

## Índice de contenidos

Resumen	5
Abstract	7
Resum	9
<b>CAPÍTULO 1. Introducción, contenido y objetivos de la Tesis Doctoral</b>	<b>19</b>
1.1 Antecedentes .....	19
1.2 Fenómenos de resonancia en puentes de ferrocarril .....	22
1.3 Control Pasivo de Estructuras. Amortiguadores fluido-viscosos .....	26
1.4 Objetivos de la Tesis Doctoral .....	30
1.5 Contenido de la Tesis Doctoral .....	31
<b>CAPÍTULO 2. Cálculo dinámico y reacondicionamiento de puentes de FFCC</b>	<b>33</b>
2.1 Orígenes del cálculo dinámico de puentes de ferrocarril .....	34
2.2 Los trabajos de la ORE y el ERRI en la segunda mitad del s. XX .....	37
2.3 Contribuciones científicas más relevantes de los últimos años .....	38
2.3.1 Modelización del comportamiento del vehículo .....	39
2.3.2 Modelización del comportamiento del puente .....	43
2.4 Reacondicionamiento de puentes de ferrocarril con EDP .....	46
2.4.1 Reacondicionamiento de puentes de ferrocarril mediante TMD .....	47
2.4.2 Reacondicionamiento de puentes de ferrocarril mediante elementos VE .....	49
2.4.3 Reacondicionamiento de puentes de ferrocarril mediante FD .....	50
2.4.4 Reacondicionamiento de puentes de ferrocarril mediante FVD .....	51
2.4.5 Aplicación de sistemas de amortiguación continuos a la reducción de vibraciones transversales en vigas: sistema de viga doble .....	51
2.4.6 Publicaciones recientes derivadas de la Tesis Doctoral .....	53

2.5	Conclusiones .....	54
<b>CAPÍTULO 3. Descripción del sistema de reacondicionamiento</b>		<b>57</b>
3.1	Introducción .....	58
3.2	Control pasivo de estructuras .....	58
3.3	Selección de FVD frente a resto de EDP.....	62
3.4	Disipadores fluido-viscosos con sello laberíntico.....	64
3.5	Modelo constitutivo de un FVD .....	67
3.6	Especificaciones técnicas .....	70
3.7	Concepción de la estructura auxiliar: Ensayos de Choo con elementos VE .....	71
3.8	Reacondicionamiento basado en celosía metálica auxiliar .....	73
3.9	Solución final: Reacondicionamiento basado en vigas auxiliares.....	76
<b>CAPÍTULO 4. Modelos numéricos implementados</b>		<b>79</b>
4.1	Introducción .....	80
4.2	Modelo numérico bidimensional .....	80
4.3	Modelo numérico tridimensional .....	82
4.3.1	Elemento placa triangular de 12 gdl. Construcción de matrices de masa y rigidez a nivel de elemento .....	83
4.3.2	Procedimiento de mallado .....	93
4.3.3	Modelización de los apoyos de neopreno del tablero .....	96
4.3.4	Construcción de matrices globales. Introducción en la formulación del sistema de reacondicionamiento .....	97
4.3.5	Simulación del efecto de reparto de cargas .....	99
4.3.6	Programa DYNARET. Análisis implementados.....	101
4.4	Limitaciones del modelo numérico.....	104
<b>CAPÍTULO 5. Modelo bidimensional. Optimización y dimensionado</b>		<b>107</b>
5.1	Descripción del modelo numérico bidimensional.....	108
5.2	Formulación de las ecuaciones de movimiento del sistema sometido a un tren de cargas puntuales.....	110
5.2.1	ED de movimiento en coordenadas espaciales de una viga	

	simplemente apoyada sometida a una distribución de carga genérica.....	110
5.2.2	ED de movimiento de una viga simplemente apoyada sometida a un tren de cargas puntuales en coordenadas modales.....	113
5.2.3	ED de movimiento del sistema reacondicionado en coordenadas modales.....	115
5.3	Formulación de las ecuaciones de movimiento del sistema sometido a excitación armónica.....	117
5.3.1	Formulación adimensional del problema y obtención de la solución particular.....	117
5.3.2	Estudio paramétrico de la respuesta de la viga principal.....	121
5.4	Optimización del sistema de reacondicionamiento.....	126
5.4.1	Expresiones de la tasa de amortiguamiento externa óptima.....	127
5.4.2	Efecto del amortiguamiento estructural en la predicción de la tasa de amortiguamiento óptima.....	130
5.4.3	Estimación de la tasa de amortiguamiento global de la viga principal.....	136
5.4.3.1	Justificación del procedimiento de estimación del amortiguamiento de la viga principal tras el reacondicionamiento.....	138
5.4.3.2	Selección del tamaño de la viga auxiliar a partir de las necesidades de amortiguamiento estimadas en la viga principal.....	142
5.4.4	Incertidumbre en la determinación de la masa del puente debido a la interacción vehículo-estructura.....	145
5.5	Cálculo dinámico de puentes reacondicionados sometidos al paso de trenes de cargas puntuales.....	148
5.5.1	Casos de estudio.....	149
5.5.2	Consideraciones sobre el cálculo dinámico: número de modos y cálculo de esfuerzos.....	150
5.5.3	Comportamiento dinámico previo al reacondicionamiento.....	154
5.5.4	Estudio paramétrico en función de $h$ y $\zeta_D$ .....	158
5.5.5	Dimensionado de la viga auxiliar a partir de las necesidades de amortiguamiento total del puente.....	166
5.5.6	Comparación de la respuesta dinámica original y reacondicionada.....	169
5.5.7	Efecto de la interacción vehículo-estructura en casos reales.....	173
5.6	Conclusiones.....	174

<b>CAPÍTULO 6. Modelo tridimensional. Optimización y dimensionado</b>	<b>177</b>
6.1 Descripción del modelo numérico tridimensional.....	178
6.2 ED de movimiento de una placa delgada ortótropa.....	181
6.3 Formulación de las ecuaciones de movimiento del tablero reacondicionado sometido a un tren de cargas puntuales.....	186
6.3.1 ED de movimiento de la placa ortótropa en vibración libre .....	186
6.3.2 ED de movimiento de la placa ortótropa sometida a un tren de cargas puntuales en coordenadas modales.....	189
6.3.3 ED de movimiento del sistema reacondicionado sometido a un tren de cargas puntuales en coordenadas modales.....	191
6.4 Análisis dinámico del sistema sometido a excitación armónica.....	197
6.4.1 Formulación adimensional y obtención de la solución particular .....	197
6.4.1.1 Solución particular en términos de desplazamientos.....	205
6.4.1.2 Solución particular en términos de aceleraciones .....	211
6.4.2 Estudio paramétrico de la respuesta dinámica del tablero.....	214
6.4.2.1 Estudio paramétrico de las amplitudes modales .....	214
6.4.2.2 Estudio paramétrico de la respuesta dinámica en un punto genérico .....	217
6.4.2.3 Influencia en la respuesta de la posición de las vigas auxiliares .....	239
6.5 Optimización del sistema de reacondicionamiento.....	242
6.5.1 Expresiones analíticas de las tasas de amortiguamiento óptimas .....	243
6.5.1.1 Tasas de amortiguamiento óptimas asociadas al desplazamiento.....	243
6.5.1.2 Tasas de amortiguamiento óptimas asociadas a la aceleración.....	252
6.5.2 Efecto de la participación modal y el amortiguamiento estructural en la predicción de la tasa de amortiguamiento óptima .....	256
6.5.3 Procedimiento de dimensionado del sistema de reacondicionamiento propuesto.....	262
6.6 Conclusiones .....	270

<b>CAPÍTULO 7. Cálculo dinámico y reacondicionamiento de puentes reales</b>	<b>275</b>
7.1	Introducción ..... 276
7.2	Cálculo de las propiedades nominales del tablero ..... 277
7.2.1	Cálculo de constantes de ortotropía en tableros de vigas..... 277
7.2.2	Estimación de la masa y amortiguamiento estructural ..... 281
7.2.3	Cálculo de la rigidez vertical equivalente de los apoyos de neopreno ..... 282
7.3	Procedimiento de calibración del modelo numérico ..... 284
7.4	Condiciones de resonancia y cancelación ..... 286
7.5	Puente Arroyo Bracea II..... 290
7.5.1	Ubicación..... 290
7.5.2	Descripción de la estructura. Propiedades nominales del modelo..... 291
7.5.3	Calibración del modelo numérico ..... 293
7.5.4	Cálculo dinámico del puente a la velocidad de explotación actual..... 297
7.5.5	Acondicionamiento de la línea a 350 km/h..... 306
7.5.6	Dimensionado del sistema de reacondicionamiento ..... 310
7.5.7	Respuesta de la estructura reacondicionada ..... 314
7.5.8	Comprobación del coeficiente de impacto..... 324
7.5.9	Comprobación numérica de las constantes óptimas de los FVD ..... 327
7.5.10	Comprobación del número de modos de vibración considerados..... 333
7.6	Puente sobre Río Guadiana ..... 337
7.6.1	Ubicación..... 337
7.6.2	Descripción de la estructura. Propiedades nominales del modelo..... 337
7.6.3	Calibración del modelo numérico ..... 340
7.6.4	Cálculo dinámico del puente a velocidad de explotación de 250 km/h ..... 342
7.6.5	Dimensionado del sistema de reacondicionamiento ..... 349
7.6.6	Respuesta de la estructura reacondicionada ..... 353
7.6.7	Comprobación del coeficiente de impacto..... 360
7.6.8	Comprobación numérica de las constantes óptimas de los FVD ..... 362
7.6.9	Comprobación del número de modos de vibración considerados..... 367
7.7	Conexión de los FVD a la losa de reparto. Análisis de la deformabilidad local ..... 371
7.7.1	Cálculo dinámico simplificado incluyendo la rigidez local ..... 372
7.7.1.1	Efecto de la rigidez local en los puentes de estudio ..... 375

7.7.1.2	Estudio paramétrico de la respuesta de un tablero genérico.....	378
7.7.2	Análisis tridimensional por Elementos Finitos .....	383
7.8	Viabilidad económica de los sistemas de reacondicionamiento .....	388
7.9	Efecto de los apoyos de neopreno .....	390
7.9.1	Puente Arroyo Bracea II .....	392
7.9.2	Puente sobre el Río Guadiana .....	398
7.10	Conclusiones .....	404
<b>CAPÍTULO 8. Conclusiones y desarrollos futuros</b>		<b>409</b>
8.1	Resumen del trabajo realizado .....	410
8.2	Aportaciones originales.....	413
8.3	Conclusiones .....	414
8.4	Líneas de investigación propuestas.....	416
<b>ANEXO A. Trenes de cargas para el cálculo dinámico</b>		<b>419</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>		<b>429</b>