

PUENTE ATIRANTADO SOBRE EL RÍO CUARTO

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS EVOLUTIVAS

Carlos F. Gerbaudo
M.Sc. Ing. Civil
ingroup@ingroup-op.com.ar
INGROUP Oficina de Proyectos

Eduardo E. Cámara
Ing. Civil
ingroup@ingroup-op.com.ar
INGROUP Oficina de Proyectos

Resumen

El proceso constructivo del Puente Atirantado sobre el Río Cuarto contempla una estructura evolutiva en la que, una vez montado y ensamblado el tablero sobre apoyos definitivos y auxiliares, y verticalizadas las pilas principales en su posición definitiva, se incorporan los obenques al sistema resistente en varias etapas, por lo que el análisis para verificación estructural debe contemplar dicha evolución de la estructura resistente, las cargas y las instancias de tesado o retesado de los obenques a niveles predeterminados, como así también la fluencia de largo plazo del tablero de hormigón.

Estas características de la construcción del puente atirantado imponen la necesidad de un tipo de análisis estructural no convencional en el que el modelo estructural debe ser evolutivo, y es necesario contar con una herramienta numérica de optimización de la secuencia de tesado de los obenques, funcionalidades no disponibles en un software convencional de análisis estructural. En el presente trabajo se presenta una metodología de análisis para la definición de la secuencia de tesado de obenques, utilizando una serie de modelos lineales evolutivos paso a paso, combinados con una técnica de optimización de una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones.

Abstract

The constructive process of the Cable Stayed Bridge over the Rio Cuarto provides an evolutionary structure in which, once mounted and assembled the deck on final support and auxiliary and main pylons verticalized in its final position, the strands are incorporated into the system more resistant stages, for what the analysis for structural check must contemplate the above mentioned evolution of the resistant structure, the loads and the instances of tensioning or over-tensioning from strands to predetermined levels, as well as long-term creep of concrete deck.

These characteristics of cable stayed bridge construction impose the need for a type of unconventional structural analysis in which the structural model should be evolutionary, and must have a numerical tool for optimizing the sequence of tensioning the guys, features not available in a conventional structural analysis software.

This paper presents an analysis methodology for defining the sequence of tensioning rods, using a series of linear models evolutionary step, combined with an optimization technique of an objective function subject to a set of constraints.

Introducción

El Puente Atirantado sobre el Río Cuarto está compuesto por una estructura atirantada que sustenta un tablero con doble calzada con dos carriles de circulación por sentido y amplias veredas peatonales ubicadas a los extremos laterales del tablero. El puente, de hormigón armado y pretensado, posee una luz central de 110 m y dos luces laterales de 50.5 m, con viaductos de acceso ubicados en ambas márgenes del río que sirven de transición entre el puente principal y la obra vial de acceso al puente. El tablero se encuentra apoyado elásticamente en los obenques distribuidos en luces parciales uniformes de 11 m. Los obenques son los elementos estructurales encargados de brindar apoyo elástico al tablero del puente y transferir las cargas a las pilas principales. Las pilas principales del puente poseen una altura total de 49.0 m, de los cuales los primeros 11.15 m a partir del cabezal se ejecutan de hormigón, y el resto de la pila de 37.85 m de longitud se resuelve con una estructura metálica. En la Figura 1 se observa los componentes principales del puente atirantado:

- i. Pila principal, PP: Pila 5 y Pila 6
- ii. Pila de retención intermedia, PRI: Pila 4 y Pila 7
- iii. Pila de retención extrema, PRE: Pila 3 y Pila 8
- iv. Tablero
- v. Obenques (C1 a C5 y L1 a L5)

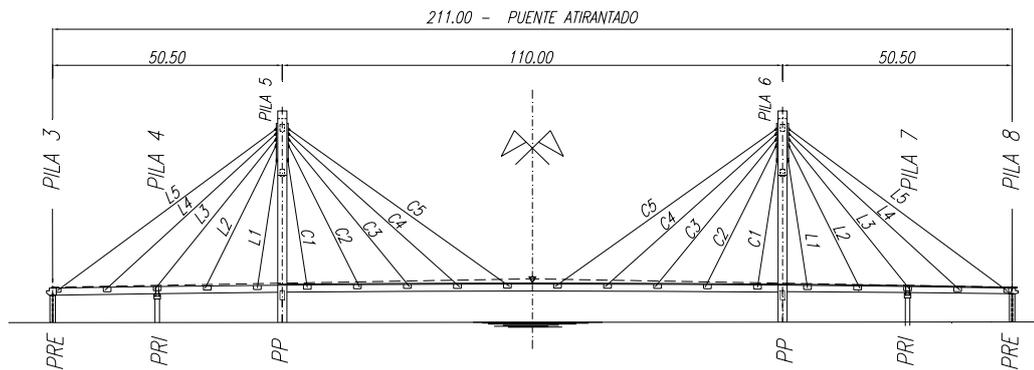


Figura 1. Descripción general del Puente Atirantado

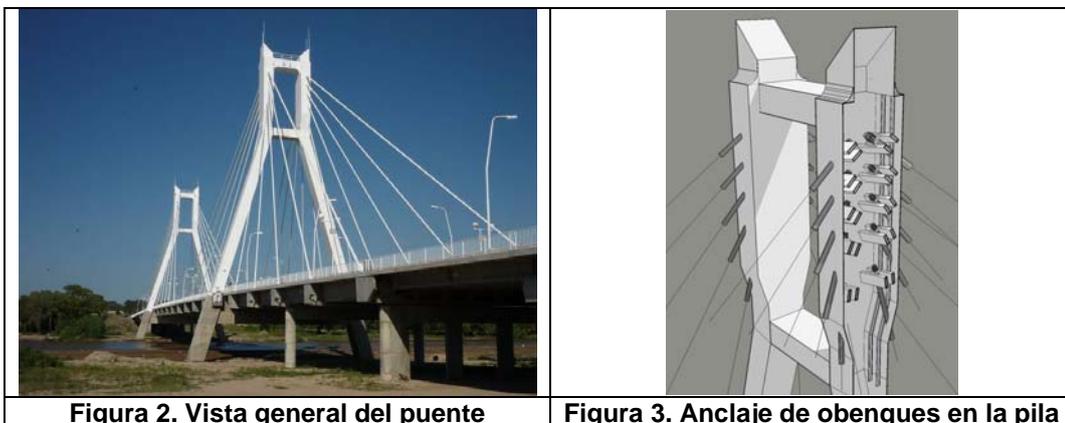


Figura 2. Vista general del puente

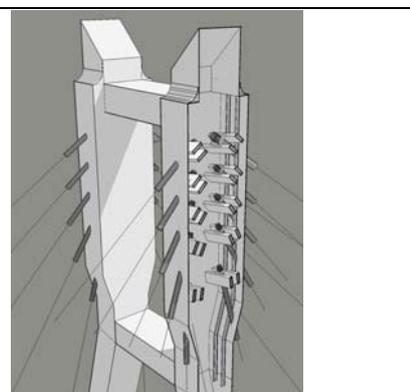


Figura 3. Anclaje de obenques en la pila

Método constructivo

La construcción del puente se realizó con la técnica de cimbrado, el tablero del puente atirantado se construye íntegramente sobre un sistema de apoyos auxiliares y luego se realiza el tesado de cables de forma global. El tesado global de los obenques al final de la construcción debe permitir entre otras cosas la remoción de los apoyos auxiliares, alcanzándose la configuración estática final de la estructura, o sea el tablero totalmente suspendido de los obenques.

Fuerza objetivo en obenques

La fuerza en cada obenque debe ser tal que permita que:

- i. El tablero quede totalmente suspendido de los obenques. Los obenques deben equilibrar el peso propio de la estructura construida hasta el instante de realizar el tesado.
- ii. Se consiga una rasante predeterminada durante la vida en servicio (tiempo infinito). En este ítem se calcularon las deformaciones que sufrirá el puente a tiempo infinito (fluencia lenta y contracción) y a partir de estas deformaciones se propone una rasante inicial que neutralice las deformaciones y que luego de ocurridas estas resulte una rasante de servicio óptima.
- iii. Se produzca un estado tensional favorable en el tablero del puente. Los momentos flectores del tablero son máximo en el tramo central debidos a las grandes curvaturas que se producen allí, producir un ascenso de la rasante del tablero mejora estas sollicitaciones.

La fuerza de tesado de cada obenque para alcanzar un estado tenso-deformacional predeterminado queda entonces compuesta por:

$$\text{Fuerza} = \text{Peso propio} + \text{Deformaciones lentas} + \text{Estado tensional favorable}$$

Análisis de la secuencia de tesado (comportamiento teórico)

Se desarrolló una propuesta de secuenciación del tesado de los cables de manera de limitar dentro de valores admisibles las sollicitaciones temporarias que se generan tanto en el tablero como en la pila principal metálica, controlando las deformaciones en el extremo superior de pila y en el tablero, de manera de alcanzar las fuerzas y rasante de proyecto.

Tabla 1. Orden de tesado de obenques en una pila

Orden de tesado	Obenque	
1	C1-i	L1-i
2	C1-d	L1-d
3	C2-i	L2-i
4	C2-d	L2-d
5	C3-i	L3-i
6	C3-d	L3-d
7	C4-i	L4-i
8	C4-d	L4-d
9	C5-i	L5-i
10	C5-d	L5-d

Nota:

- “d”, designa los obenques del margen derecho del tablero
- “i”, designa los obenques del margen izquierdo del tablero

Cálculo de las fuerzas de tesado

La fuerza objetivo definida anteriormente es la fuerza resultante en cada obenque al finalizar la secuencia de tesado. Esta fuerza resultante, en general, es distinta de la fuerza de tiro inicial del obenque. La diferencia ocurre debido a que la fuerza introducida en un obenque determinado se ve influenciada por los posteriores tesados de los obenques faltantes en la secuencia. De esta manera solamente el último obenque de la secuencia no ve modificada su fuerza de tesado.

El objetivo del análisis entonces es encontrar la fuerza de tiro en cada obenque tal que una vez finalizada la secuencia de tesado el obenque en cuestión quede con la fuerza determinada en el punto anterior.

Los valores de la fuerzas de tesado, F_t , se calcularon con un procedimiento que en líneas generales consiste en determinar la variación de fuerza axial que experimenta cada obenque cuando se tesa uno de ellos. Luego para un obenque determinado la fuerza axial resultante será la suma de su fuerza de tiro más las variaciones causadas por los tesados de los demás obenques.

La implementación del concepto descrito en el párrafo anterior se realizó de la siguiente manera:

- i. Se determinaron los coeficientes de variación normalizados para una fuerza de tiro para cada paso de tesado. Ver Figura 4 y Figura 5.

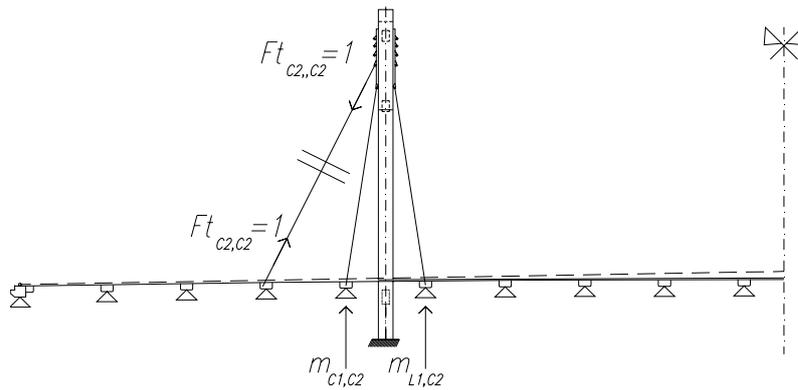


Figura 4. Cálculo de los coeficientes de variación, 6to paso de tesado

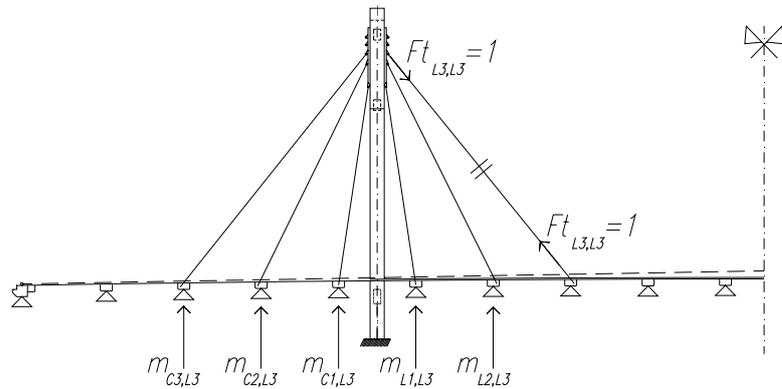


Figura 5. Cálculo de los coeficientes de variación, 6to paso de tesado

- ii. Se arma una “Matriz de Influencias”, MI, con los coeficientes determinados en el punto anterior. Esta matriz agrupa todos los coeficientes de variación y permite realizar el cálculo en forma eficiente. Las filas de la matriz representan los obenques de una pila del puente, las columnas de la matriz representan los pasos de tesado. En la Figura 6 se muestra la forma de la Matriz de Influencias

		PASOS DE TESADO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		C1	L1	C2	L2	C3	L3	C4	L4	C5	L5
O B E N Q U E S	1 C1	1	$m_{C1,L1}$	$m_{C1,C2}$	$m_{C1,L2}$	$m_{C1,C3}$	$m_{C1,L3}$	$m_{C1,C4}$	$m_{C1,L4}$	$m_{C1,C5}$	$m_{C1,L5}$
	2 L1	0	1	$m_{L1,C2}$	$m_{L1,L2}$	$m_{L1,C3}$	$m_{L1,L3}$	$m_{L1,C4}$	$m_{L1,L4}$	$m_{L1,C5}$	$m_{L1,L5}$
	3 C2	0	0	1	$m_{C2,L2}$	$m_{C2,C3}$	$m_{C2,L3}$	$m_{C2,C4}$	$m_{C2,L4}$	$m_{C2,C5}$	$m_{C2,L5}$
	4 L2	0	0	0	1	$m_{L2,C3}$	$m_{L2,L3}$	$m_{L2,C4}$	$m_{L2,L4}$	$m_{L2,C5}$	$m_{L2,L5}$
	5 C3	0	0	0	0	1	$m_{C3,L3}$	$m_{C3,C4}$	$m_{C3,L4}$	$m_{C3,C5}$	$m_{C3,L5}$
	6 L3	0	0	0	0	0	1	$m_{L3,C4}$	$m_{L3,L4}$	$m_{L3,C5}$	$m_{L3,L5}$
	7 C4	0	0	0	0	0	0	1	$m_{C4,L4}$	$m_{C4,C5}$	$m_{C4,L5}$
	8 L4	0	0	0	0	0	0	0	1	$m_{L4,C5}$	$m_{L4,L5}$
	9 C5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	$m_{C5,L5}$
	10 L5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 6. Matriz de influencia M_i para el cálculo de fuerzas de tesado

Un componente de la matriz $m_{i,j}$ representa la variación en la fuerza vertical en el obenque “i” debida a una fuerza unitaria en el obenque “j”. Por ejemplo el componente $m_{C2,L3}$ representa la variación de la proyección vertical en el obenque C2 debido al tesado unitario del obenque L3.

$$m_{C2,L3} = \frac{f_{C2}}{f_{L3}} \quad (1)$$

- iii. Se determinan las fuerzas objetivas en cada obenque y se los agrupa en un vector de fuerzas finales, F_F . Este paso se desarrollo en “Fuerza objetivo en obenques”.

$$F_F^T = [F_{C1} \ F_{L1} \ F_{C2} \ F_{L2} \ F_{C3} \ F_{L3} \ F_{C4} \ F_{L4} \ F_{C5} \ F_{L5}] \quad (2)$$

- iv. Se calculan las fuerzas de tesado en cada obenque, F_t .

$$F_t^T = [F_{t_{C1}} \ F_{t_{L1}} \ F_{t_{C2}} \ F_{t_{L2}} \ F_{t_{C3}} \ F_{t_{L3}} \ F_{t_{C4}} \ F_{t_{L4}} \ F_{t_{C5}} \ F_{t_{L5}}] \quad (3)$$

El vector de fuerzas de tesado se calcula resolviendo el sistema:

$$\mathbf{M}_I \mathbf{F}_t = \mathbf{F}_F \quad (4)$$

F_F , Vector de fuerzas finales
 F_T , Vector de fuerzas de tesado
 M_I , Matriz triangular de influencias

el vector de fuerzas de tesado que expresado entonces como:

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{M}_I^{-1} \mathbf{F}_F \quad (5)$$

A manera de ejemplo si desarrollamos la expresión de la fuerza al final de la secuencia de tesado en el obenque C3 obtenemos:

$$F_{C3} = 1 \cdot F_{t_{C3}} + m_{C3,L3} \cdot F_{t_{L3}} + m_{C3,C4} \cdot F_{t_{C4}} + m_{C3,L4} \cdot F_{t_{L4}} + m_{C3,C5} \cdot F_{t_{C5}} + m_{C3,L5} \cdot F_{t_{L5}} \quad (6)$$

Se observa en esta expresión que la fuerza final en el obenque C3 está compuesta por la fuerza de tiro del propio obenque más las fuerzas de tesado de los demás obenques afectadas por su coeficiente de influencia respectivo. En general los coeficientes resultan negativos con lo que la fuerza final en el obenque resulta menor a la fuerza de tiro.

Cálculo de las fuerzas de sobretesado

Aunque la operación de tesado de obenques en el Puente sobre el Río Cuarto se realizó en una sola secuencia en este punto se desarrolla un análisis para determinar

las fuerzas de sobretesado en el caso de ser necesaria una operación para corregir posibles imperfecciones durante la secuencia de tesado.

El cálculo de las fuerzas de sobretesado se efectúa en forma idéntica al cálculo de las fuerzas de tesado. El cambio principal surge en el armado de la matriz de influencias. En este caso la matriz se arma con un modelo en el que están presentes todos los obenques del puente, ver Figura 7.

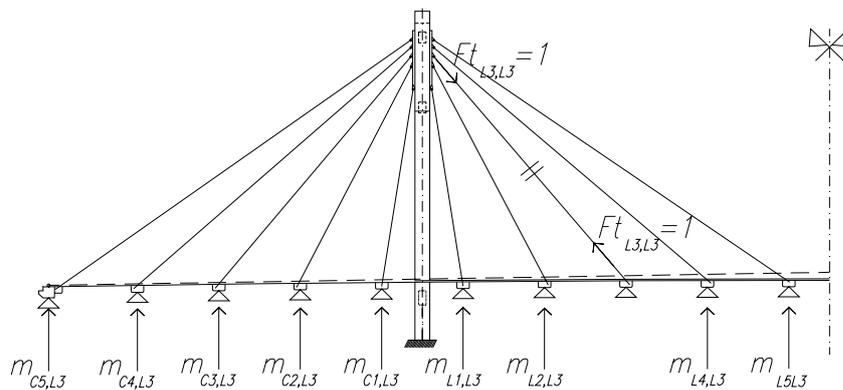


Figura 7. Cálculo de los coeficientes de variación, fuerzas de sobretesado

La matriz así construida, en general, no mostrará coeficientes de influencia nulos, ver Figura 8.

		PASOS DE TESADO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		C1	L1	C2	L2	C3	L3	C4	L4	C5	L5
OBENQUES	1 C1	1	$m_{C1,L1}$	$m_{C1,C2}$	$m_{C1,L2}$	$m_{C1,C3}$	$m_{C1,L3}$	$m_{C1,C4}$	$m_{C1,L4}$	$m_{C1,C5}$	$m_{C1,L5}$
	2 L1	$m_{L1,C1}$	1	$m_{L1,C2}$	$m_{L1,L2}$	$m_{L1,C3}$	$m_{L1,L3}$	$m_{L1,C4}$	$m_{L1,L4}$	$m_{L1,C5}$	$m_{L1,L5}$
	3 C2	$m_{C2,C1}$	$m_{C2,L1}$	1	$m_{C2,L2}$	$m_{C2,C3}$	$m_{C2,L3}$	$m_{C2,C4}$	$m_{C2,L4}$	$m_{C2,C5}$	$m_{C2,L5}$
	4 L2	$m_{L2,C1}$	$m_{L2,L1}$	$m_{L2,C2}$	1	$m_{L2,C3}$	$m_{L2,L3}$	$m_{L2,C4}$	$m_{L2,L4}$	$m_{L2,C5}$	$m_{L2,L5}$
	5 C3	$m_{C3,C1}$	$m_{C3,L1}$	$m_{C3,C2}$	$m_{C3,L2}$	1	$m_{C3,L3}$	$m_{C3,C4}$	$m_{C3,L4}$	$m_{C3,C5}$	$m_{C3,L5}$
	6 L3	$m_{L3,C1}$	$m_{L3,L1}$	$m_{L3,C2}$	$m_{L3,L2}$	$m_{L3,C3}$	1	$m_{L3,C4}$	$m_{L3,L4}$	$m_{L3,C5}$	$m_{L3,L5}$
	7 C4	$m_{C4,C1}$	$m_{C4,L1}$	$m_{C4,C2}$	$m_{C4,L2}$	$m_{C4,C3}$	$m_{C4,L3}$	1	$m_{C4,L4}$	$m_{C4,C5}$	$m_{C4,L5}$
	8 L4	$m_{L4,C1}$	$m_{L4,L1}$	$m_{L4,C2}$	$m_{L4,L2}$	$m_{L4,C3}$	$m_{L4,L3}$	$m_{L4,C4}$	1	$m_{L4,C5}$	$m_{L4,L5}$
	9 C5	$m_{C5,C1}$	$m_{C5,L1}$	$m_{C5,C2}$	$m_{C5,L2}$	$m_{C5,C3}$	$m_{C5,L3}$	$m_{C5,C4}$	$m_{C5,L4}$	1	$m_{C5,L5}$
	10 L5	$m_{L5,C1}$	$m_{L5,L1}$	$m_{L5,C2}$	$m_{L5,L2}$	$m_{L5,C3}$	$m_{L5,L3}$	$m_{L5,C4}$	$m_{L5,L4}$	$m_{L5,C5}$	1

Figura 8. Matriz de influencia para el cálculo de fuerzas de sobretesado

Un segundo cambio en la metodología propuesta es que se incorpora un vector de fuerzas que representa el estado tensional inicial de los obenques al momento de comenzar el sobretesado. La fuerza final en cada obenque resulta de la suma de su estado inicial más la fuerza resultante en el sobretesado.

$$\mathbf{F}_0 + \mathbf{M}_I \mathbf{F}_T = \mathbf{F}_F \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{M}_I^{-1} (\mathbf{F}_F - \mathbf{F}_0) \quad (8)$$

F_0 , Vector de fuerzas iniciales

F_F , Vector de fuerzas finales

F_T , Vector de fuerzas de tiro (fuerzas de sobretesado en obenques)

M_I , matriz triangular de influencias

Consideraciones del cálculo

En el cálculo desarrollado para determinar las fuerzas de tesado y sobretesado se asumieron las siguientes hipótesis para el cálculo:

- i. Se adoptó que el tablero nunca despegue de los apoyos auxiliares. Esta hipótesis se asume para mantener la linealidad en el cálculo ya que un despegue implica una no linealidad en las reacciones de los apoyos auxiliares. Esta aproximación resulta factible ya que la fuerza vertical en cada obenque es apenas superior a la reacción vertical del tablero como viga continua.
- ii. Se adoptó la rigidez elástica de los obenques sin considerar pérdidas de rigidez por la catenaria del cable. Esta aproximación fue viable debido a que los obenques son relativamente cortos y los niveles de tensión con que se trabajan aseguran una rigidez constante.

Evolución de esfuerzos

Con el procedimiento desarrollado anteriormente se evaluaron las sollicitaciones y deformaciones en los componentes del puente para cada etapa de tesado.

Obenques

En la Tabla 2 se resumen los axiales de los obenques en cada etapa de tesado y en la Figura 9 se grafica estos valores.

Tabla 2. Evolución de axiales en los obenques durante la secuencia de tesado

Obenque	Pasos de tesado									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Text	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
C1-d	130	135	127	131	123	126	118	122	113	116
L1-d	134	138	128	131	123	126	118	121	115	118
C1-i	0	135	141	131	135	126	130	122	124	116
L1-i	0	138	141	131	135	126	129	121	124	118
C2-d	0	0	137	142	135	139	132	135	125	128
L2-d	0	0	141	144	136	138	130	133	129	132
C2-i	0	0	0	142	147	139	143	135	137	128
L2-i	0	0	0	144	147	139	141	133	137	132
C3-d	0	0	0	0	157	160	155	158	148	150
L3-d	0	0	0	0	160	162	154	157	155	158
C3-i	0	0	0	0	0	160	164	158	159	150
L3-i	0	0	0	0	0	162	164	157	161	158
C4-d	0	0	0	0	0	0	178	181	171	172
L4-d	0	0	0	0	0	0	183	185	184	187
C4-i	0	0	0	0	0	0	0	181	181	173
L4-i	0	0	0	0	0	0	0	185	188	187
C5-d	0	0	0	0	0	0	0	0	197	198
L5-d	0	0	0	0	0	0	0	0	173	178
C5-i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	198
L5-i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	178

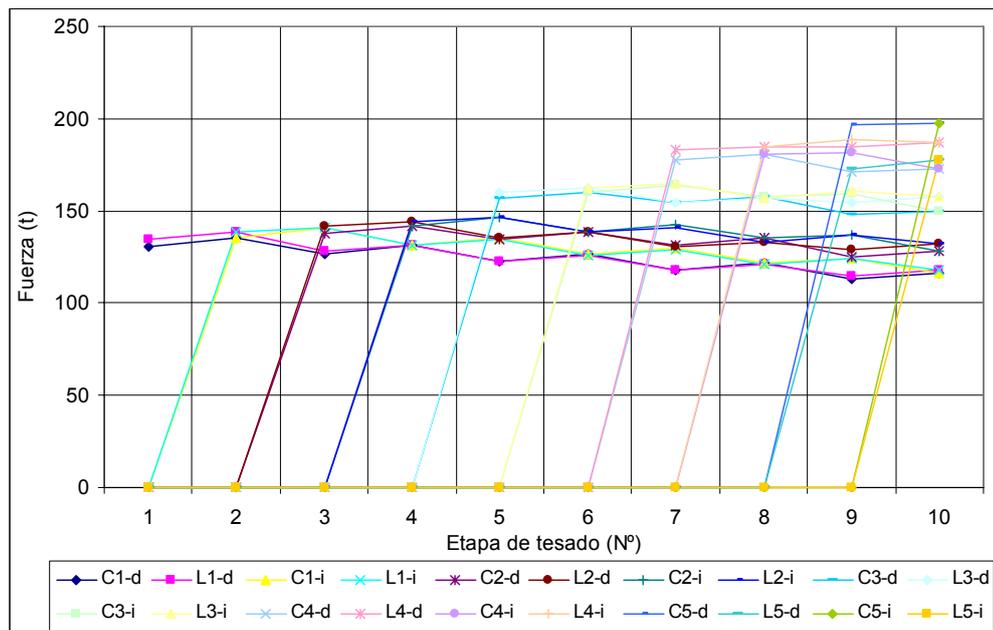


Figura 9. Axial en obenques para cada paso de tesado

Pila principal

En la pila metálica se analizaron principalmente las derivas en la cabeza de la pila y los esfuerzos en la unión de la parte metálica con la parte de hormigón.

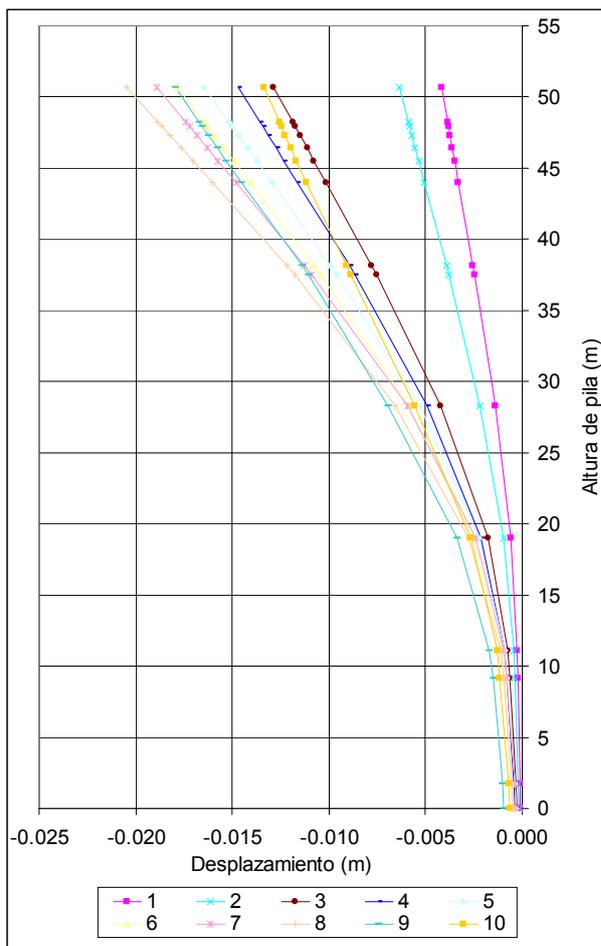


Figura 10. Deriva en cabeza de pila principal

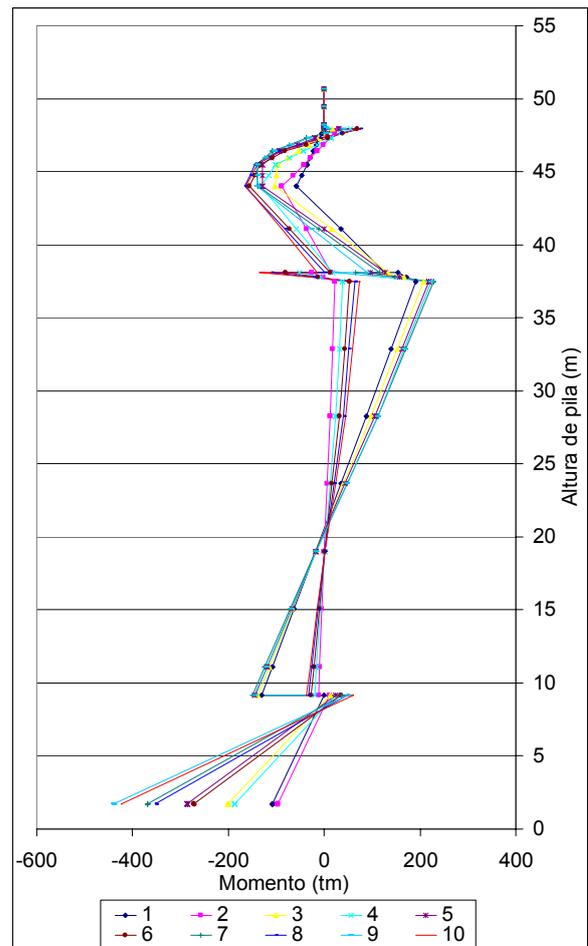


Figura 11. Momento en pila principal

Se observa que la deriva estimada en la pila al final del tesado es de 13 mm y el momento transversal máximo resulta del orden de 144 tm. Ambos valores se encuentran dentro de la deformación y resistencia admisible.

Comparación de resultados entre comportamiento teórico y experimental

En obra se realizaron mediciones con gato unifilar y mediante vibraciones de la fuerza introducida en el obenque y la fuerza resultante una vez concluido la secuencia de tesado. En la Tabla 3 se muestra un resumen con las fuerzas de tesado y las fuerzas resultantes en cada obenque medidos en obra, columnas 2 y 5 de la tabla.

Tabla 3. Comparación de resultados para Pila 5

Obenques	Fuerza de tiro (s/Proyecto)	Fuerza de tiro (s/obra)	Δ inicial (3)=(2)-(1)/(1)	Fuerza final Pila 5 (s/Proyecto)	Fuerza final Pila 5 (s/obra)	Δ Final (6)=(5)-(4)/(4)	Relajación (s/ Proyecto) (7) = (4)/(1)	Relajación (s/ Obra) (8) = (5)/(2)	Correlación (9) = (7)/(8)
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[n°]	[ton]	[ton]	[%]	[ton]	[ton]	[%]	-	-	-
C1-d	130.5	128.8	-1.3	116.1	109.5	-5.7	0.89	0.85	1.05
L1-d	134.4	136.5	1.5	117.6	119.0	1.2	0.87	0.87	1.00
C1-i	135.3	136.0	0.5	116.1	111.3	-4.1	0.86	0.82	1.05
L1-i	138.2	133.2	-3.6	117.6	117.9	0.2	0.85	0.88	0.96
C2-d	137.5	142.3	3.5	127.9	130.5	2.1	0.93	0.92	1.01
L2-d	141.3	139.5	-1.3	132.4	136.6	3.2	0.94	0.98	0.96
C2-i	142.0	146.9	3.5	127.9	123.0	-3.8	0.90	0.84	1.08
L2-i	144.3	141.9	-1.6	132.5	137.8	4.1	0.92	0.97	0.95
C3-d	156.6	159.7	2.0	150.0	149.2	-0.5	0.96	0.93	1.03
L3-d	159.7	158.2	-1.0	157.9	156.8	-0.7	0.99	0.99	1.00
C3-i	160.1	162.6	1.5	150.0	151.5	1.0	0.94	0.93	1.01
L3-i	162.3	159.1	-2.0	157.9	154.7	-2.0	0.97	0.97	1.00
C4-d	177.7	175.7	-1.1	172.5	170.0	-1.4	0.97	0.97	1.00
L4-d	182.8	177.0	-3.2	187.0	182.1	-2.7	1.02	1.03	0.99
C4-i	180.9	182.2	0.7	172.8	167.6	-3.0	0.96	0.92	1.04
L4-i	184.8	177.7	-3.8	187.0	177.8	-4.9	1.01	1.00	1.01
C5-d	196.8	201.4	2.3	197.8	200.9	1.6	1.01	1.00	1.01
L5-d	173.2	176.1	1.7	177.9	184.1	3.5	1.03	1.05	0.98
C5-i	197.8	200.4	1.3	197.8	208.3	5.3	1.00	1.04	0.96
L5-i	177.9	177.9	0.0	177.9	179.1	0.6	1.00	1.01	0.99
Totales	3214	3213	0.0	3075	3068	-0.2	0.95	0.95	1.00

En la columna 7 de la tabla se calculó el porcentaje teórico que representa la fuerza final respecto de la fuerza inicial. En algunos obenques se estimó relajación y en otros rigidización. En la columna 8 se calculó este porcentaje con las fuerzas medidas en obra. Se observa que, independientemente del valor, el modelo teórico ha estimado correctamente en todos los obenques la disminución o aumento de la fuerza axial de los mismos.

En la última columna de la tabla se hace una valoración cuantitativa de la precisión en el cálculo de la variación de fuerza en el obenque con la metodología propuesta. Se observa que la desviación máxima fue del 5% y la desviación promedio fue de 2.43%.

Conclusiones

El Puente Atirantado sobre el Río Cuarto fue construido con la técnica de cimbrado, en donde el tablero inicialmente se construye apoyado en una estructura auxiliar y luego se incorporan los obenques al sistema resistente en varias etapas quedando finalmente el tablero suspendido elásticamente de los obenques. Estas características de construcción imponen la necesidad de un análisis que contemple la evolución de la estructura, las instancias de tesado a niveles predeterminados como así también la fluencia a largo plazo del tablero de hormigón.

En el presente trabajo se desarrollo una metodología de análisis para la definición de la secuencia de tesado de obenques en un puente atirantado, utilizando una serie de modelos lineales evolutivos, combinados con una técnica de optimización de una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones.

La metodología desarrollada es factible de implementar en puentes donde el comportamiento es predominantemente lineal. Esto implica luces cortas a medianas, hasta unos 200 m de longitud, y tableros rígidos.