

# ÍNDICE

## RESUMEN

## CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.....	1.1
-------------------	-----

## CAPÍTULO 2

OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL .....	2.1
---	-----

## CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE .....	3.1
3.1.-Retazos históricos sobre la presolicitud de puentes .....	3.1
3.2.-Puentes presolicitados mediante tendones .....	3.4
3.3.-Puentes de tirantes de configuraciones no convencionales. Realizaciones .....	3.8
3.3.1.-Puentes con atirantamiento inferior .....	3.8
3.3.1.1.-Viaducto de Weitingen, sobre el río Neckar, Alemania (1978) .....	3.8
3.3.1.2.-Pasarelas de Gut Marienhof, Dietersheim, Alemania (1987) .....	3.13
3.3.1.3.-Paso Superior de Truc de la Fare, Francia (1993) .....	3.15
3.3.1.4.-Viaducto de Osormort, España (1995) .....	3.20
3.3.1.5.-Pasarela de Jumet. Bélgica (1998).....	3.23
3.3.1.6.-Puente de Losa del Obispo, España (1998).....	3.25
3.3.1.7.-Pasarela del “Tobu Recreation Resort”, Japón (1998) .....	3.27
3.3.1.8.-Puente de Glacis en Ingolstadt, Alemania (1998) .....	3.30
3.3.1.9.-Pasarela del mirador de Weil am Rhein, Alemania (1999) .....	3.34
3.3.1.10.-Puente de Takehana, Japón (2000).....	3.35
3.3.1.11.-Pasarela Morino-wakuwaku-hashí , Japón (2001) .....	3.37
3.3.1.12.-Pasarela sobre el río Numedalslagen. Noruega (2002).....	3.39
3.3.1.13.-Pasarela de Spinningfields, Manchester, Reino Unido (2004) .....	3.40
3.3.1.14.-Viaducto de Meaux. Francia (2004). .....	3.41
3.3.1.15.-Pasarela Bercy-Tolbiac, París, Francia (2004-2006).....	3.43
3.3.2.-Puentes con atirantamiento combinado superior e inferior .....	3.44
3.3.2.1.-Viaducto sobre el río Obere Argen. Baden-Württemberg, Alemania (1991).....	3.44
3.3.2.2.-Pasarela del Miho Museum. Japón (1997) .....	3.53
3.3.2.3.-Pasarela de Waschhaussteg, Lübzs, Alemania (1998) .....	3.58
3.3.2.4.-Pasarela de Hiyoshi. Kyoto, Japón (1998) .....	3.60
3.3.2.5.-Puente de acceso al Corte Inglés de Sanchinarro, España (2003).....	3.62
3.3.2.6.-Pasarela de la estación de Montabaur, Alemania (2003).....	3.64
3.4.-Puentes de tirantes de configuraciones no convencionales. Proyectos y Propuestas no construidos .....	3.65
3.4.1.-Puentes con atirantamiento inferior .....	3.65
3.4.1.1.-Puente de ferrocarril en Munich, Alemania (1982).....	3.65
3.4.1.2.-Paso superior de Kirchheim, Alemania (1987) .....	3.65
3.4.1.3.-Propuesta de Christian Menn para un viaducto (1987) .....	3.68
3.4.1.4.-Puente de Kämpfelbach, Alemania (1989).....	3.69
3.4.1.5.-Puente de Schornbachtal, Alemania (1989) .....	3.70
3.4.1.6.-Propuesta Zubi. Puente sobre el Vinalopó, España (1990) .....	3.72
3.4.1.7.-Propuesta para el viaducto de Millau, Francia (1994).....	3.73
3.4.1.8.-Pasarela de Graz, Austria (1996).....	3.73

3.5.-Investigaciones realizadas sobre puentes de tirantes no convencionales.....	3.74
3.5.1.-Investigación en la ETH, Zürich, Suiza.....	3.74
3.5.2.-Investigación en la Universidad de Stuttgart, Alemania .....	3.77
3.5.3.-Investigación en la Universidad de Leipzig, Alemania .....	3.79
3.5.4.-Investigación en el Instituto Federal Suizo de Tecnología, Lausanne, Suiza.....	3.79
3.5.5.-Investigación en la Universidad de Nihon, Japón .....	3.80
3.6.-Problemática específica de los puentes de tirantes no convencionales.....	3.83
3.6.1.-Resistencia a fatiga de los anclajes de tendones.....	3.83
3.6.1.1.- Anclajes convencionales de pretensado exterior.....	3.83
3.6.1.2.- Anclajes de puentes atirantados.....	3.84
3.6.2.-Verificación del ELS de Vibraciones .....	3.84
3.6.2.1.-Respuesta humana frente a las vibraciones .....	3.84
3.6.2.2.-Criterios de Verificación del ELS de Vibraciones .....	3.84
3.6.3.-Situación accidental de rotura de un tirante.....	3.86
3.6.4.-Coeficientes parciales en ELU para puentes de tirantes.....	3.87
3.6.5.-Construcción.....	3.87
3.6.5.1.-Tendencias actuales en la construcción de puentes.....	3.88

## **CAPÍTULO 4**

<b>BASES DEL ESTUDIO Y ALCANCE DE LAS SOLUCIONES CONSIDERADAS.....</b>	<b>4.1</b>
4.1.-Materiales.....	4.1
4.2.-Acciones.....	4.2
4.2.1.-Acciones permanentes .....	4.2
4.2.1.1.-Peso propio .....	4.2
4.2.1.2.-Carga muerta .....	4.2
4.2.1.3.-Pretensado.....	4.3
4.2.1.4.-Atirantado .....	4.3
4.2.2.-Acciones diferidas .....	4.3
4.2.2.1.-Retracción.....	4.3
4.2.2.2.-Fluencia .....	4.3
4.2.2.3.-Relajación del acero del pretensado interno.....	4.4
4.2.2.4.-Relajación del acero de los tirantes .....	4.4
4.2.3.-Sobrecarga de uso.....	4.5
4.2.3.1.-Acción estática.....	4.5
4.2.3.2.-Acción dinámica .....	4.5
4.2.4.-Temperatura.....	4.6
4.2.4.1.-Acciones térmicas consideradas.....	4.6
4.2.4.2.-Situaciones térmicas: Combinaciones de acciones térmicas .....	4.6
4.2.5.-Rotura accidental de tendones .....	4.6
4.3.-Evaluación de la respuesta de la estructura frente a las acciones consideradas.....	4.7
4.3.1.-Programa de cálculo electrónico empleado .....	4.7
4.3.2.-Respuesta frente a acciones permanentes a tiempo cero .....	4.7
4.3.3.-Respuesta frente a acciones permanentes a tiempo infinito .....	4.8
4.3.4.-Respuesta frente a la sobrecarga de uso .....	4.10
4.3.4.1.-Acción estática.....	4.10
4.3.4.2.-Acción dinámica .....	4.10
4.3.5.-Respuesta frente a la temperatura.....	4.11
4.3.6.-Respuesta ante la no linealidad mecánica y geométrica.....	4.12
4.3.6.1.-Influencia de la no linealidad mecánica .....	4.12
4.3.6.2.-Influencia de la no linealidad geométrica.....	4.12
4.3.7.-Respuesta frente a la rotura accidental de tendones .....	4.13

4.4.-Verificación de Estados límite .....	4.13
4.4.1.-Estados límite de servicio .....	4.13
4.4.1.1.-Estado Límite de Descompresión .....	4.13
4.4.1.2.-Estado Límite de Fisuración Controlada .....	4.14
4.4.1.3.-Estado Límite de Fisuración por Compresión .....	4.14
4.4.1.4.-Estado Límite de Vibraciones .....	4.14
4.4.2.-Estados límite últimos.....	4.14
4.4.2.1.-Estados límite últimos considerados .....	4.14
4.4.2.2.-Formato de seguridad empleado.....	4.16
4.5.-Aproximación al coste de las soluciones .....	4.18
4.5.1.-Unidades de obra valoradas cuantitativamente.....	4.18
4.5.2.-Unidades de obra valoradas cualitativamente.....	4.19
4.6.-Análisis previos para la determinación del ámbito del estudio.....	4.19
4.6.1-Parámetros que gobiernan la respuesta estructural de un puente con atirantamiento inferior. ....	4.19
4.6.1.1.-Puente con atirantamiento inferior con un puntal.....	4.19
4.6.1.1.1.- Parámetro adimensional que rige el comportamiento.....	4.19
4.6.1.1.2.- Respuesta estructural en función del parámetro adimensional .....	4.20
4.6.1.2.-Puente con atirantamiento inferior con múltiples puntales .....	4.22
4.6.1.2.1.- Parámetro adimensional que rige el comportamiento.....	4.22
4.6.1.2.2.- Respuesta estructural en función del parámetro adimensional.....	4.22
4.6.1.3.-Puente con atirantamiento inferior. Caso General.....	4.23
4.6.1.3.1.- Parámetro adimensional que rige el comportamiento.....	4.23
4.6.1.3.2.- Respuesta estructural en función del parámetro adimensional .....	4.24
4.6.2.-Análisis paramétricos previos.....	4.25
4.6.2.1.- Análisis para determinar el rango de luces de aplicación de las soluciones de un solo vano con atirantamiento inferior y con pretensado intradosal.....	4.25
4.6.2.2.- Análisis para determinar otros parámetros geométricos y grados de presolicitación .....	4.30
4.6.3.-Conclusiones de los estudios previos .....	4.30
4.7.-Tipos estructurales considerados en este trabajo .....	4.31
4.7.1.-Consideraciones generales acerca de lo distintos elementos estructurales que conforman el puente.....	4.31
4.7.1.1.- Tablero.....	4.31
4.7.1.2.- Pilonos .....	4.32
4.7.1.3.- Tirantes .....	4.32
4.7.1.4.- Puntales .....	4.35
4.7.1.5.- Contrapesos .....	4.35
4.7.2.-Tipos estructurales estudiados .....	4.36

## **CAPÍTULO 5**

<b>PUENTES DE UN SOLO VANO .....</b>	<b>5.1</b>
5.1.-Puentes pretensados convencionales.....	5.1
5.2.-Puentes con atirantamiento inferior .....	5.2
5.2.1.-Puentes con atirantamiento inferior con un puntal .....	5.3
5.2.2.-Puentes con atirantamiento inferior con dos puntales .....	5.14
5.2.3.-Puentes con atirantamiento inferior con múltiples puntales .....	5.26
5.3.-Puentes con atirantamiento combinado superior e inferior.....	5.41
5.3.1.-Puentes con atirantamiento combinado .....	5.41
5.3.2.-Puentes con atirantamiento combinado con pilonos inclinados .....	5.52
5.4.-Análisis comparativo de las soluciones adoptadas y elección de la solución o soluciones más adecuadas .....	5.60

5.5.-Respuesta no lineal .....	5.60
5.5.1.-No linealidad geométrica y mecánica en Puentes con atirantamiento inferior con dos puntales .....	5.60
5.5.2.- No linealidad geométrica y mecánica en Puentes con atirantamiento inferior con múltiples puntales .....	5.65
5.6.-Rotura accidental de tirantes. Comportamiento dinámico .....	5.73
5.6.1.-Rotura de tirantes en Puentes con atirantamiento inferior con dos puntales .....	5.73
5.6.2.-Rotura de tirantes en Puentes con atirantamiento inferior con múltiples puntales .....	5.83
5.7.-Criterios de diseño aplicables al proyecto de puentes de un solo vano con atirantamiento no convencional .....	5.84
5.7.1.-Puentes con atirantamiento inferior .....	5.84
5.7.2.-Puentes con atirantamiento combinado .....	5.86

## **CAPÍTULO 6**

<b>PUENTES CONTINUOS DE MÚLTIPLES VANOS .....</b>	<b>6.1</b>
6.1.-Puentes pretensados convencionales.....	6.1
6.2.-Puentes con atirantamiento inferior .....	6.3
6.2.1.-Puentes con atirantamiento inferior con un puntal .....	6.3
6.2.2.-Puentes con atirantamiento inferior con dos puntales .....	6.11
6.3.-Puentes con atirantamiento combinado superior e inferior.....	6.19
6.3.1.-Puentes con atirantamiento combinado con tendones pasantes.....	6.21
6.3.2.-Puentes con atirantamiento combinado con tendones anclados .....	6.30
6.4.-Análisis comparativo de las soluciones adoptadas y elección de la más adecuada .....	6.41
6.5.-Criterios de diseño aplicables al proyecto de puentes continuos con atirantamiento no convencional .....	6.43
6.5.1.-Puentes continuos con atirantamiento inferior .....	6.43
6.5.2.-Puentes semicontinuos con atirantamiento inferior .....	6.44
6.5.3.-Puentes continuos con atirantamiento combinado.....	6.44

## **CAPÍTULO 7**

<b>PUENTES DE DOS VANOS.....</b>	<b>7.1</b>
7.1.-Introducción.....	7.1
7.2.-Puentes con atirantamiento combinado .....	7.1
7.2.1.-Puentes con atirantamiento combinado con tendones anclados .....	7.1
7.3.-Criterios de diseño aplicables al proyecto de puentes de dos vanos con atirantamiento no convencional .....	7.12

## **CAPÍTULO 8**

<b>PUENTES DE TRES VANOS .....</b>	<b>8.1</b>
8.1.-Introducción .....	8.1
8.2.-Puentes con atirantamiento combinado .....	8.2
8.2.1.-Puentes con atirantamiento combinado con tendones pasantes.....	8.2
8.2.2.-Puentes con atirantamiento combinado con tendones anclados .....	8.12
8.3.-Análisis comparativo de las soluciones adoptadas y elección de la más adecuada .....	8.22
8.4.-Criterios de diseño aplicables al proyecto de puentes de tres vanos con atirantamiento no convencional .....	8.23
8.4.1.-Puentes continuos con atirantamiento inferior .....	8.23
8.4.2.-Puentes con atirantamiento combinado .....	8.23

## **CAPÍTULO 9**

<b>SUPRESIÓN DE UNA PILA CENTRAL EN UN VIADUCTO.....</b>	<b>9.1</b>
9.1.-Introducción.....	9.1
9.2.-Supresión de una pila central mediante atirantamiento inferior .....	9.2
9.2.1.-Supresión mediante atirantamiento inferior con un puntal.....	9.2
9.2.2.-Supresión mediante atirantamiento inferior con dos puntales .....	9.10
9.2.3.-Supresión mediante atirantamiento inferior creando un vano independiente.....	9.17
9.3.-Supresión de una pila central mediante atirantamiento combinado.....	9.18
9.3.1.-Supresión mediante atirantamiento combinado pasante.....	9.19
9.4.-Análisis comparativo de las soluciones adoptadas y elección de la más adecuada .....	9.26
9.5.-Criterios de diseño aplicables al proyecto de puentes en los que se ha suprimido una pila central mediante el atirantamiento no convencional .....	9.27
9.5.1.-Supresión mediante la disposición de un atirantamiento intradosal manteniendo la continuidad del tablero.....	9.27
9.5.2.-Supresión mediante la disposición de un vano con atirantamiento intradosal y dos viaductos de acceso independientes.....	9.28
9.5.3.-Supresión mediante la disposición de un atirantamiento combinado manteniendo la continuidad del tablero.....	9.28

## **CAPÍTULO 10**

<b>SUPRESIÓN DE LA PILA EXTREMA DE UN VIADUCTO.....</b>	<b>10.1</b>
10.1.-Introducción.....	10.1
10.2.-Supresión de una pila extrema mediante atirantamiento inferior .....	10.2
10.2.1.-Supresión mediante atirantamiento inferior con un puntal.....	10.2
10.3.-Supresión de una pila extrema mediante atirantamiento combinado.....	10.11
10.3.1.-Supresión mediante atirantamiento combinado con el pilono sobre la pila .....	10.11
10.3.2.-Supresión mediante atirantamiento combinado con el pilono sobre el estribo.....	10.20
10.4.-Análisis comparativo de las soluciones adoptadas y elección de la más adecuada .....	10.30
10.5.- Criterios de diseño aplicables al proyecto de puentes en los que se ha suprimido una pila extrema mediante el atirantamiento no convencional .....	10.30
10.5.1.-Supresión mediante la disposición de un atirantamiento intradosal manteniendo la continuidad del tablero.....	10.30
10.5.2.-Supresión mediante la disposición de un atirantamiento combinado manteniendo la continuidad del tablero.....	10.31

## **CAPÍTULO 11**

<b>RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>11.1</b>
---	-------------

<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>B.1</b>
---	------------

### **ANEJO I**

<b>PUENTES CON ATIRANTAMIENTO INFERIOR CON UN PUNTAL ESTUDIO PARAMÉTRICO .....</b>	<b>I.1</b>
--	------------

### **ANEJO II**

<b>RESPUESTA NO LINEAL GEOMÉTRICA EN PUENTES ATIRANTADOS INFERIORMENTE Y EN PUENTES COLGANTES .....</b>	<b>II.1</b>
---	-------------

### **ANEJO III**

<b>SOBRE EL VALOR DE LOS COEFICIENTES DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA .....</b>	<b>III.1</b>
---	--------------