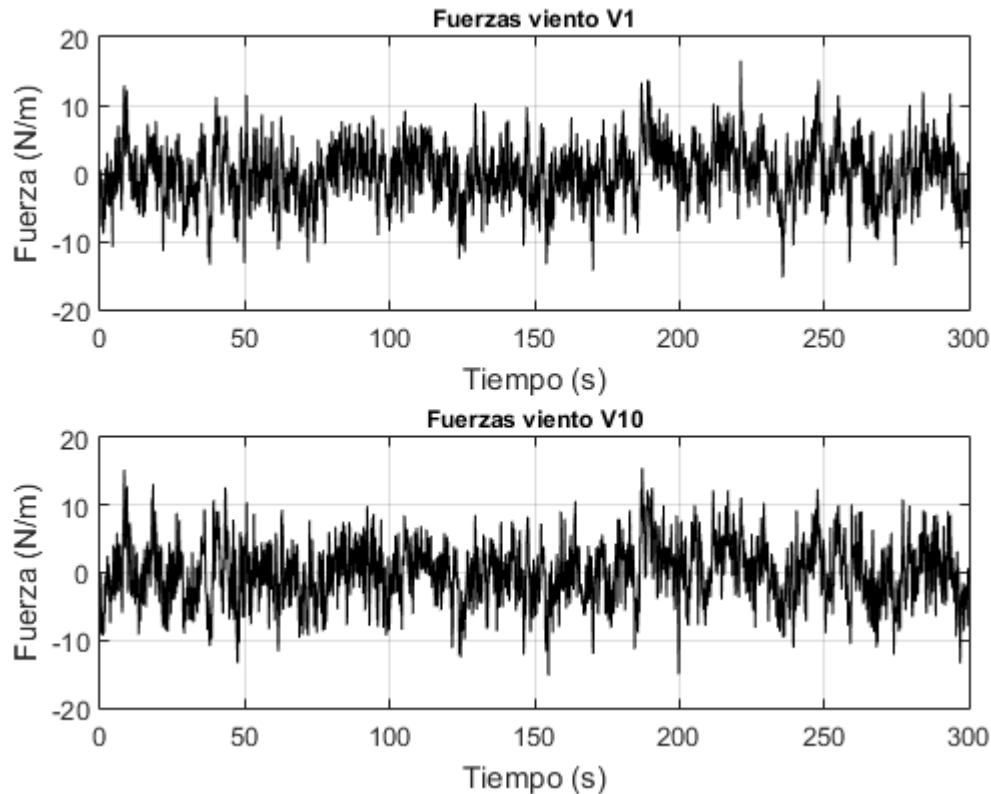


Figura 5.20. Fuerzas generadas a partir de la señal de desprendimiento de vórtices

Otra opción para modelizar las fuerzas de desprendimiento de vórtices de forma simplificada es hacerlo considerándola como una fuerza armónica con una frecuencia igual a la de formación de los vórtices (ω).

$$F(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (5.6)$$

F_0 es la amplitud de la fuerza, obtenida a partir de la velocidad media para cada una de las alturas mediante la siguiente expresión:

$$F_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot U^2 \cdot C_L \quad (5.7)$$

ω se obtiene a partir de:

$$f(h) = S \frac{U(h)}{D} \quad (5.8)$$

Siendo $U(h)$ la velocidad media en cada una de las alturas en las que se ha obtenido la señal de viento.

5.2.5. Características de los análisis

Se han realizado los siguientes análisis en ANSYS para estudiar el comportamiento del cable ante las acciones de viento turbulento y desprendimiento de vórtices:

- Caso de acciones de viento turbulento: se utiliza un análisis transitorio para evaluar la evolución a lo largo del tiempo del cable sometido a las fuerzas turbulentas del viento. Para ello, se ha empleado un tiempo total de análisis $T=300$ s y un paso de tiempo de 0.01 s. Se ha realizado el análisis teniendo en cuenta las no linealidades geométricas en el problema, mediante el comando NLGEOM. De esta forma, se tienen en cuenta los grandes desplazamientos que pueden sufrir los cables ante las cargas de viento. Además, en el análisis no lineal se considera de forma genérica la rigidización por tensión de los cables, tanto por el pretensado inicial como por la deformación axial.
- Caso de desprendimiento de vórtices: debido a la consideración de las cargas de desprendimiento de vórtices como cargas “cíclicas”, se podría esperar de igual forma una respuesta cíclica de la estructura. Sin embargo, esta idea lleva aparejada una consideración lineal del problema que no se corresponde al comportamiento habitual de los cables. El análisis armónico es de tipo lineal y solo tiene en cuenta la respuesta estacionaria de la estructura. Por tanto, se utiliza para este caso también un análisis transitorio.

5.3. Resultados de los análisis

En primer lugar, se realiza un análisis modal para determinar las frecuencias naturales del tirante.

Posteriormente se realizan los análisis ante las señales de viento generadas y se obtienen los resultados, centrandose para ello el análisis en los desplazamientos verticales. En concreto, se controlarán los desplazamientos en la mitad de luz del cable (nodo 55). De esta forma, se determinará la necesidad o no de llevar a cabo medidas de mitigación.

5.3.1. Análisis Modal

Para la realización del análisis modal se han tenido en cuenta los efectos de la tensión inicial del cable, ya que este es un parámetro determinante en las frecuencias naturales de la estructura.

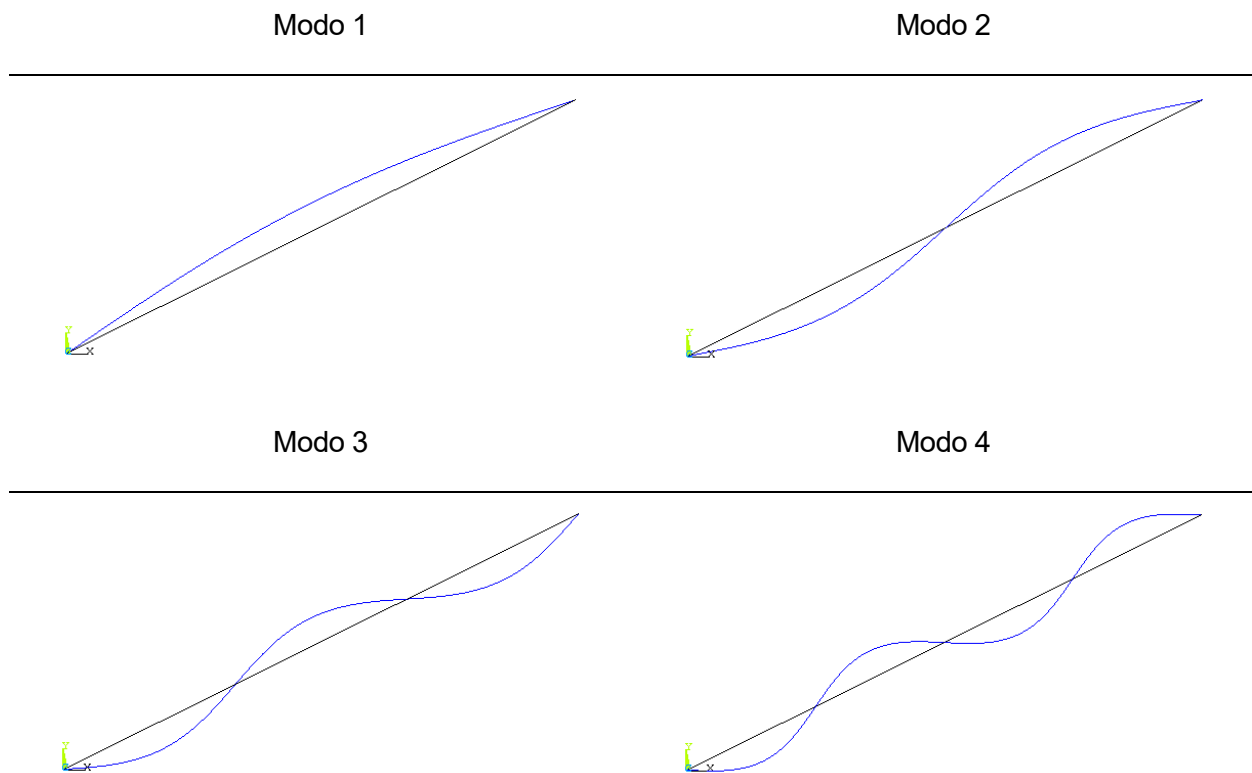
5.3.1.1. Tirante número 13

En el caso del tirante de mayor longitud del Puente del Alamillo, las frecuencias naturales obtenidas y los primeros modos de vibración se muestran en la Tabla 5.9 y Tabla 5.10.

Tabla 5.9. Frecuencias naturales obtenidas en el caso del tirante número 13

f_1	0.44946 (Hz)
f_2	0.89899 (Hz)
f_3	1.3486 (Hz)
f_4	1.7985 (Hz)
f_5	2.2486 (Hz)

Tabla 5.10. Cuatro primeros modos de vibración del tirante número 13



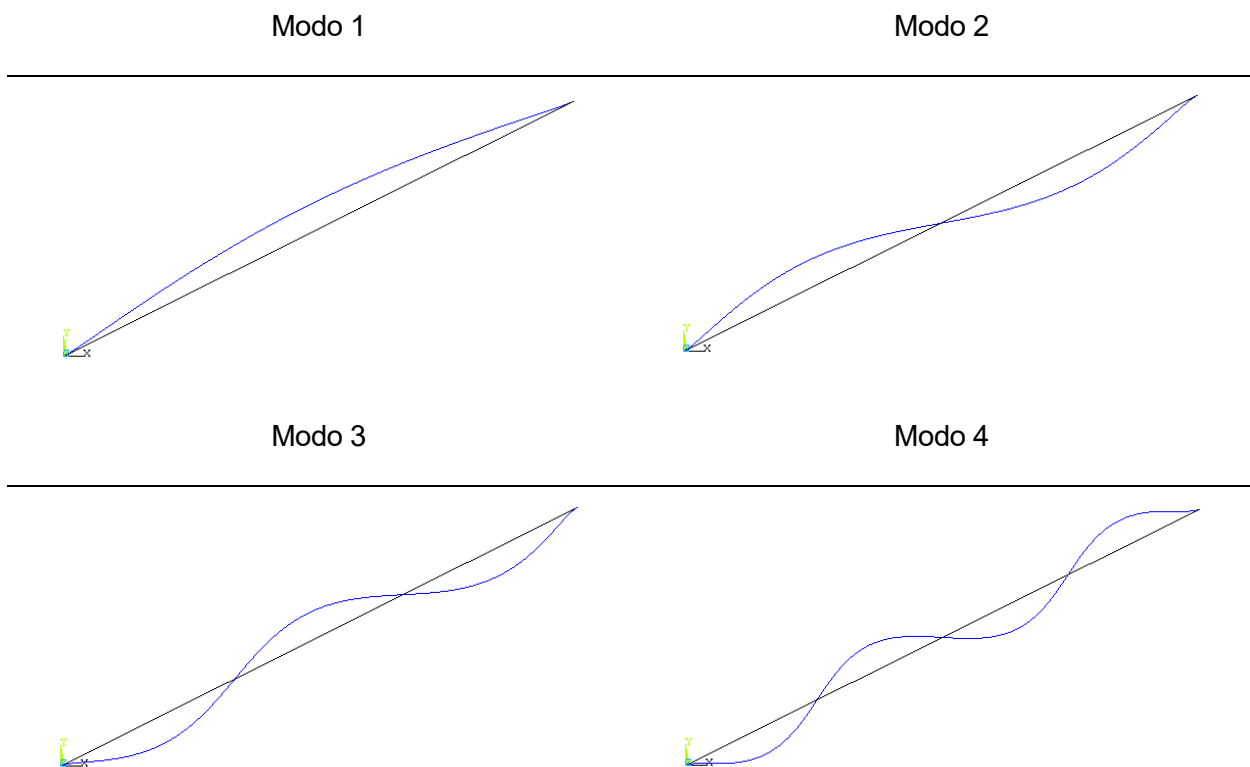
5.3.1.2. Tirante número 1

En el caso del tirante número 1, se obtienen frecuencias mayores, estando todas ellas por encima de 2 Hz. Este dato es importante, ya que a partir de este valor, los cables se encuentran en el umbral de ser susceptibles de sufrir vibraciones por desprendimiento de vórtices. En la Tabla 5.11 y Tabla 5.12 se recogen las frecuencias naturales y modos de vibración.

Tabla 5.11. Frecuencias naturales obtenidas en el caso del tirante número 1.

f_1	2.2792 (Hz)
f_2	4.5690 (Hz)
f_3	6.8799 (Hz)
f_4	9.2217 (Hz)
f_5	11.606 (Hz)

Tabla 5.12. Cuatro primeros modos de vibración del tirante número 1.



5.3.2. Resultados para la acción de viento turbulento

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el caso del cable número 13 sometido a la acción de viento turbulento. En este caso, se ha establecido una limitación de la amplitud de los desplazamientos de $0.5D$ (siendo D el diámetro exterior de la vaina, igual a 20 cm en este caso).

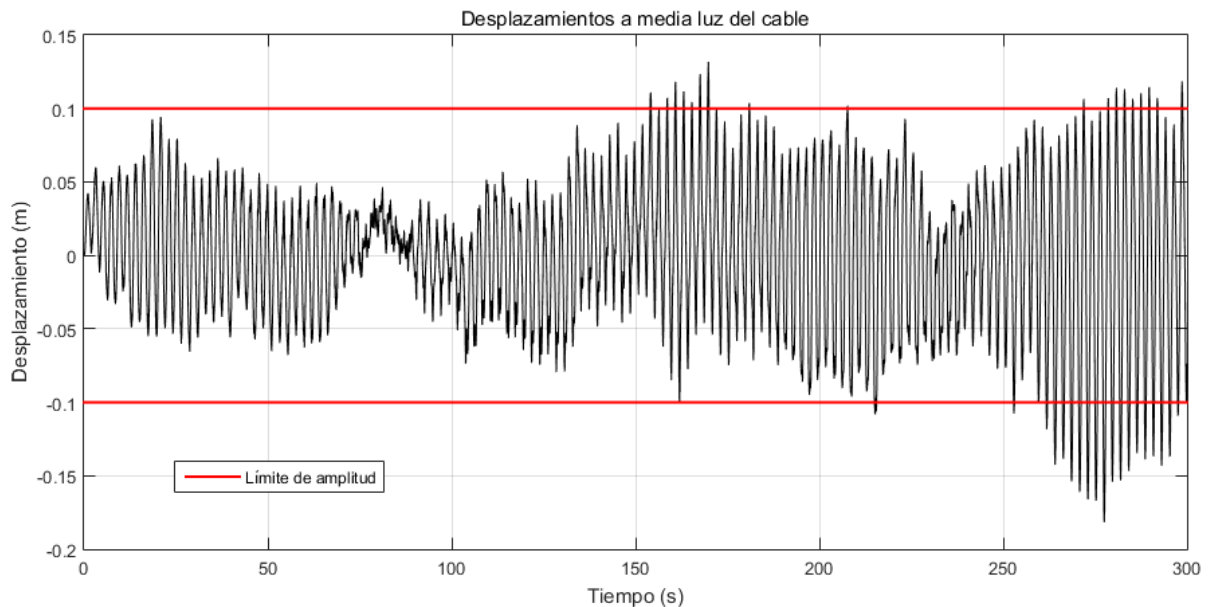


Figura 5.21. Resultados en mitad de la longitud del cable (nodo 55). Viento turbulento

En la Figura 5.21 se muestra la historia de desplazamientos verticales en el nodo controlado, obteniéndose desplazamientos superiores a los 10 cm a mitad de luz. Los resultados extremos en cada caso son:

Tabla 5.13. Desplazamientos extremos a media luz del cable para la carga de viento turbulento.

Posición	$U_{y,m\acute{a}x}$	$U_{y,m\acute{i}n}$
Mitad de luz (Nodo 55)	0.1318	-0.1817

Por tanto, aparecen desplazamientos de 18.17 cm en valor absoluto en la mitad de la luz del cable, lo que queda por encima de los valores “preferibles”, que limitan la amplitud de las oscilaciones a $0.5D$, según los estudios llevados a cabo por (FHWA, 2007).

Estableciendo este límite, la máxima amplitud permitida es de 0.10 m. Para cumplir con esta recomendación, se añadirá un sistema de amortiguación. En el apartado 5.4 se realiza un estudio comparativo de los resultados obtenidos con amortiguadores de fricción, viscosos y elastoméricos.

5.3.3. Resultados para la acción de desprendimiento de vórtices

Los análisis para estudiar el fenómeno de desprendimiento de vórtices se han realizado sobre el

cable número 1 del Puente del Alamillo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.22. También se muestra el límite adoptado para los desplazamientos máximos y mínimos, que en este caso se han establecido en 1D (desplazamiento máximo permitido igual al diámetro de la vaina exterior).

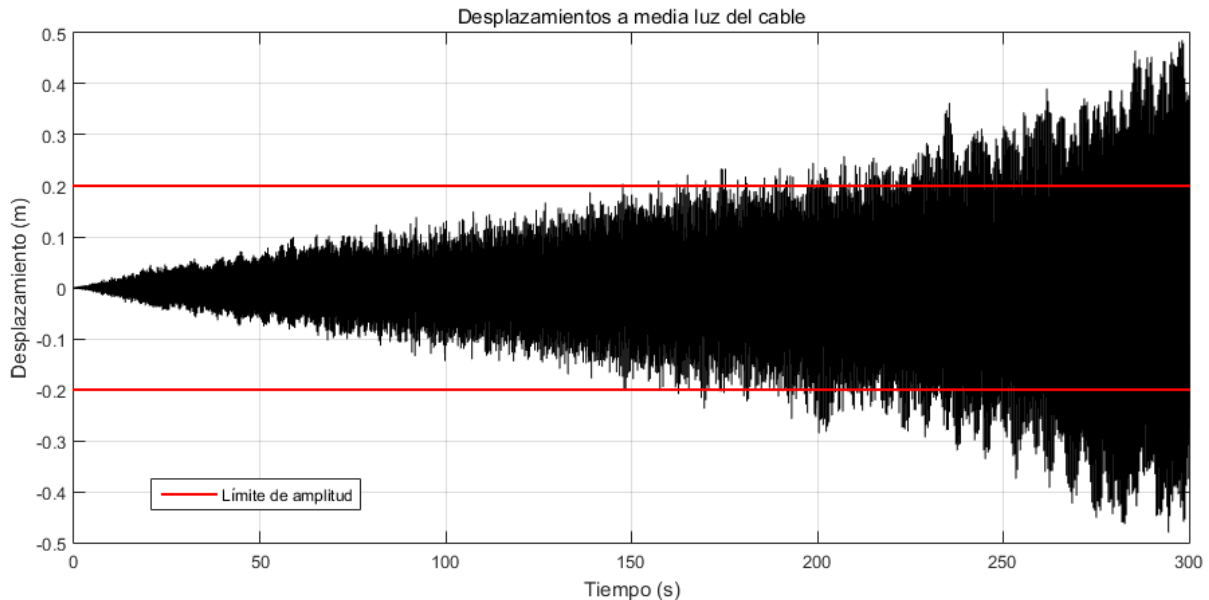


Figura 5.22. Resultados en mitad de la longitud del cable (nodo 55). Desprendimiento de vórtices

De la Figura 5.22 se desprende que los desplazamientos en el caso de desprendimiento de vórtices son superiores a los obtenidos en el análisis con las cargas de viento turbulento, a pesar de que en el primero de ellos las cargas son considerablemente inferiores. Sin embargo, cuando el cable número 1 es sometido a la señal de viento generada, se produce un fenómeno de resonancia, ya que dicha señal tiene un alto contenido de energía en el rango de frecuencias que coincide con las primeras frecuencias naturales de la estructura. Esto hace que los desplazamientos vayan amplificándose a lo largo del tiempo.

Por tanto, debido a que la sollicitación en este caso será más elevada por tratarse de un fenómeno de inestabilidad, se ha considerado establecer una limitación mayor para los desplazamientos, lo que se correspondería con un límite “recomendado” según (FHWA, 2007).

5.4. Medidas de mitigación. Diseño y optimización de los amortiguadores

Una vez realizados los análisis en el caso de los cables sin medidas de control implementadas, se desprende de los resultados, que los desplazamientos máximos en cada caso están por encima de las limitaciones establecidas, por lo que será necesario estudiar la incorporación de sistemas de control.

Para ello, el presente estudio, se centra en los amortiguadores de tipo pasivo, buscando incrementar

el bajo amortiguamiento natural de los cables. Por tanto, se considerarán los tres tipos de amortiguadores pasivos más habituales: viscoso, elastomérico y de fricción.

El diseño de los amortiguadores se lleva a cabo marcando como objetivo alcanzar las tolerancias de desplazamientos impuestas, introduciendo la menor cantidad de amortiguamiento posible. La razón por la que se quiere reducir el amortiguamiento, es porque normalmente el coste de un sistema de amortiguación aumenta conforme aumenta su “c”, es decir, su capacidad de disipar energía. Los parámetros óptimos de cada amortiguador se obtienen de un proceso de optimización a partir de algoritmos genéticos implementado en Matlab. En este proceso, existen una serie de parámetros que controlan la optimización, y que se resumen brevemente en el siguiente punto.

5.4.1. Proceso de optimización en MATLAB. Parámetros y características

Para la estimación de los parámetros óptimos de los amortiguadores a emplear (problema de optimización) se utilizará el algoritmo genético implementado en el módulo de Optimización de MATLAB.

Un algoritmo genético funciona utilizando una serie de operadores sobre una población. La población inicial es generada aleatoriamente por defecto, mientras que la segunda se calcula a partir de la aptitud de los individuos en la generación anterior.

En primer lugar, se deben definir una serie de parámetros en MATLAB que controlan el proceso de optimización:

5.4.1.1. Tamaño de la población ('PopulationSize')

Por defecto, MATLAB establece un tamaño de población inicial de 50 individuos. Este parámetro depende de la complejidad del problema a resolver, ya que para casos más sencillos en los que haya una o dos variables, un tamaño reducido de población puede ser suficiente (Mathworks, 2017). En el caso de los amortiguadores, se variará dependiendo del tipo de sistema, en función de los parámetros a optimizar. Hay que tener en cuenta que aumentar el tamaño de la población, eleva considerablemente el coste computacional del proceso, ya que las series temporales de viento son de una duración muy larga (300 segundos). Por esta razón, se han empleado poblaciones de 10 individuos en el caso del amortiguador viscoso y amortiguador elastomérico (que tienen una y dos variables respectivamente) y una población de 15 individuos en el amortiguador de fricción (tres variables).

5.4.1.2. Rango de población inicial ('InitialPopulationRange').

El método para seleccionar a la población inicial por defecto consiste en una generación aleatoria y uniforme de números. El rango inicial puede modificarse mediante las opciones del algoritmo.

5.4.1.3. Número de variables ('numberOfVariables').

Determina el número de variables o parámetros a optimizar en el proceso. La complejidad del problema, así como el número de generaciones necesarias aumentará conforme aumente el número de variables a optimizar.

En el caso de los amortiguadores, un ejemplo de variable sería la "c" de los amortiguadores viscosos. En la Tabla 5.14 se muestra el número de variables consideradas en cada tipo de amortiguador.

Tabla 5.14. Número de variables consideradas para cada amortiguador

Tipo de amortiguador	Número de variables
Viscoso	1 (c)
Elastomérico	2 (c, k)
Fricción	3 (c,k, Fuerza del deslizador)

También es posible establecer restricciones a las variables, indicando límites inferiores y superiores de las soluciones.

5.4.1.4. Número de generaciones ('Generations').

Es el número de generaciones que se realizan antes de parar el algoritmo. Debe ser suficiente para que converja la solución.

5.4.1.5. Selección de operadores del algoritmo genético.

El algoritmo comienza con una serie de puntos aleatorios y utiliza operadores para producir las siguientes poblaciones. Estos operadores son: selección, reproducción, mutación y escala.

Para cada uno de ellos, se pueden elegir diferentes opciones. Por ejemplo, para elegir el operador de selección, se emplea la orden 'SelectionFcn' y entre las opciones, se encuentra la selección por torneo (@selectiontournament). De igual forma, se pueden seleccionar las funciones de los demás operadores: 'FitnessScalingFcn', 'MutationFcn' y 'CrossoverFcn'.

5.4.1.6. Criterio de parada.

Además del número total de generaciones, existen otros criterios de parada. Uno de ellos consiste en limitar el tiempo total de cálculo empleado por el algoritmo. Otro criterio de parada consiste en alcanzar un determinado valor de la función objetivo (FitnessLimit). También puede establecerse la parada del algoritmo cuando entre dos iteraciones el cambio en la función objetivo sea menor que una determinada tolerancia (TolFun).

5.4.1.7. Función objetivo.

La función objetivo es aquella cuyo valor se pretende minimizar. En nuestro caso, esta función hace mínima la diferencia entre los desplazamientos máximos (en valor absolutos) obtenidos en la mitad del cable y el límite establecido en cada caso (0.5D o 1D). De esta forma, si la limitación establecida es 10 cm, el algoritmo buscará los parámetros de los amortiguadores para los que el desplazamiento máximo es el más cercano a 10 cm.

La expresión quedaría:

$$f = \text{abs}(\text{TolDispl} - \max(\text{abs}(\text{maxdispl}))) \quad (5.9)$$

Siendo *TolDispl*, los desplazamientos máximos permitidos en valor absoluto y *maxdispl* los desplazamientos máximos en valor absoluto calculados en cada iteración.

5.4.2. Amortiguador viscoso

En el caso del amortiguador viscoso, la única variable considerada es *c*, por lo que se realiza el proceso de optimización para buscar el valor óptimo de este parámetro.

5.4.2.1. Optimización del amortiguador viscoso para la acción turbulenta del viento

Se ha establecido el límite de iteraciones en 10, con una población de 10 individuos para llevar a cabo la optimización. Estos valores se consideran suficientes, ya que únicamente existe una variable en el problema.

En la Tabla 5.15 se muestran los resultados obtenidos.

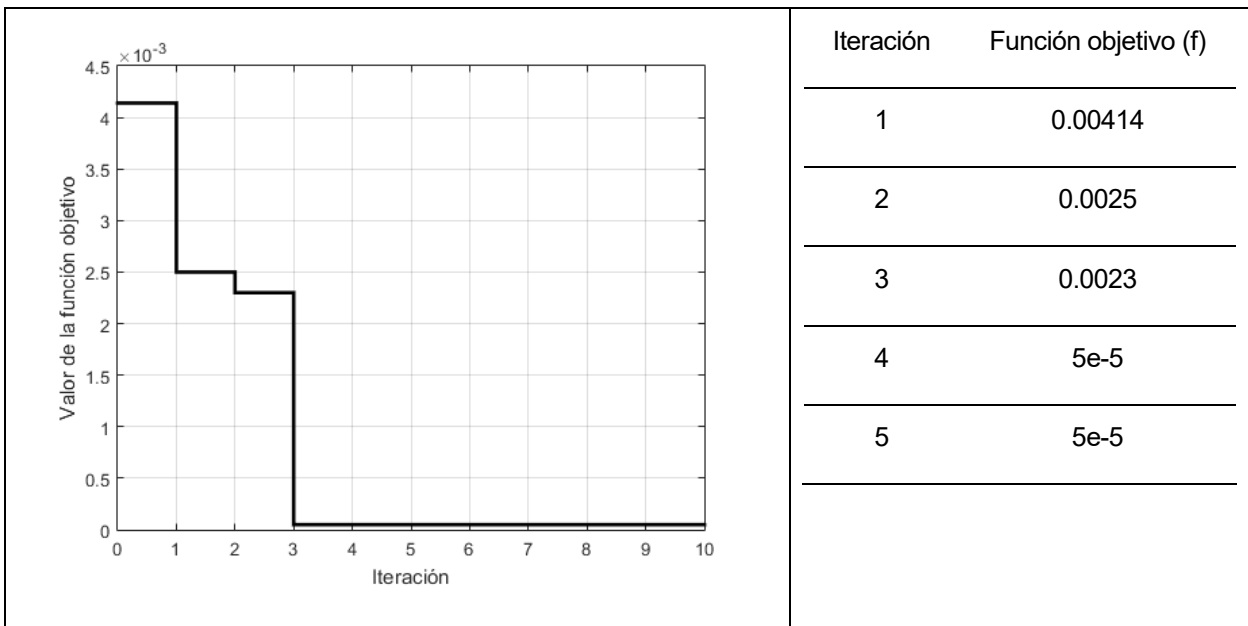
Tabla 5.15. Valor óptimo de las variables para el amortiguador viscoso. Viento turbulento.

Variable	Valor
<i>c</i>	84139.132 N·s/m

Se ha obtenido un valor de $c=84139.132 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$. Con este valor se obtienen unos desplazamientos máximos de 10 cm, por lo que se cumple la condición establecida en el análisis.

Los valores de la función objetivo obtenidos en el proceso de optimización se muestran en la Tabla 5.16. Puede observarse que, al tratarse de un problema con una única variable a optimizar, la convergencia se alcanza rápidamente. A partir de la cuarta iteración, el valor de la función objetivo no varía, habiéndose alcanzado la convergencia en el problema de optimización.

Tabla 5.16. Proceso de optimización del amortiguador viscoso para viento turbulento.



Finalmente, se obtiene un valor de la función objetivo $f=0.00005$, por lo que se considera que se ha alcanzado un valor óptimo.

En la Figura 5.23 se representan los desplazamientos a media luz del cable con y sin amortiguador viscoso. Se observa claramente, que el amortiguador reduce considerablemente los desplazamientos, coincidiendo el desplazamiento máximo que se obtiene en el análisis con el límite que se había establecido.

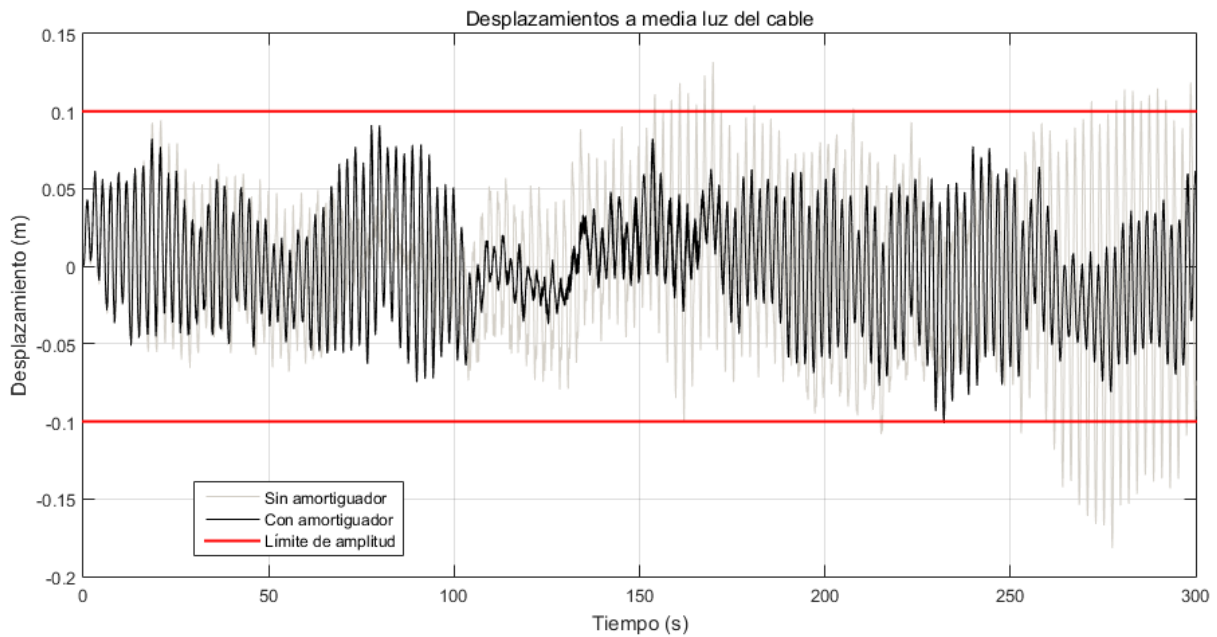


Figura 5.23. Desplazamientos con y sin amortiguador viscoso. Viento turbulento

De esta forma, la señal queda controlada, no solo disminuyendo los desplazamientos máximos, sino que se consigue cumplir con las limitaciones impuestas empleando el mínimo tamaño de amortiguador posible.

5.4.2.2. Optimización del amortiguador viscoso para el desprendimiento de vórtices

En este caso, el número de iteraciones llevadas a cabo es 6, debido a que se ha introducido una tolerancia de cambio en el valor de la función objetivo entre iteraciones. De esta forma, se disminuye el tiempo de cálculo, parando el proceso cuando la solución ya ha convergido.

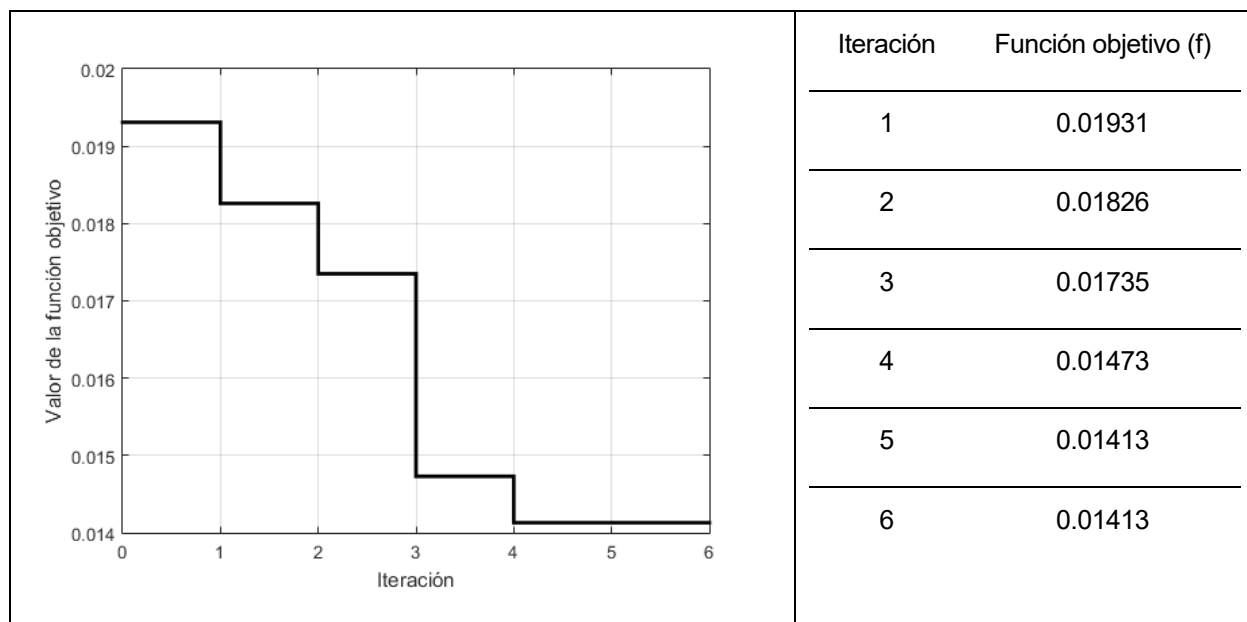
Los valores obtenidos para la variable c en este caso se muestran en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17. Valor óptimo de las variables para el amortiguador viscoso. Desprendimiento de vórtices.

Variable	Valor
C	386659.893 N·s/m

El valor de la variable c es bastante más elevado, ya que los desplazamientos iniciales eran mayores.

Tabla 5.18. Proceso de optimización del amortiguador viscoso para desprendimiento de vórtices.



Atendiendo a la evolución del valor de la función objetivo (Tabla 5.18), puede observarse que la solución final es menos precisa en este caso que en el del cable sometido a viento turbulento.

A continuación, se representan los desplazamientos obtenidos en el caso sin amortiguador y en el caso con amortiguador. En la Figura 5.24 se muestra, que a pesar de tener controlados los desplazamientos dentro de los límites establecidos, el ajuste en este caso es menos preciso. La diferencia es de aproximadamente 1.4 cm.

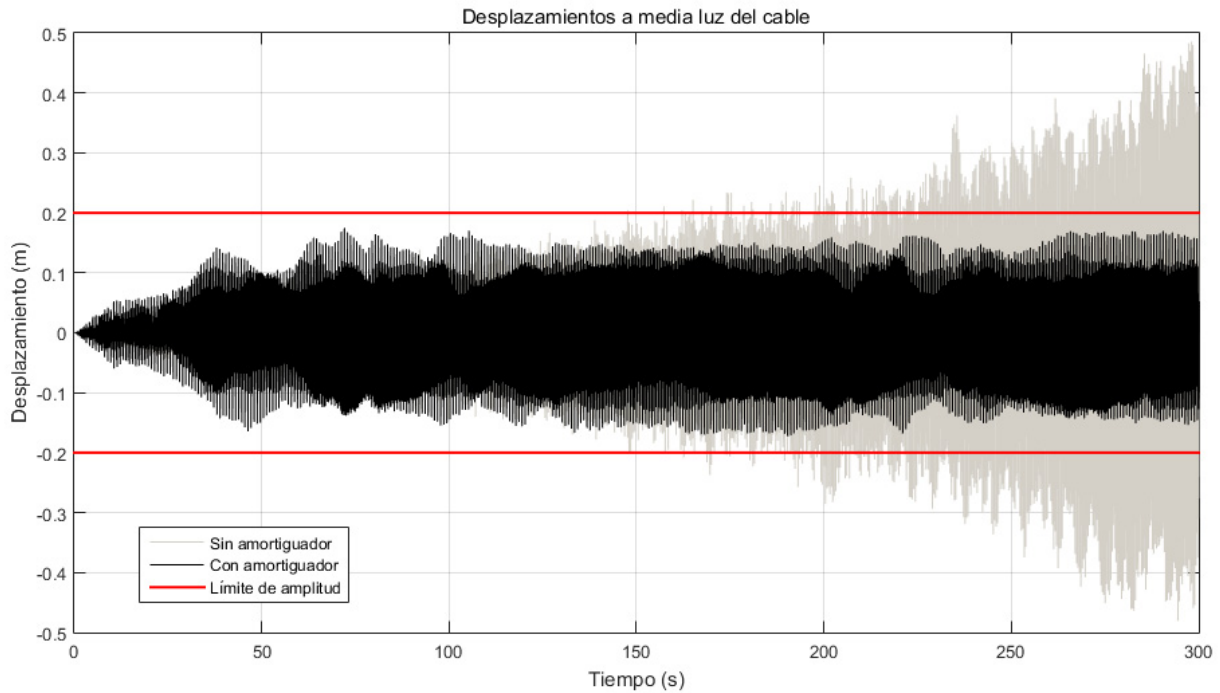


Figura 5.24. Desplazamientos con y sin amortiguador viscoso. Desprendimiento de vórtices

Se desprende de estos resultados, que es posible reducir los desplazamientos y obtener valores admisibles dentro de las tolerancias establecidas, pero el ajuste que se obtiene es de peor calidad que en el caso de viento turbulento.

5.4.3. Amortiguador elastomérico

El amortiguador elastomérico se ha caracterizado por dos variables: c y K .

5.4.3.1. Optimización del amortiguador elastomérico para la acción turbulenta del viento

La Tabla 5.19 resume los valores obtenidos para cada una de las variables tras realizar el proceso de optimización. Con el amortiguador elastomérico, se obtiene un valor inferior de c , a cambio de introducir un valor importante de la rigidez K .

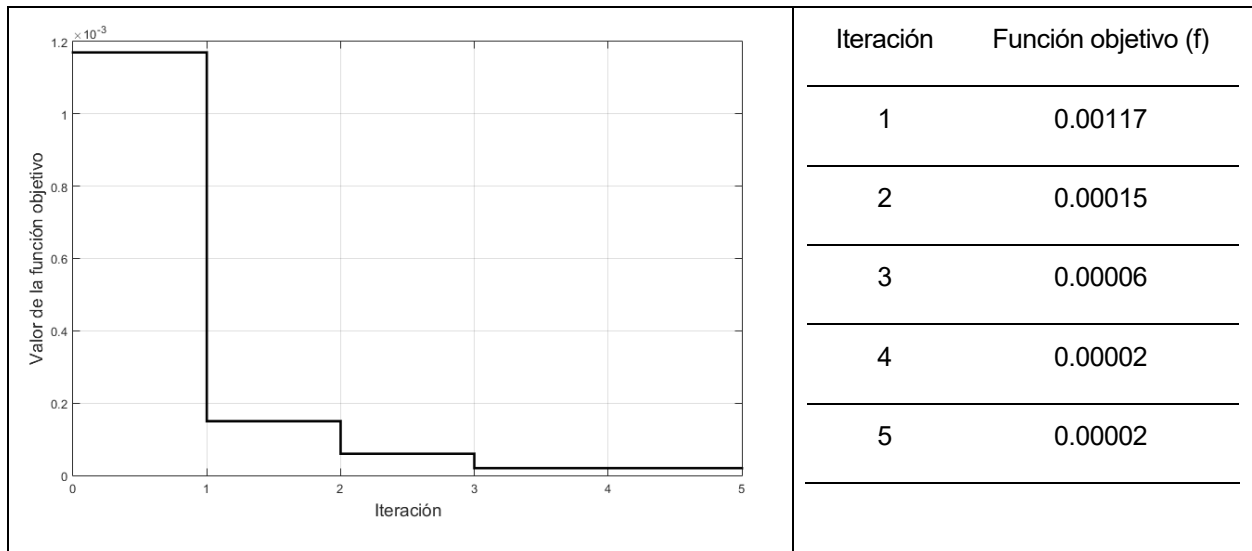
Tabla 5.19. Valor óptimo de las variables para el amortiguador elastomérico. Viento turbulento.

Variable	Valor
c	79894.971 N·s/m
K	288657.879 N/m

En el proceso de optimización se han necesitado únicamente 5 iteraciones para alcanzar un valor

adecuado de la función objetivo.

Tabla 5.20. Proceso de optimización del amortiguador elastomérico para viento turbulento.



Los desplazamientos obtenidos con los datos del amortiguador calculados en el proceso de optimización se muestran en la Figura 5.25. Se consigue un ajuste preciso a las limitaciones establecidas, quedando la señal controlada dentro de las franjas que delimitan los desplazamientos máximos admisibles.

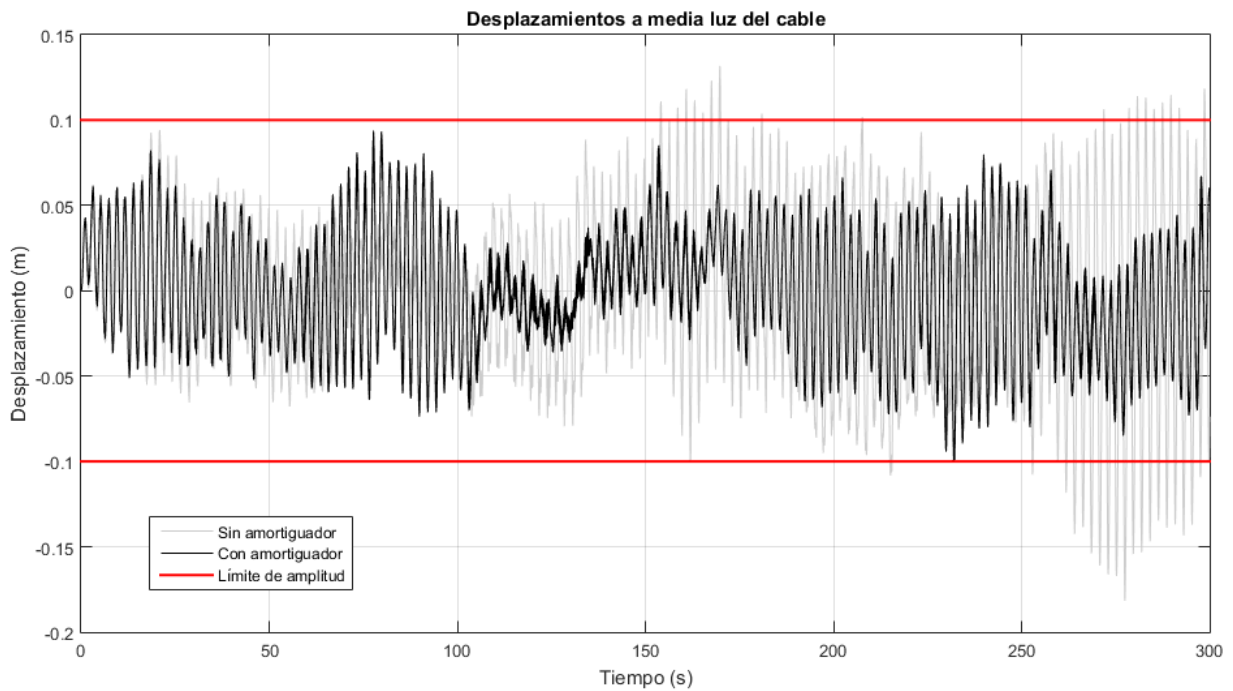


Figura 5.25. Desplazamientos con y sin amortiguador elastomérico. Viento turbulento

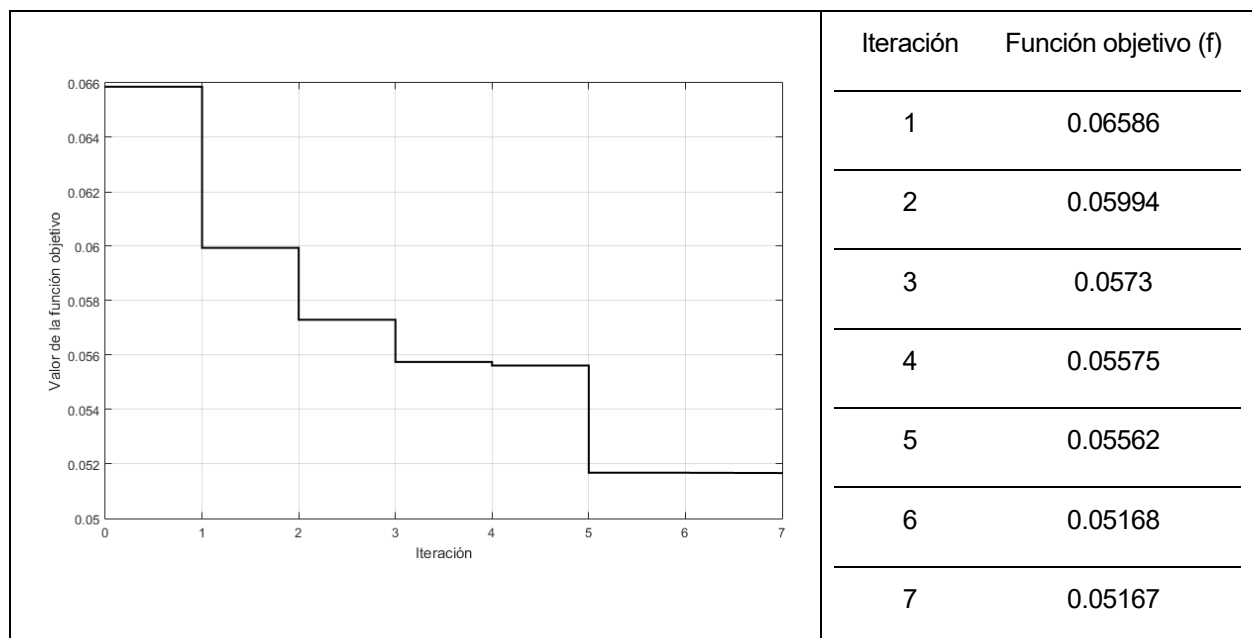
5.4.3.2. Optimización del amortiguador elastomérico para el desprendimiento de vórtices

En la Tabla 5.21 se recogen los valores optimizados de las variables c y K . En este caso, se consigue una reducción importante del valor de c respecto al amortiguador viscoso, a cambio de introducir K en el sistema.

Tabla 5.21. Valor óptimo de las variables para el amortiguador elastomérico. Desprendimiento de vórtices.

Variable	Valor
c	227814.977 N·s/m
K	155905.182 N/m

Tabla 5.22. Proceso de optimización del amortiguador elastomérico para desprendimiento de vórtices.



En este caso han sido necesarias 7 iteraciones para llevar a cabo la optimización de las variables.

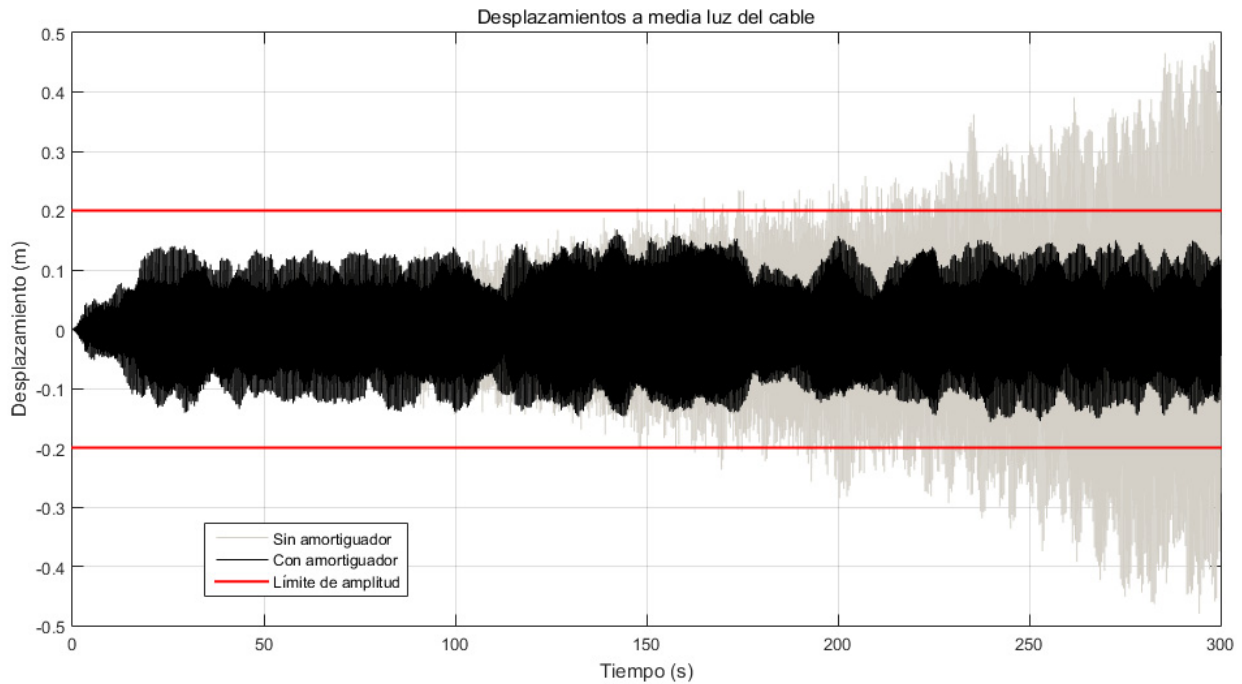


Figura 5.26. Desplazamientos con y sin amortiguador elastomérico. Desprendimiento de vórtices

5.4.4. Amortiguador de fricción

Para el amortiguador de fricción se tienen tres variables: c , K y FSLIDE.

5.4.4.1. Optimización del amortiguador de fricción para la acción turbulenta del viento

En el caso del amortiguador de fricción se han empleado poblaciones de 15 individuos para llevar a cabo la optimización, ya que en este caso se cuenta con una variable más, siendo tres en total.

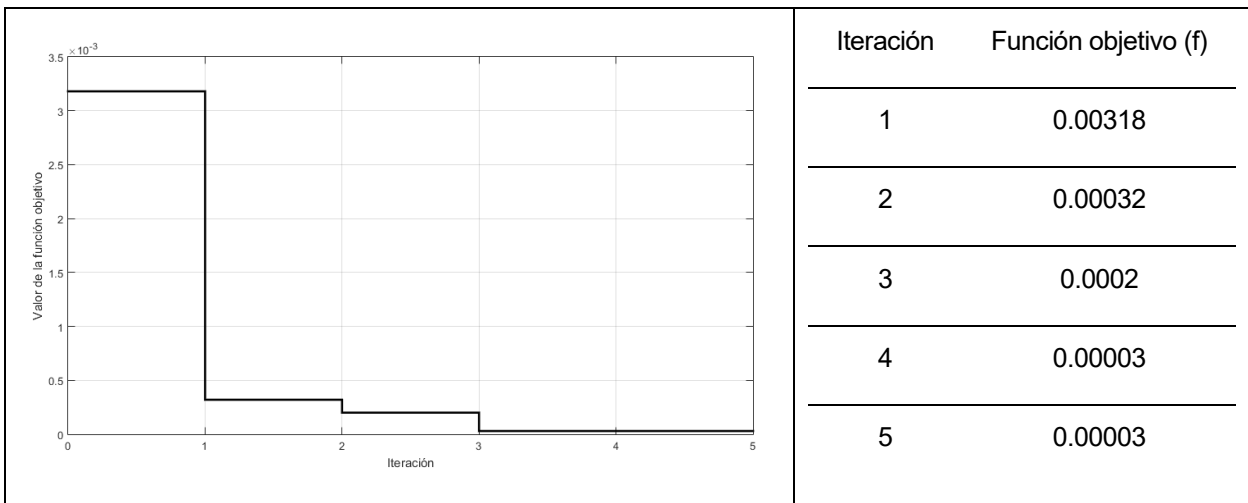
Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23. Valor óptimo de las variables para el amortiguador de fricción. Viento turbulento.

Variable	Valor
c	79892.971 N·s/m
K	276405.947 N/m
FSLIDE	95.520 N

Los valores de c y K son muy similares a los obtenidos en el amortiguador elastomérico. La variable FSLIDE, presenta un valor de 95.5 N.

Tabla 5.24. Proceso de optimización del amortiguador de fricción para viento turbulento.



Se han necesitado 5 iteraciones para llevar a cabo el proceso de optimización (Tabla 5.24), lo que significa, al igual que en el resto de casos, que se alcanza rápidamente la convergencia.

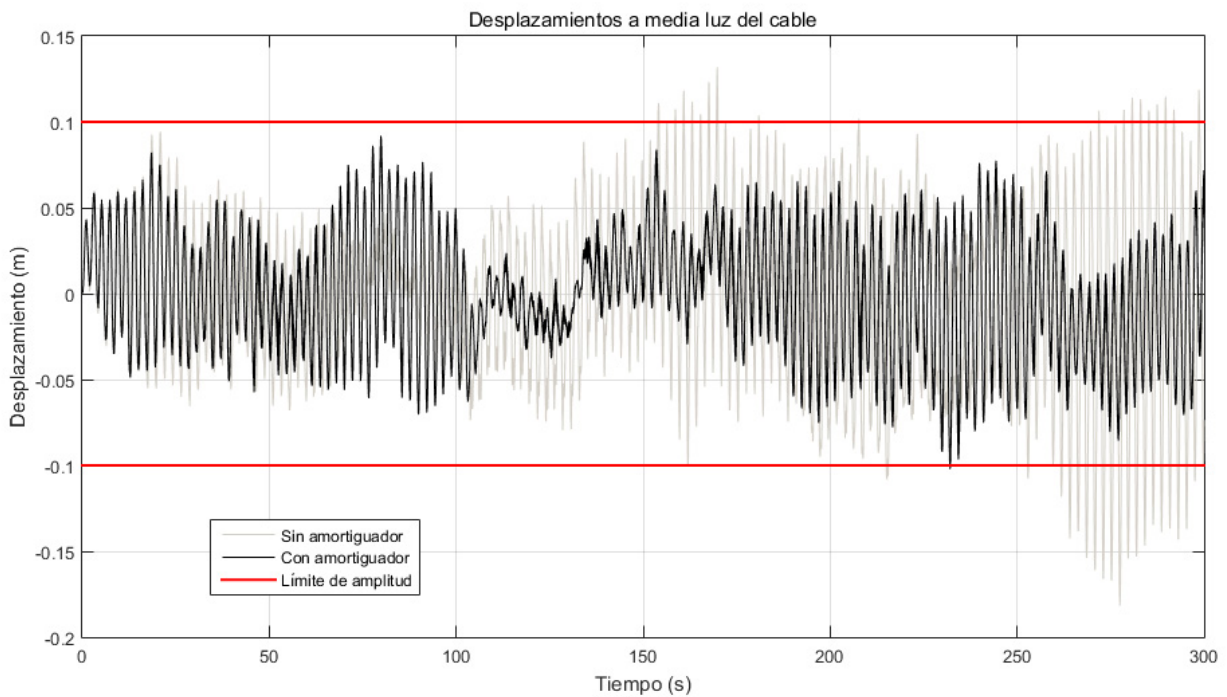


Figura 5.27. Desplazamientos con y sin amortiguador de fricción. Viento turbulento

En la Figura 5.27 se pueden observar la historia de desplazamientos para el caso con amortiguador y sin amortiguador, así como las limitaciones impuestas a los desplazamientos. Los resultados se ajustan a las condiciones establecidas, siendo los resultados máximos en valor absoluto igual a 10 cm.

5.4.4.2. Optimización del amortiguador de fricción para el desprendimiento de vórtices

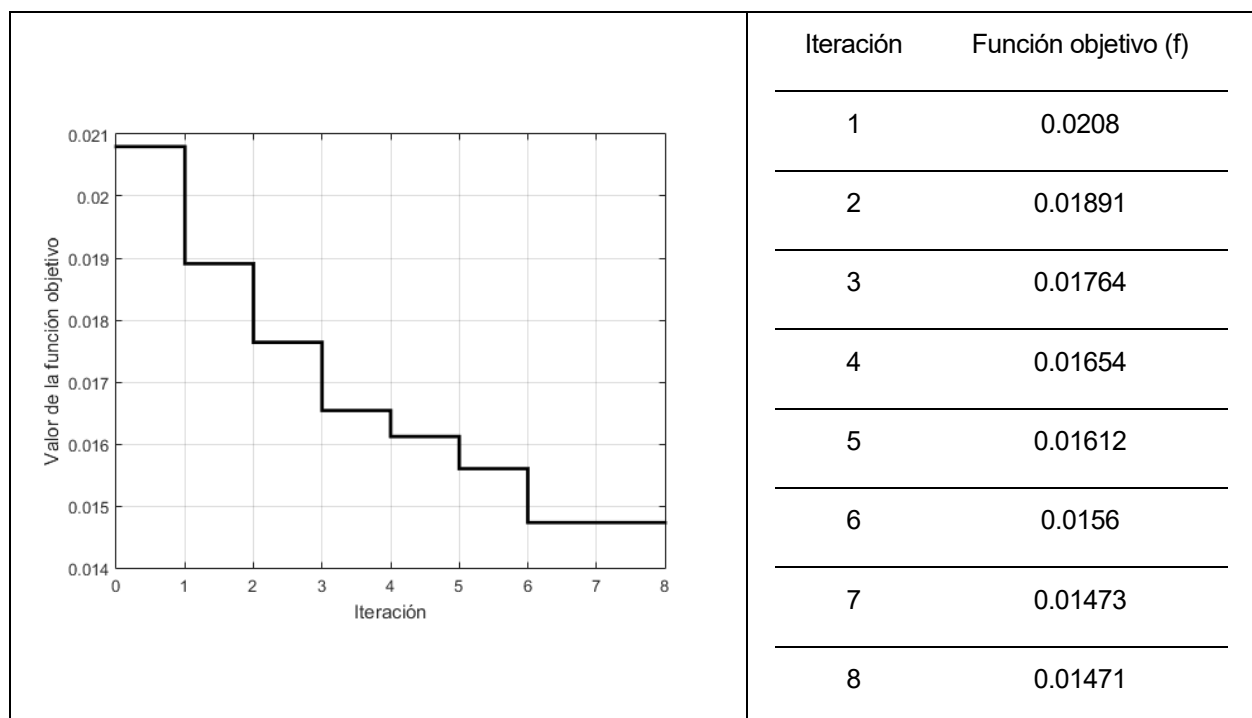
En el caso de desprendimiento de vórtices, los valores optimizados se muestran en la Tabla 5.25. De nuevo, cuando se somete al cable 1 al fenómeno de desprendimiento de vórtices, los valores de c y K son elevados para obtener unos desplazamientos dentro de los umbrales admisibles.

Tabla 5.25. Valor óptimo de las variables para el amortiguador de fricción. Viento turbulento.

Variable	Valor
c	381084.379 N·s/m
K	200966.643 N/m
FSLIDE	96.377 N

Se han realizado 8 iteraciones para obtener los parámetros idóneos del amortiguador. Sin embargo, de los valores presentados en la Tabla 5.26, se desprende que la diferencia entre la primera y la última iteración es apenas medio centímetro.

Tabla 5.26. Proceso de optimización del amortiguador de fricción para desprendimiento de vórtices.



La Figura 5.28 representa la historia de desplazamientos para el caso sin amortiguador y con amortiguador.

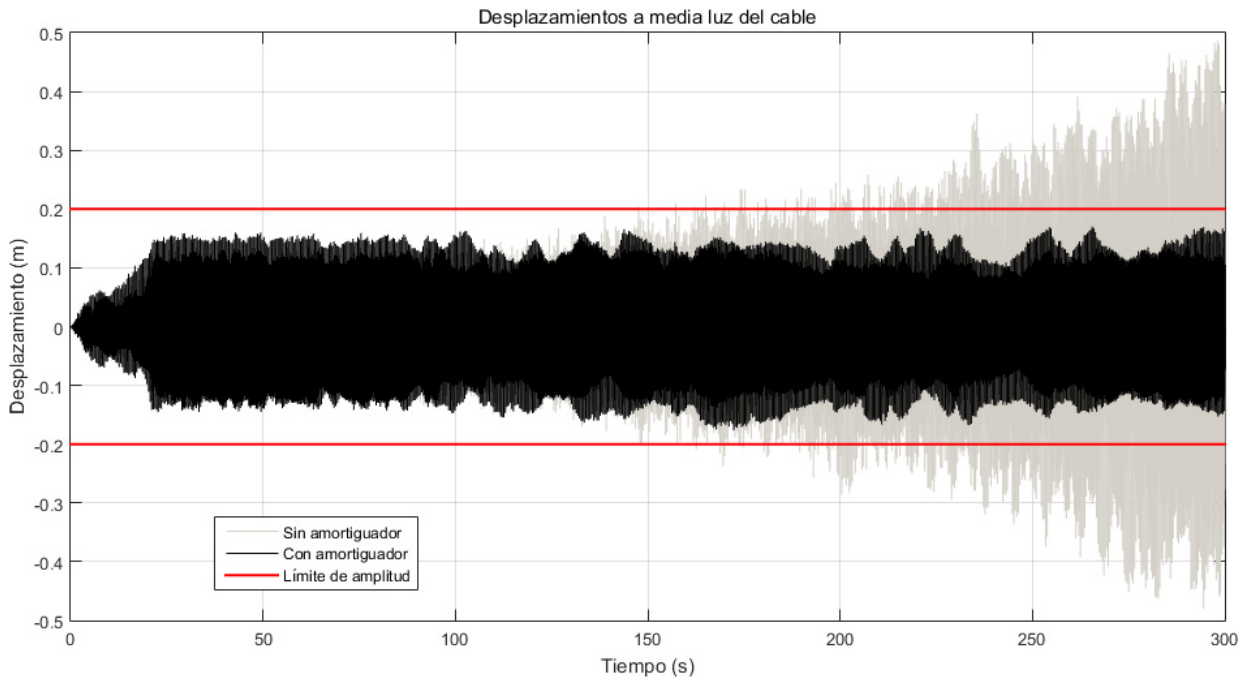


Figura 5.28. Desplazamientos con y sin amortiguador de fricción. Desprendimiento de vórtices

De nuevo, se consigue controlar la señal dentro de los umbrales establecidos.

5.5. Comparación de los resultados obtenidos con los modelos analíticos

El enfoque puesto en práctica en los apartados anteriores ha puesto de manifiesto que es posible controlar los desplazamientos, manteniéndolos dentro de unos umbrales mediante la instalación de distintos tipos de amortiguadores.

En este apartado, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en los análisis con algunos de los enfoques tradicionales. Para ello, se compararán los resultados para el caso del amortiguador viscoso.

Los enfoques más tradicionales intentan obtener la máxima capacidad de amortiguamiento, mientras que en el presente trabajo el diseño gira en torno al cumplimiento de una serie de tolerancias en cuanto al desplazamiento máximo de los cables.

Como ya se vio en un apartado anterior, una de las formas de evitar vibraciones producidas por lluvia y viento es asegurar un mínimo ratio de amortiguamiento en los cables, lo que se consigue elevando el número de Scruton por encima de 10. Aplicando este criterio se tiene:

$$\xi_{min} = \frac{\rho D^2}{m} \cdot 10 \quad (5.10)$$

Condición que debe ser satisfecha, por ejemplo, para los modos en el rango de 0.3-3 Hz (Sá Caetano, 2007).

En el caso del cable 13 del puente del Alamillo, esta condición implica que $\xi_{min} = 0.82\%$.

Aplicando la formulación asintótica de Krenk (Krenk S. , 2000):

$$\frac{\xi_n}{x_c/L} = \frac{\eta n \pi x_c / L}{1 + \left(\frac{\eta n \pi x_c}{L}\right)^2} = \frac{0.0082}{0.03} = 0.273 \quad (5.11)$$

A partir de la expresión anterior, se puede obtener $\eta = 7.76$. Por tanto, el tamaño del amortiguador será:

$$c = \frac{mL\omega_{01}\eta}{\pi 1} = 122038 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (5.12)$$

Ahora, obtendremos el valor óptimo del amortiguador (c_{opt}) mediante la curva universal de Pacheco (Pacheco, Fujino, & Sulekh, 1993). Este valor viene dado por la siguiente expresión:

$$c_{opt,Pacheco} = 0.10 \frac{mL\omega_{01}}{n \frac{x_c}{L}} = 164688 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (5.13)$$

A partir de las expresiones anteriores, se han obtenido los valores de c a partir de dos modelos diferentes. Ambas formulaciones arrojan valores más elevados que el obtenido en los análisis realizados en este trabajo. Para comparar los resultados en términos de desplazamientos de los cables, se realiza un análisis numérico con el modelo implementado en ANSYS con los diferentes valores de los amortiguadores.

El caso comparado se corresponde al del cable número 13 sometido a la acción de viento turbulento.

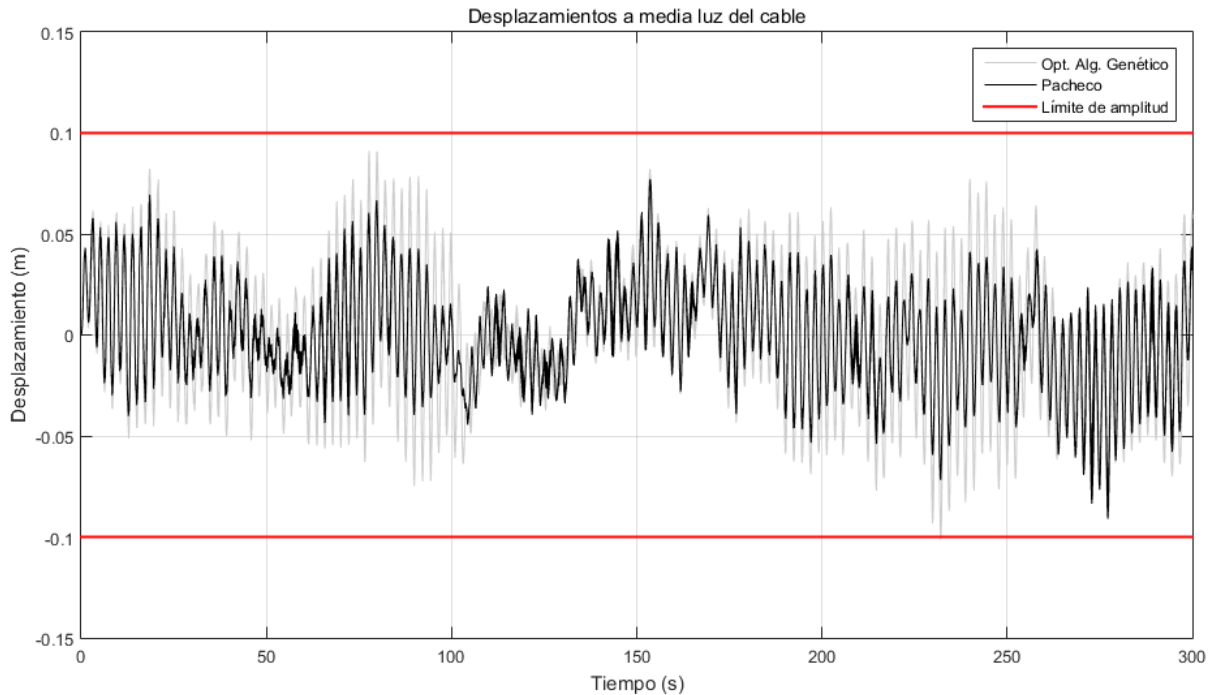


Figura 5.29. Comparación de los resultados obtenidos con la formulación de Pacheco

En la Figura 5.29 se muestra la comparación de los resultados obtenidos con la formulación de Pacheco y los resultados obtenidos mediante el enfoque propuesto en el presente trabajo. Se comprueba que, con la metodología de Pacheco, se obtienen menores desplazamientos que en el otro caso. Esto es un resultado normal, ya que el objetivo de la optimización realizada era ajustar al máximo nivel posible la amplitud de las vibraciones a la tolerancia impuesta. Es importante hacer notar que, en este último caso, la c del amortiguador es prácticamente la mitad que la obtenida a partir de la curva universal de Pacheco.

Por tanto, se puede concluir que el amortiguador optimizado a partir del enfoque basado en el rendimiento, permite cumplir las condiciones establecidas con un amortiguador de menor tamaño, lo que puede suponer un ahorro importante.

Ahora, se comprueban los resultados obtenidos con la metodología de Krenk. Para ello, en la Figura 5.30 se representan conjuntamente los desplazamientos obtenidos mediante las dos metodologías.

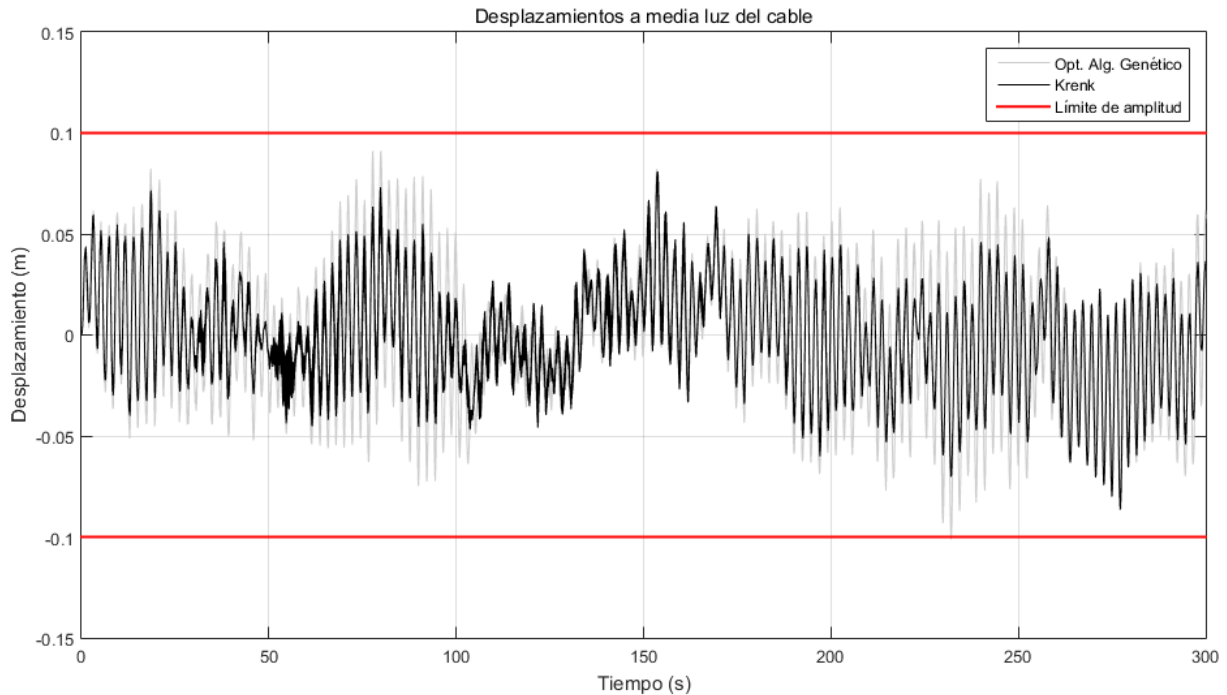


Figura 5.30. Comparación de los resultados obtenidos con la formulación de Krenk

De igual forma que ocurría en el caso de la formulación de Pacheco, en este caso los desplazamientos son menores empleando el modelo de Krenk, pero de nuevo el valor de c es bastante más elevado.

Comparando los resultados en desplazamientos en todos los casos, se observa que el ajuste de la historia de desplazamientos a un determinado límite permite un ahorro significativo en el tamaño del amortiguador necesario. A continuación, se estimarán los valores de decremento logarítmico que se consigue en cada caso.

Para ello, se somete el cable a una determinada carga en el momento inicial, que posteriormente se retira. La señal se va a amortiguando a medida que pasa el tiempo, disipándose una determinada cantidad de energía en función del ratio de amortiguamiento de la estructura.

El decremento logarítmico es habitualmente empleado para medir la eficacia de un sistema de disipación de energía, ya que su valor está directamente relacionado con el comportamiento de la estructura.

Ahora, se comprobará el decremento logarítmico obtenido en cada uno de los casos.

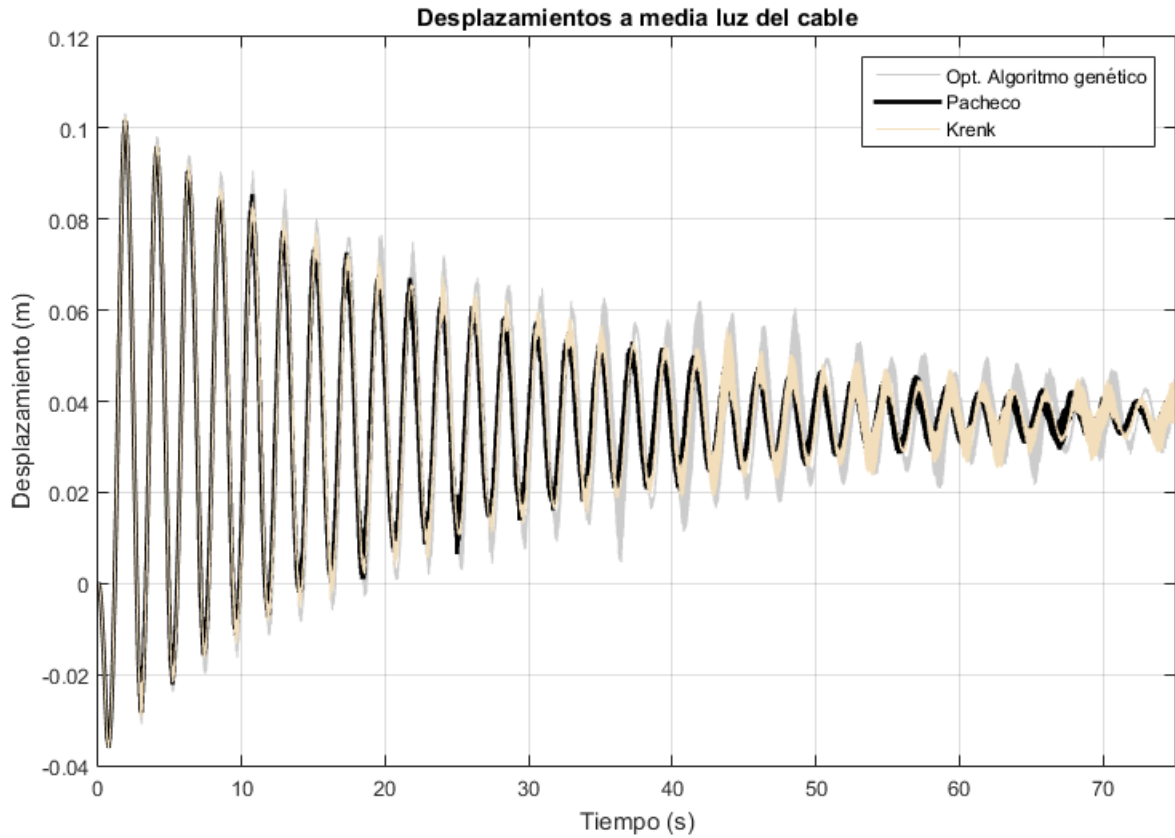


Figura 5.31. Comparación del decaimiento logarítmico en diferentes casos

A partir de los datos mostrados en Figura 5.31, se puede obtener el decaimiento logarítmico en cada uno de los casos. Este parámetro nos servirá de indicativo en cuanto al ratio de amortiguamiento alcanzado.

La expresión del decaimiento logarítmico es:

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} \quad (5.14)$$

Siendo a_n y a_{n+1} la amplitud de vibración en dos ciclos consecutivos cualquiera. Este decremento logarítmico se puede relacionar con el ratio de amortiguamiento respecto al valor crítico como: $\delta = 2\pi\xi$.

Los resultados obtenidos en cada caso se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5.27. Decaimiento logarítmico en cada uno de los casos estudiados.

Metodología	δ	ξ
Opt. Algoritmos genéticos	0.03738	0.59%

Metodología	δ	ξ
Krenk	0.06250	0.99%
Pacheco	0.06079	0.97%

Los resultados arrojan una primera conclusión que ya se intuía de los resultados obtenidos en desplazamientos: con la metodología de Krenk y Pacheco, se consigue un ratio de amortiguamiento bastante más elevado que en el caso de la optimización planteada en este trabajo. Sin embargo, esto no significa que estas soluciones sean más óptimas, ya que, según el enfoque basado en el rendimiento, lo que se buscaba era cumplir una condición en desplazamientos empleando la mínima cantidad de amortiguamiento posible.

(CEN, 2006) y (FIB, 2003) recomiendan un mínimo decremento logarítmico $\delta = 0.03$ para controlar las vibraciones producidas por lluvia-viento. Por tanto, en los tres casos considerados, se cumple con esta condición.

6 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos en los análisis numéricos, así como su comparación con los métodos tradicionales de análisis del sistema cable-amortiguador, se llega a una serie de conclusiones que abarcan todos los aspectos en los que se ha basado el estudio, desde la estimación de las cargas dinámicas a las que se ve sometido el cable hasta la comparación entre diferentes tipos de amortiguadores.

En primer lugar, la caracterización de las cargas que actúan sobre el cable es una tarea difícil, pues depende de diversos factores, incluyendo la propia interacción dinámica entre el cable y el flujo de aire. En este trabajo, se han generado varias señales de viento mediante dos aplicaciones web desarrolladas por el NatHaz Modeling Laboratory. Así, es posible evaluar el comportamiento del cable frente a diferentes fenómenos vibratorios, como son la acción turbulenta del viento y el desprendimiento de vórtices. Un estudio más detallado de las condiciones reales de los cables, debería incluir análisis en túnel de viento, así como medidas reales de las velocidades del viento en la zona. Sin embargo, el uso de métodos estadísticos aleatorios como el aquí empleado, permite un predimensionamiento y una evaluación bastante precisa de la eficacia de los sistemas de mitigación.

El diseño de los amortiguadores que se ha abordado en este trabajo, se basa en un enfoque basado en el rendimiento, lo que ha supuesto, un cambio en los criterios tradicionales de optimización de amortiguadores de cables. La idea básica consiste en establecer una serie de condiciones que debe cumplir la estructura cuando se ve sometida a unas determinadas acciones. En este caso, se han impuesto unas limitaciones a los desplazamientos, basados en las tolerancias de los usuarios a las vibraciones en el caso de puentes atirantados. Por tanto, teniendo las acciones actuantes, se diseña el amortiguador para que se cumplan los desplazamientos máximos impuestos. Esto supone un cambio en el enfoque habitual, ya que normalmente se busca elevar el ratio de amortiguamiento respecto al crítico por encima de un valor determinado.

En definitiva, el proceso de diseño se convierte en un problema de optimización, en el que mediante diversas iteraciones se busca una configuración “óptima” del amortiguador, que permite obtener sistemas más económicos que cumplen con las limitaciones impuestas. La optimización se ha realizado con MATLAB y ANSYS, consiguiendo en cada caso controlar la señal de desplazamientos

dentro de unos límites. La precisión obtenida en los resultados varía en función de cada caso, distinguiéndose dos casuísticas en función de los dos fenómenos estudiados:

- *Cable número 13 (Acción turbulenta del viento)*. En el caso del cable de mayor longitud analizado, sometido a la acción turbulenta del viento, los resultados obtenidos presentan gran precisión, permitiendo ajustar los máximos desplazamientos obtenidos a un límite impuesto. De esta forma, se consigue obtener el “tamaño” mínimo de amortiguador para mantener los desplazamientos dentro del umbral admisible.
- *Cable número 1 (Desprendimiento de vórtices)*. En este caso, se consigue controlar la señal dentro de los límites impuestos, pero el ajuste presenta menor precisión que en el caso anterior.

Se han analizado también diferentes tipos de amortiguadores, siendo para ello fundamental la modelización de su comportamiento. Esta tarea se ha realizado mediante el empleo de elementos generales incluidos en la biblioteca de ANSYS. Estos elementos, han permitido realizar un modelo de los amortiguadores con gran facilidad. Se han realizado análisis para los tres tipos de amortiguadores pasivos presentes en el mercado: amortiguador viscoso, amortiguador elastomérico y amortiguador de fricción. Se puede concluir lo siguiente de cada uno de ellos:

- *Amortiguador viscoso*: es el amortiguador cuya modelización es más sencilla, ya que presenta un comportamiento puramente viscoso, para lo que se ha empleado el elemento COMBIN14 de ANSYS incluyendo únicamente el parámetro C. Los valores obtenidos, han sido comparados directamente con los valores que arrojan metodologías como la curva universal de Pacheco o la metodología de Krenk. Los resultados de dicha comparación muestran que los valores obtenidos en la optimización propuesta, permiten cumplir con las limitaciones establecidas, empleando para ello un menor nivel de amortiguamiento. Esto supone un ahorro económico directo, ya que el precio de un sistema amortiguador aumenta normalmente a medida que aumenta su constante C.
- *Amortiguador elastomérico*: el amortiguador de tipo elastomérico o de goma se diferencia con el amortiguador viscoso en un elemento de tipo muelle, lo que en la práctica supone incluir una componente elástica (K). En los análisis desarrollados se ha llegado a la conclusión de los amortiguadores elastoméricos requieren un menor valor del parámetro C, a cambio de incluir la rigidez K.
- *Amortiguador de fricción*: este amortiguador presenta un comportamiento similar al amortiguador elastomérico, obteniéndose parámetros muy similares en el proceso de diseño. En este caso, el elemento empleado para la modelización incluye también un deslizador, que representa la fuerza que debe ser superada para que se produzca el deslizamiento entre las partes que componen el sistema. También se consiguen valores más pequeños de C que en

el amortiguador viscoso, pero se incluye a cambio la rigidez K y la fuerza del deslizador.

En definitiva, en los análisis numéricos desarrollados se pone de manifiesto la eficacia de los sistemas amortiguadores, pues en todos los casos analizados se consigue reducir considerablemente la respuesta en desplazamientos de los cables, obteniendo valores máximos por debajo de los límites establecidos.

El proceso de optimización ha resultado ser eficaz para el diseño de los amortiguadores, obteniendo los parámetros óptimos en relación a la función objetivo establecida. Sin embargo, uno de los problemas encontrados en el uso de algoritmos genéticos ha sido el alto coste computacional de los análisis. A pesar de tratarse de un sistema estructural sencillo, compuesto por pocos elementos, la gran longitud de la señal de viento necesaria para caracterizar correctamente el comportamiento de los cables, hace que cada análisis requiera un tiempo de computación elevado. Sumado a que el algoritmo necesita realizar diversas iteraciones para obtener una solución, provoca que los tiempos de cálculo sean elevados.

En definitiva, los sistemas de amortiguación de tipo pasivo en cables, resultan una alternativa de gran eficacia, ya que permiten reducir la respuesta de la estructura ante acciones dinámicas, incluso en condiciones de resonancia.

6.2. Desarrollos futuros

En el presente trabajo se ha abordado un enfoque de diseño mediante la optimización con algoritmos genéticos, que ha permitido llegar a las conclusiones presentadas en el punto anterior. Sin embargo, el hecho de ser este un trabajo académico y de suponer la primera aproximación a la optimización de amortiguadores de cables, hace que se abran a partir de ahora nuevos posibles desarrollos en relación a los análisis presentados. Algunos de ellos se resumen a continuación.

- La evaluación experimental de los modelos aquí empleados. Mediante medidas experimentales del amortiguamiento y la respuesta en cables en situación de servicio, se podría evaluar el nivel de precisión de los análisis realizados. Se plantea la posibilidad de utilizar modelos más precisos de los amortiguadores a partir de datos de ensayos de laboratorio o medidas experimentales, de forma que el diseño de estos aumente en precisión.
- Una extensión de la evaluación del sistema cable-amortiguador sería el estudio de la eficacia de combinar varios amortiguadores en un mismo cable, o incluso combinar un amortiguador con otros sistemas alternativos, como los cables cruzados transversalmente.
- Extender los análisis realizados a los amortiguadores de tipo activo o semi-activo, además de ampliar el uso de los amortiguadores para tareas como la protección sísmica.
- En cuanto al proceso de optimización, se podrían considerar otros algoritmos de

optimización, para mejorar la convergencia de la solución y reducir los tiempos de computación.

7 REFERENCIAS

- Ahn, S.-S., Park, J.-H., Lee, S.-H., & Park, C. M. (s.f.). Behaviour comparison of cable dampers by full-scale experiment.
- Annan Rachid et al. (s.f.). Friction dampers for stay cables dynamic stability on Incheon Bridge.
- Aparicio, A. C., & Casas, J. R. (1997). The Alamillo cable-stayed bridge: special issues faced in the analysis and construction.
- Asami, T., Nishihara, O., & Baz, A. M. (April de 2002). Analytical Solutions to H infinity and H2 Optimization of Dynamic Vibration Absorbers Attached to Damped Linear Systems. *Transactions of the ASME*, 124.
- BBR. (2014). Strand Stay Cable Damping Systems. BBR VT International LTD.
- Carassale, L. (s.f.). A Brief Summary of Theoretical Backgrounds in VORTEX-Winds On-line Wind Simulator (VOWS).
- Casas, J. R. (1994). A Combined Method for Measuring Cable Forces: The Cable-Stayed Alamillo Bridge, Spain. IABSE.
- Casas, J. R., & Aparicio, A. C. (2009). Rain-wind-induced cable vibrations in the Alamillo cable-stayed bridge (Sevilla, Spain). Assessment and remedial action. *Structure and Infrastructure Engineering*.
- CEN. (2006). EN 1993-1-11, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.11: design of structures with tension components. Brussels: CEN.
- CFCSL. (2015). *Carlos Fernandez Casado Oficina de Proyectos*. Obtenido de cfcsl: www.cfcsl.com
- Cheng, S., Darivandi, N., & Ghrib, F. (2010). The design of an optimal viscous damper for a bridge stay cable using energy-based approach. *Journal of Sound and Vibration*.
- Connor, J., & Laflamme, S. (2014). *Structural Motion Engineering*. Cambridge, USA: Springer.
- Crémona, C. (1997). Courbe Universelle pour le Dimensionnement d' Amortisseurs en Pied de Haubans. *Revue Française de Génie Civil*, 1(1), 197-159.
- Cremona, C. (s.f.). A generalisation of the Pacheco's curve for linear damper design. Laboratoire

Central des Ponts et Chaussées.

DSI. (s.f.). DYWIDAG Multistrand Stay Cable Systems. DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL.

Eurocode 1: Actions on Structures-General Actions-Part 1-4: wind actions. (s.f.).

FHWA. (2007). *Wind-Induced Vibration of Stay Cables*. Federal Highway Transportation.

FHWA. (2014). Mitigation of Wind-Induced Vibration of Stay Cables: Numerical Simulations and Evaluations. *FHWA-HRT-14-049*. Federal Highway Administration.

FIB. (2003). Recommendations for the acceptance of stay cable systems using prestressing steels. (F. I. Beton, Ed.) Lausanne: Federation International du Beton.

Finley Engineering Group . (Febrero de 2017). *Finley Engineering Group*. Obtenido de <https://finleyengineeringgroup.com/projects/brotonne-bridge-france/>

Flores, M. R. (Agosto de 2011). Estudio analítico del mecanismo de vibración inducido por el viento en los tirantes de un puente. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Fogel, L. (1963). *Biotechnology: Concepts and Applications*. Prentice-Hall.

Freyssinet. (2008). Ficha técnica Amortiguador IRD. *FT ES 0021*.

Fujino, Y., & Yamaguchi, H. (1998). Stayed cable dynamics and its vibration control. *Bridge Aerodynamics*.

Gidewon, T. G. (July de 2015). Dynamics of Footbridges Through Operational Modal Analysis and Vibration Control using Tuned Mass Dampers. *Thesis*.

Hansen et al. (1998). Sunnigesund Cable-Stayed Bridge. Investigation of Wind effects. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

Hikami, Y. (1986). Rain Vibrations of Cables of a Cable-Stayed Bridge. *Journal of Wind Engineering*, 27, 17-28.

Hikami, Y., & Shiraishi, N. (1988). Rain-Wind Induced Vibrations of Cables in Cable-Stayed Bridges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 29, 409-418.

Hoang, N., & Fujino, Y. (2007). Analytical study on bending effects in a stay cable with a damper. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 133(11), 1241-1246.

Huang, L. (2011). Experimental Study on Bridge Stay Cable Vibration Mitigation Using External Viscous Damper. *Electronic Theses and Dissertations, Paper 80*.

Irvine, H. M., & Caughey, T. (1974). The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 341, 299-315.

Kovács, I. (1982). Zur Frage der Seilschwingungen und der Seildämpfung. *Die Bautechnik*, 10, 325-

- Krenk, S. (December de 2000). Vibration of a Taut Cable with an External Damper. *Transactions of the ASME*, 67, 772-776.
- Krenk, S., & Hogsberg, J. R. (2005). Damping of cables by a transverse force. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 131(4), 340-348.
- Krenk, S., & Nielsen, S. (2002). Vibrations of a shallow cable with a viscous damper. *Proceedings of the Royal Society of London Series A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences)*, 458(2018), 339-357.
- Kwon, D. K., Carassale, L., & Kareem, A. (2011). VORTEX-Winds on-line wind simulator (VOWS) : on-line simulation of Gaussian three-dimensional multivariate wind fields. NatHaz Modeling Laboratory Report, Univ. of Notre Dame, <https://www.vortex-winds.org/drupal/?q=node/1004/>.
- Kwon, D., & Kareem, A. (2006). NatHaz on-line wind simulator (NOWS) : simulation of Gaussian multivariate wind fields. NatHaz Modeling Laboratory Report, Univ. of Notre Dame, <http://windsim.ce.nd.edu/>.
- Main, J. A., & Jones, N. P. (Octubre de 2002). Free vibrations of taut cable with attached damper. I: Linear Viscous Damper . *Journal of engineering mechanics*.
- Main, J. A., & Jones, N. P. (Octubre de 2002). Free vibrations of taut cable with attached damper. II: Nonlinear Damper. *Journal of engineering mechanics*.
- Maji, A., & Qiu, Y. (2011). Experimental study of Cable Vibration Damping. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. The Society for Experimental Mechanics.
- Manterola, A. J., Martinez, C. A., & Muñoz-Rojas, J. (s.f.). Puente sobre el río Guadalquivir en la ronda oeste de Córdoba. *III Congreso de ACHE de puentes y estructuras. Las estructuras del Siglo XXI. Sostenibilidad, innovación y retos del futuro*. ACHE.
- Mathworks*. (2017). Obtenido de Determinación de los mínimos globales para problemas altamente no lineales: <https://es.mathworks.com>
- Matsumoto, M., Shiraishi, H., & Shirato, H. (1992). Rain Wind Excitation of Cables on Cable-Stayed Bridges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 44, 2011-2022.
- Maurer Söhne. (Enero de 2006). Maurer Cable Damper Systems. Germany: Structural Protection Systems.
- Mehrabi, A., & Tabatabai, H. (1998). Unified finite difference formulation for free vibration of cables. *Journal of Structural Engineering*, 124(11), 1313-1322.

- Pacheco, B., Fujino, Y., & Sulekh, A. (1993). Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper. *Journal of Structural Engineering*, 119(6), 1961-1979.
- Pozos-Estrada, A., Flores, R., & Gómez, R. (2016). Parametric Study of Stay Cables of a Bridge Under Simulated Spatially Correlated Turbulent Wind. *Latin American Journal of Solids and Structures*.
- PTI Guide Specification. (2000). Recommendations for stay cable design, testing and installation. Phoenix: Post-Tensioning Institute.
- PuenteMania*. (2011). Obtenido de <http://www.puentemania.com>.
- Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systems nach Prinzipen der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog Verlag. Stuttgart.
- Reeves, C. R., & Rowe, J. E. (2003). *Genetic Algorithms-Principles and Perspectives. A Guide to GA Theory*. Kluwer Academic Publishers.
- Sá Caetano, E. d. (2007). *Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges*. Porto: IABSE.
- Saito, T., Matsumoto, M., & Kitazawa, M. (1994). Rain-Wind excitation of cables on cable-stayed Higashi-Kobre Bridge and cable vibration control. *Proceedings of the International Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridges (AFPC)*, 2, págs. 507-514. Deauville, France.
- Sanchez, d. P., Troitin, N., & Ladret, P. (2016). Sistema de atirantamiento del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz. *Hormigón y Acero*. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE).
- Schwefel, H.-P. (1977). *Numerische Optimierung von Computer-modellen mittels der Evolutionsstrategie*, Birkhäuser Verlag, Basel. (English edition: *Numerical Optimization of Computer Models*) . Chichester: John Wiley & Sons.
- SETRA. (Junio de 2002). Cable Stays. *Recommendations of French interministerial commission on Prestressing*. Francia.
- Simiu, E., & Scanlan, R. (1996). *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to design*. USA: John Wiley & Sons.
- Stiemer, S., Taylor, P., & Vincent, D. (1988). Full Scale Dynamic Testing of the Annacis Bridge. *IABSE Periodica*, 1-16.
- Symans, M. D., & Constantinou, M. (1999). Semi-active Control Systems for Seismic Protection of Structures: A State-of-the-Art review. *Engineering Structures*, 21, 469-487.
- Tabatabai, H., & Mehrabi, A. (2000). Evaluation of Various Damping Treatments for Stay Cables.

Proceedings for IMAC XVIII, 836-841.

- Valdebenito, G. E., & Aparicio, A. C. (Junio de 2005). Comportamiento sísmico de Puentes Atirantados y Disipación de Energía Adicional: Un Estado del Conocimiento. *Monografías de Ingeniería Sísmica*. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Valdebenito, G. E., & Aparicio, A. C. (2009). *Seismic Protection of Cable-Stayed Bridges Applying Fluid Viscous Dampers-Monograph Series in Earthquake Engineering*. Barcelona: CIMNE.
- VSL. (2013). Damping Systems for Stay Cables. VSL International LTD.
- Wagner, P., & Fuzier, J.-P. (2003). Health Monitoring of Structures with Cables-Which Solutions. Dissemination of the Results of the IMAC European Project. *Fifth International Symposium on Cable Dynamics*. Santa Margherita Ligure, Italy.
- Weber, F., Feltrin, G., & Huth, O. (2006). SAMCO Final Report F05, Guidelines for Structural. Switzerland.
- Wianecki, J. (1979). Cables Wind Excited Vibrations of Cable-Stayed Bridges. *Proceedings of the 5th International Conference of Wind Engineering*, (págs. 1381-1393). Colorado.
- WordPress. (2017).
- Xu, Y. L., & Wang, L. Y. (2002). Analytical study of wind-rain-induced cable vibration: SDOF Model. Elsevier.
- Y. Fujino et al. (2012). Wind Resistant Design of Bridges in Japan. Springer.
- Yoneda, M., & Maeda, K. (1989). A Study on Practical Estimation Method for Structural Damping of Stay Cable with Damper. *Canada-Japan Workshop on Bridge Aerodynamics*, (págs. 119-128). Ottawa.
- Zhou, H. (2005). Analytical and Experimental Studies on Vibration Control of Stays.