



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D' ENGINYERS
DE CAMINS, CANALS I PORTS**

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA
REPARACIÓN Y REFUERZO DE
PUENTES UTILIZANDO FIBRAS
SINTÉTICAS Y PRETENSADO EXTERIOR**

AUTOR

JORGE HAROLDO SALA VERRÍA REYES

DIRECTOR DE TESIS

JOAN RAMÓN CASAS RIUS

Barcelona, enero de 2003



**Departament d'Enginyeria
de la construcció**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA
REPARACIÓN Y REFUERZO DE
PUENTES UTILIZANDO FIBRAS
SINTÉTICAS Y PRETENSADO EXTERIOR**

AUTOR

JORGE HAROLDO SALAVERRÍA REYES

DIRECTOR DE TESIS

JOAN RAMÓN CASAS RIUS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Barcelona, enero de 2003

a Dios
a mis padres
a mi esposa e hijo

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis se ha realizado como parte del proyecto de investigación financiado por la Dirección General de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación y Ciencia español, y ha contado con la colaboración de Fomento de Construcciones y Contratas, Freyssinet y Fosroc. Personalmente a la Agencia Española de Cooperación Iberoamericana por la beca que me otorgaron.

Mi más profundo agradecimiento a Dr. Joan Ramón Casas Rius, como mi tutor y director de tesis, por su dedicación, experiencia y confianza en todo momento.

A los profesores Ángel C. Aparicio Bengoechea, Gonzalo Ramos por su ayuda y atención. Al personal del laboratorio de Tecnología de Estructuras, especialmente a su director Dr. Ravindra Gettu y a los técnicos Carlos Hurtado y Miguel Ángel Martín por su dedicación y amistad.

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería de la Construcción, que me han permitido con su aliento y confianza el finalizar este trabajo, muy especialmente a mis compañeros Turibio da Silva, Arnaldo Cardím, Esther Real, Moisés Ramírez, Manuel Valdéz, Diego Cobos, Gustavo Pérez, Guillermo Landa, Alejandro Alarcón, Jose Luiz Rangel, Héctor Saldivar y muchos otros, por su amistad.

A Xavier Griño Canals, Anna Ambou, Sergi Griño y Laia Griño por todo el apoyo y aliento que me han dado durante estos años.

A Maria Anllo y Javier Jordán, agradecerles su ayuda y consejos, los que me han permitido llevar a término este trabajo, que es la continuación de la excelente labor iniciado por ellos.

A mi familia, Claudia y Jorge Sebastián les agradezco saber afrontar con sacrificios, lo que ha representado estos años de estudio para lograr esta realización profesional, por todo el amor que me dan, gracias; En estos momentos les dedico este esfuerzo que también es de ustedes.

RESUMEN

En la actualidad, el apareamiento de nuevos materiales para usos en ingeniería civil ha permitido la aplicación de éstos materiales como materiales de reparación o refuerzo de puentes existentes. Día a día se sabe de la existencia de más problemas de durabilidad del hormigón armado y pretensado, así mismo, se sabe más sobre su comportamiento. Del constante surgimiento de estos nuevos materiales y técnicas constructivas tanto para la construcción como para la reparación de estructuras, se puede deducir que con el aumento de uso de estos materiales se pueden bajar los costes de la reparación y mejorar las características propias del comportamiento estructural ante las solicitaciones y elementos agresivos.

El presente estudio ha consistido en definir la técnica de reparación de puentes existentes utilizando fibras aramidas y Tejidos de Fibra de Carbono (TFC) pegadas exteriormente, para minimizar el coste de las reparaciones de puentes existentes, analizando la conveniencia y fiabilidad del uso de éstas, en términos de recuperación estructural y adicionalmente el uso del pretensado exterior como elemento de refuerzo. En cuanto a la campaña experimental, se determinan inicialmente las características de adherencia en probetas prismáticas, para establecer los diferentes niveles de tensión capaces de soportar las diferentes interfases entre materiales; considerando y evaluando los diferentes productos adhesivos epóxicos y diferentes posibilidades de unión y colocación de las bandas de material compuesto.

La segunda fase consistente en, ensayar un modelo de puente continuo de dos vanos de 7.20m de luz cada uno, y longitud total de 14.40m de sección cajón y canto de 0.60m con pretensado exterior (sin bloqueo en apoyo intermedio) sin fisuración hasta rotura; y tomando en cuenta los daños sufridos, se desarrollan las reparaciones pertinentes y se vuelven a ensayar nuevamente a rotura pero ahora con bloqueo intermedio. Luego se vuelve a reparar el modelo; dichas reparaciones se hacen teniendo como referencia los datos de adherencia de la 1ª fase, por lo que se hace la reparación del modelo restituyendo el pretensado exterior; reforzando a flexión (sustituyendo armaduras pasivas longitudinales) y a cortante (armaduras transversales) por bandas rígidas de fibra aramida debidamente instrumentadas.

Con los resultados de ésta segunda fase, se determina la nueva capacidad de rotura comparada con la original y, por tanto obteniendo conclusiones sobre la fiabilidad de la técnica de reparación utilizada. Es importante por lo tanto, desarrollar un análisis de los modelos teóricos versus los ensayos experimentales para obtener las comparaciones pertinentes de: deformaciones, comportamiento de los cordones de pretensado, comportamiento seccional en zonas de apoyo y secciones de centro luz. Ello permite sacar conclusiones importantes de cara a las posibilidades de aplicación a las reparaciones en casos reales.

Como tercera fase, se ensaya una nueva serie que corresponde a un modelo de puente de hormigón armado sin pretensado exterior, el cual es inicialmente ensayado a rotura para luego ser reparado utilizando el Tejido de Fibra de Carbono (TFC).

Como cuarta y última fase experimental se planteó la utilización del Tejido de Fibra de Carbono y del Pretensado exterior como técnicas de reparación y refuerzo respectivamente. Con los resultados de este estudio, se hacen sugerencias de cara a futuras aplicaciones reales y futuras investigaciones.

ABSTRACT

At the present time, the appearance of new materials for use in civil engineering has allowed the application of these materials as repair or reinforcement materials of existing bridges. Day by day it is known about the existence of more problems of durability of the concrete and prestressing bridges, likewise, more about their behavior is known. Of the constant emergence of these new materials and constructive techniques as much for the construction as for the repair of structures, one can deduce that with the increase of use of these materials they can decrease the costs of the repair and to improve the characteristics of structural behavior before the solicitations and aggressive elements.

The present study has consisted on defining the technique of repair of existing bridges using aramid fibers and carbon fibers fabrics (CFRP) hit outwardly, to minimize the cost of the repairs of existing bridges, analyzing the convenience and reliability of the use of these, in terms of structural recovery and additionally the use of the external prestressing as element of reinforcement. As for the experimental campaign, they are determined the characteristics of adherence initially in prismatic test specimens, to establish the different levels of tension able to support the different interfaces among materials; considering and evaluating the different epoxies products and different possibilities of union and placement of the strips of compound material.

The second phase consists in, to rehearse a model of two-span continuous bridge of 7.2 m. Length each one, and total longitude of 14.40m. Of box-girder prestressed concrete beams and height of 0.60m. with external prestressing (without blockade in middle support) without cracking until the failure; and taking into account the suffering damages, the pertinent repairs are developed and they rehearse again to break once again but now with blockade in middle support. Then it repairs the pattern again; this repairs are made having like reference the data of adherence of the 1st phase, for what the repair of the pattern is made restoring the external prestressing; reinforcing to flexion (substituting longitudinal passive armors) and to sharp (transverse armors) for rigid strips of aramid fiber properly instrumented.

With the results of this second phase, the new breakcapacity is determined compared with the original one and, therefore obtaining conclusions about the reliability of the technique of used repair. It is important therefore, to develop an analysis of the theoretical models versus the experimental rehearsals to obtain the pertinent comparisons of: deformations, behavior of the prestressing cords, sectional behavior in support areas and midspan sections. It allows it to reach important conclusions of face to the application possibilities to the repairs in real cases.

As third phase, a new series is rehearsed that corresponds a model of concrete bridge without external prestressing, which is initially tested to break for then to be repaired using the carbon fibers fabrics (CFRP).

As fourth and last experimental phase thought about the use of the carbon fibers and of the external prestressing as repair and reinforcement technique respectively. With the results of this study, face suggestions are made to future real applications and future investigations.

INDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2 - OBJETIVOS.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Objetivos Generales	
2.2.1 A nivel documental.....	5
2.2.2 A nivel experimental.....	5
2.3 Objetivos Específicos.....	7
Capítulo 3 - ESTADO DEL CONOCIMIENTO	
3.1 Introducción.....	11
3.2 Patologías en puentes de hormigón armado y pretensado.....	11
3.2.1 -Ciclos hielo y deshielo.....	15
3.2.2 -Ataques químicos.....	16
3.2.3 -Abrasión.....	19
3.2.4 -Corrosión de la armadura.....	20
3.2.5 -Carbonatación.....	22
3.2.6 -Reacciones químicas de los agregados.	24
3.2.7 -Hormigón en medio marino.....	26
3.2.8 -Fisuración.....	27
3.2.9 -Acción del fuego.....	31
3.2.10 -Acciones excepcionales.	34
3.3 Consideraciones sobre seguridad estructural y vida útil.....	34
3.3.1 Introducción.....	34
3.3.2 Fallos en estados límites.....	35

3.3.3	Evaluación estructural.....	36
3.4	Tipos de Actuación y Elementos a reparar.....	37
3.5	Materiales de reparación.....	38
3.5.1	Introducción.....	38
3.5.2	Productos a utilizar.....	38
Capítulo 4 - ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL REFUERZO DE PUENTES		
4.1	Introducción.....	45
4.2	Descripción metodológica.....	45
4.3	Descripción de los modelos y medios de ensayo.....	46
4.3.1	Descripción de los materiales.....	46
4.3.2	Trabajos de preparación.....	47
4.3.3	Instrumentación utilizada.....	47
	4.3.3.1 - Caracterización de los sistemas utilizados.....	47
	4.3.3.2 - Transductores	48
	4.3.3.3 - Medidas de desplazamientos.....	50
	4.3.3.4 - Aplicación de cargas.....	51
4.4	Descripción de los ensayos.....	52
4.4.1	Ensayos de caracterización de adherencia.....	52
	4.4.1.1 - Antecedentes.....	52
	4.4.1.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	52
	4.4.1.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	52
	4.4.1.3.i Preparación de los modelos.....	52
	4.4.1.3.ii Tipo de ensayos.....	54
	4.4.1.4 - Medios de Carga e Instrumentación.....	54
	4.4.1.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	55
	4.4.1.6 - Resultados.....	56
4.4.2	Ensayos sobre modelo de puente: VPE_1	58
	4.4.2.1 - Antecedentes.....	58
	4.4.2.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	58
	4.4.2.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	58
	4.4.2.3.i Trabajos preliminares.....	59

4.4.2.3.ii Preparación del modelo.....	60
4.4.2.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	60
4.4.2.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	62
4.4.2.6 - Resultados.....	64
4.4.3 Ensayos sobre modelo de puente: VPE_2	65
4.4.3.1 - Objetivo del plan de Ensayo.....	65
4.4.3.2 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	66
4.4.3.2.i Trabajos preliminares.....	66
4.4.3.2.ii Preparación del modelo.....	66
4.4.3.2.iii Reparación del puente.....	67
4.4.3.3 - Medios de carga e Instrumentación.....	67
4.4.3.4 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	67
4.4.3.5 - Resultados.....	70
4.4.4 Ensayos sobre modelo de puente: VPE_3	72
4.4.4.1 - Antecedentes.....	72
4.4.4.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	72
4.4.4.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	72
4.4.4.3.i Reparación del modelo.....	73
4.4.4.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	74
4.4.4.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	75
4.4.4.6 - Resultados.....	76
4.4.5 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_a	78
4.4.5.1 - Antecedentes.....	78
4.4.5.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	78
4.4.5.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	79
4.4.5.3.i Trabajos preliminares.....	80
4.4.5.3.ii Preparación del modelo.....	81
4.4.5.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	82
4.4.5.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	85
4.4.5.6 - Resultados.....	86
4.4.6 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_b	88
4.4.6.1 - Antecedentes.....	88
4.4.6.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	89
4.4.6.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	89

4.4.6.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	92
4.4.6.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	94
4.4.6.6 - Resultados.....	96
4.4.7 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_c	
2 vanos isostáticos (vanos 1 y 2)	100
4.4.7.1 - Antecedentes.....	100
4.4.7.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	100
4.4.7.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	100
4.4.7.3.i Trabajos preliminares.....	101
4.4.7.3.ii Preparación del modelo.....	101
4.4.7.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	101
4.4.7.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	102
4.4.7.6 - Resultados.....	103
4.4.8 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_d	
1 vano isostático (vano 2)	106
4.4.8.1 - Antecedentes.....	106
4.4.8.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	106
4.4.8.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	107
4.4.8.3.i Trabajos preliminares.....	107
4.4.8.3.ii Preparación del modelo.....	107
4.4.8.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	107
4.4.8.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	107
4.4.8.6 - Resultados.....	109
4.4.9 Ensayos sobre modelo de puente : VHA_PE_a	111
4.4.9.1 - Antecedentes.....	111
4.4.9.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	111
4.4.9.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	112
4.4.9.3.1 Trabajos preliminares.....	112
4.4.9.3.2 Preparación del modelo.....	113
4.4.9.3.3 Reparación del puente.....	114

4.4.9.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	114
4.4.9.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	119
4.4.9.6 - Resultados.....	120
4.4.10 Ensayos sobre modelo de puente: VHA_PE_b	
1 vano isostático (vano 2)	127
4.4.10.1 - Antecedentes.....	127
4.4.10.2 - Objetivo del plan de Ensayo.....	127
4.4.10.3 - Planteamiento y descripción del ensayo.....	127
4.4.10.3.i Trabajos preliminares.....	127
4.4.10.3.ii Preparación del modelo.....	127
4.4.10.4 - Medios de carga e Instrumentación.....	128
4.4.10.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.....	128
4.4.10.6 - Resultados.....	129
4.5 Resumen de resultados sobre modelos de puente.....	131

Capítulo 5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción.....	135
5.1.1 Campo de aplicación.....	136
5.2 Deformada de la viga	138
5.3 Reacciones en apoyos.....	139
5.4 Deformaciones en la sección de centro luz de vanos y apoyo intermedio.....	141
5.5 Comportamiento en los cordones de pretensado.....	143
5.6 Conclusiones parciales acerca del modelo teórico.....	144

Capítulo 6 -CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 Conclusiones.....	149
6.1.1 Conclusiones generales.....	149
6.1.2 Conclusiones específicas.....	151

6.1.2.1 Conclusiones relativas a la serie de ensayos de caracterización de adherencia.....	151
6.1.2.2 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VPE.....	153
6.1.2.3 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VHA1.....	155
6.1.2.4 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VHA_PE.....	158
6.2 Líneas futuras de investigación.....	160
BIBLIOGRAFIA.....	165
RELACIÓN DE ANEJOS.....	171
Anejo 1: Planos de probetas para ensayos de adherencia.....	173
Anejo 2: Planos de modelos de puente.....	179
Anejo 3: Cálculos de tensiones de adherencia.....	195
Anejo 4: Proceso de fabricación de probetas de adherencia.....	205
Anejo 5: Resumen gráfico de los modelos ensayados.....	211
Anejo 6: Programa de adquisición de datos.....	215
Anejo 7: Resumen de resultados experimentales.....	231
Anejo 8: Diagramas de momentos, cortantes y reacciones.....	281
Anejo 9: Diseño del refuerzo de las bandas de fibra.....	289
Anejo 10: Procedimiento de pegado del T.F.C.....	303
Anejo 11: Cálculos de la respuesta seccional E.L.S. y E.L.U.....	309
RELACIÓN DE GRÁFICAS Y TABLAS.....	317