

ÍNDICE

| | |
|--|------------------|
| <u>1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y CONTENIDO.....</u> | <u>1</u> |
| 1.1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL | 10 |
| 1.3. CONTENIDO DE LA TESIS DOCTORAL..... | 12 |
| <u>2. CÁLCULO DINÁMICO Y REACONDICIONAMIENTO DE PUENTES DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD: ESTADO DEL ARTE</u> | <u>15</u> |
| 2.1. ORÍGENES Y EVOLUCIÓN DEL CÁLCULO DINÁMICO DE LOS PUENTES DE FERROCARRIL..... | 15 |
| 2.2. MODELOS NUMÉRICOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA PUENTE-VEHÍCULO | 18 |
| 2.3. REACONDICIONAMIENTO DE PUENTES DE FERROCARRIL CON ELEMENTOS DE DISIPACIÓN PASIVA (EDP) | 24 |
| 2.4. OTRAS CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS RELACIONADAS CON EL EMPLEO DE VED COMO DISIPADORES PASIVOS | 29 |
| 2.5. CONCLUSIONES | 34 |
| <u>3. FENÓMENOS DE RESONANCIA Y CANCELACIÓN EN PUENTES DE FERROCARRIL ISOSTÁTICOS.....</u> | <u>37</u> |

| | |
|---|----|
| 3.1. INTRODUCCIÓN | 37 |
| 3.2. VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UNA CARGA MÓVIL AISLADA CIRCULANDO SOBRE UNA VIGA | 40 |
| 3.2.1. Viga simplemente apoyada | 40 |
| 3.2.1.1. Condiciones de máxima vibración libre..... | 45 |
| 3.2.1.2. Condiciones de cancelación | 49 |
| 3.2.2. Viga elásticamente apoyada | 53 |
| 3.2.2.1. Condiciones de máxima vibración libre..... | 61 |
| 3.2.2.2. Condiciones de cancelación..... | 62 |
| 3.2.2.3. Expresión aproximada para la determinación de las velocidades de cancelación del primer modo de vibración | 64 |
| 3.3. VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UN TREN DE CARGAS MÓVILES CIRCULANDO SOBRE UNA VIGA | 67 |
| 3.3.1. Cancelación de resonancias | 69 |
| 3.3.1.1. Viga simplemente apoyada | 69 |
| 3.3.1.2. Viga elásticamente apoyada | 70 |
| 3.3.2. Máxima resonancia..... | 71 |
| 3.3.3. Influencia de la rigidez de los apoyos elásticos en la amplitud de las resonancias del primer modo de vibración | 74 |
| 3.4. EJEMPLO NUMÉRICO..... | 77 |
| 3.5. GENERALIZACIÓN A PLACAS RECTANGULARES ORTÓTROPAS | 79 |
| 3.6. EFECTO DE LA INTERACCIÓN VÍA-ESTRUCTURA EN LAS VELOCIDADES DE CANCELACIÓN | 85 |
| 3.7. CONCLUSIONES..... | 91 |

**4. CÁLCULO DINÁMICO DE PUENTES DE FFCC ISOSTÁTICOS DE
LUCES MODERADAS..... 95**

| | |
|---|-----|
| 4.1. INTRODUCCIÓN | 95 |
| 4.2. PUENTES ANALIZADOS | 98 |
| 4.2.1. Tableros característicos de líneas convencionales | 102 |
| 4.2.1.1. Losas macizas | 102 |
| 4.2.1.2. Puentes de vigas..... | 104 |
| 4.2.2. Tableros característicos de líneas de ferrocarril de AV de nueva construcción | 107 |
| 4.2.2.1. Losas aligeradas..... | 107 |

| | |
|--|-----|
| 4.3. MODELOS NUMÉRICOS IMPLEMENTADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS TABLEROS DIMENSIONADOS..... | 109 |
| 4.3.1. Introducción al análisis de tableros por el método de la placa ortótropa..... | 110 |
| 4.3.2. Modelo de placa ortótropa para puentes de vigas y losas macizas | 111 |
| 4.3.3. Modelo de placa ortótropa para las tipologías aligeradas | 113 |
| 4.3.4. Resolución de las ecuaciones de movimiento de los modelos numéricos por Superposición Modal | 115 |
| 4.3.5. Limitaciones de los modelos numéricos implementados | 118 |
| 4.4. ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS TABLEROS DE ESTUDIO | 119 |
| 4.4.1. Cálculo de constantes de ortotropía | 119 |
| 4.4.1.1. Tablero de losa sobre vigas pretensadas | 119 |
| 4.4.1.2. Tablero de losa maciza | 123 |
| 4.4.1.3. Tablero de losa aligerada..... | 124 |
| 4.4.2. Estimación de la masa y amortiguamiento estructural | 126 |
| 4.4.3. Estimación de la rigidez vertical de los apoyos elásticos..... | 129 |
| 4.4.3.1. Apoyos de neopreno zunchado | 129 |
| 4.4.3.2. Apoyos tipo pot | 134 |
| 4.4.4. Resumen de las propiedades mecánicas de los tableros | 135 |
| 4.5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS | 138 |
| 4.5.1. Descripción general | 138 |
| 4.5.2. Nomenclatura adoptada..... | 140 |
| 4.5.3. Postproceso y presentación de resultados..... | 141 |
| 4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 144 |
| 4.6.1. Comentarios relativos a las frecuencias de vibración, formas modales y puntos críticos de postproceso en los tableros..... | 144 |
| 4.6.1.1. Frecuencias propias | 144 |
| 4.6.1.2. Formas modales | 147 |
| 4.6.1.3. Puntos críticos de postproceso..... | 151 |
| 4.6.2. Comportamiento dinámico de los tableros en función de su tipología y luz | 153 |
| 4.6.2.1. Losas macizas | 153 |
| 4.6.2.2. Puentes de vigas | 155 |
| 4.6.2.3. Losas aligeradas | 166 |

| | |
|--|------------|
| 4.6.3. Efecto de la contribución de modos superiores al fundamental sobre la respuesta dinámica | 168 |
| 4.6.3.1. Losas macizas | 168 |
| 4.6.3.2. Puentes de vigas..... | 170 |
| 4.6.3.3. Losas aligeradas..... | 172 |
| 4.6.4. Influencia de la rigidez de los apoyos elásticos en la respuesta dinámica de los tableros..... | 174 |
| 4.6.4.1. Tipología de losa maciza..... | 175 |
| 4.6.4.2. Puentes de vigas..... | 182 |
| 4.7. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DE PLACA ORTÓTropa EMPLEADOS EN EL ESTUDIO..... | 193 |
| 4.7.1. Validación del modelo numérico de placa ortótropa para el análisis de puentes de vigas | 195 |
| 4.7.1.1. Modelo de placa isotrópica sobre vigas | 195 |
| 4.7.1.2. Comprobaciones realizadas..... | 197 |
| 4.7.1.3. Resultados estáticos | 198 |
| 4.7.1.4. Resultados dinámicos | 202 |
| 4.7.1.5. Conclusiones..... | 205 |
| 4.7.2. Validación del modelo numérico de placa ortótropa para el análisis de losas aligeradas | 206 |
| 4.7.2.1. Modelo de EF sólidos..... | 206 |
| 4.7.2.2. Comprobaciones realizadas..... | 208 |
| 4.7.2.3. Resultados dinámicos | 209 |
| 4.7.2.4. Conclusiones..... | 214 |
| 4.8. CONCLUSIONES GENERALES | 214 |
| | |
| <u>5. REACONDICIONAMIENTO DE PUENTES DE FFCC EXISTENTES MEDIANTE AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS.....</u> | 219 |
| 5.1. INTRODUCCIÓN | 219 |
| 5.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS | 222 |
| 5.3. MODELOS NUMÉRICOS PARA AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS..... | 230 |
| 5.3.1. Modelos clásicos | 230 |
| 5.3.2. Modelos basados en la derivada fraccional | 234 |
| 5.4. SISTEMA DE REACONDICIONAMIENTO PROPUESTO | 235 |

| | |
|--|-----|
| 5.5. JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DE VED EN EL SISTEMA DE REACONDICIONAMIENTO..... | 236 |
| 5.6. MODELO BIDIMENSIONAL PRELIMINAR PARA EL ESTUDIO DEL REACONDICIONAMIENTO..... | 237 |
| 5.6.1. Descripción general..... | 237 |
| 5.6.2. Modelo preliminar de VED: modelo de Kelvin..... | 240 |
| 5.6.3. Formulación de las ecuaciones de movimiento del sistema reacondicionado sometido a un tren de cargas móviles | 244 |
| 5.6.4. Formulación de las ecuaciones de movimiento del sistema reacondicionado ante excitación senoidal..... | 247 |
| 5.6.5. Análisis paramétrico de la respuesta de la viga principal reacondicionada..... | 253 |
| 5.7. MODELO NUMÉRICO BASADO EN LA DERIVADA FRACCIONAL | 259 |
| 5.7.1. Introducción..... | 259 |
| 5.7.2. Modelo de VED basado en la derivada fraccional | 262 |
| 5.7.3. Formulación de las ecuaciones de movimiento del sistema reacondicionado sometido a un tren de cargas móviles | 266 |
| 5.7.4. Algoritmo para la integración numérica del sistema de ecuaciones del modelo..... | 269 |
| 5.8. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA REACONDICIONADO CON VED | 273 |
| 5.8.1. Determinación de la tasa de amortiguamiento ζ_D óptima..... | 274 |
| 5.8.2. Estimación de la tasa de amortiguamiento introducida por el sistema de reacondicionamiento en la viga principal | 280 |
| 5.8.3. Relación entre las NECESIDADES de amortiguamiento del puente y el canto de la viga auxiliar | 284 |
| 5.9. PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE REACONDICIONAMIENTO..... | 286 |
| 5.10. EJEMPLO DE APLICACIÓN: REACONDICIONAMIENTO DE UN PUENTE ISOSTÁTICO REAL | 288 |
| 5.10.1. Cálculo dinámico del tablero sin reacondicionar | 289 |
| 5.10.2. Estimación de las necesidades de amortiguamiento en el puente y selección del material viscoelástico..... | 291 |
| 5.10.3. Selección del canto mínimo de la viga auxiliar y del amortiguador óptimo..... | 294 |
| 5.10.4. Respuesta de la estructura reacondicionada | 297 |
| 5.11. CONCLUSIONES..... | 308 |

6. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS..... 313

6.1. INTRODUCCIÓN 313
6.2. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO 313
6.3. CONCLUSIONES..... 316
6.4. LINEAS DE INVESTIGACIÓN PROPUESTAS 320

BIBLIOGRAFÍA..... 323

ANEXO I. ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LOS APOYOS DE NEOPRENO ZUNCHADO..... 335

I.1. INTRODUCCIÓN 335
I.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DEL PUENTE VINIVAL..... 338
I.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DEL PUENTE ARROYO BRACEA 343
I.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DEL PUENTE ARGAMASILLA 347
I.5. CONCLUSIONES..... 352

ANEXO II. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE CONTRIBUCIONES MODALES Y DE LA FLEXIBILIDAD DE LOS APOYOS DE NEOPRENO. RESULTADOS 353

II.1. INTRODUCCIÓN..... 353
II.2. LOSAS MACIZAS..... 354
II.3. RESULTADOS PUENTES DE VIGAS..... 372
II.4. RESULTADOS LOSAS ALIGERADAS..... 393

ANEXO III. FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LOS APOYOS ELÁSTICOS 399

III.1. INTRODUCCIÓN 399
III.2. APUNTES DE PUENTES DE MANTEROLA [60] 399
III.3. STRUCTURAL ENGINEERING DOCUMENTS (IABSE) [81] 401
III.4. CATÁLOGO COMERCIAL MECANOGUMBA 401

ANEXO IV. TRENES DE CARGA PARA EL CÁLCULO DINÁMICO..403

| | |
|--|-----|
| IV.1. INTRODUCCIÓN | 403 |
| IV.2. TREN DINÁMICO UNIVERSAL (HSLM-A) | 403 |
| IV.3. TRENES REALES DE ALTA VELOCIDAD | 405 |