

Análisis de los formatos de seguridad aplicables a los cables de los puentes atirantados

Safety analysis for the strands of the cable-stayed bridges

Luis Carrillo Alonso ^a, Miguel Angel Astiz Suárez^b

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Asociado ETSEM. U.P.M.

[.luis.alonso@upm.es](mailto:luis.alonso@upm.es)

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático ETSICCP. U.P.M.

miguel.a.astiz@upm.es

RESUMEN

Se define en este documento en primer lugar las componentes activa y pasiva que conforman el axil de un cable de un puente atirantado, para a continuación desarrollar un estudio paramétrico que permite cuantificar su valor. Posteriormente se incluye la misma cuantificación obtenida para casos estudiados de puentes atirantados calculados. Finalmente se describe como el control geométrico, la influencia de los errores de montaje y la variabilidad de las cargas permanentes, junto con la cuantificación de los axiles pasivos permiten establecer una propuesta de formato de seguridad para los axiles de los cables.

ABSTRACT

Axial forces components (load dependent term and stress dependent term) for the cables of a cable-stayed bridge have been defined and then a parametric analysis has been carried out in order to know their values. Values for the same axial forces components were obtained for cable-stayed bridges modelled. Finally it has been described how the geometric adjustment, the random errors in the construction process and the variability of the permanent loads let stated a safety format for the axial forces of the cables.

PALABRAS CLAVE: Puente atirantado, proceso de montaje, axil pasivo, errores aleatorios.

KEYWORDS: Cable-stayed bridges, construction process, load dependent axial force, random errors

1. Introducción

Se presenta en esta ponencia un análisis particular incluido dentro de la investigación desarrollada en la Tesis Doctoral[1] de los autores. El objetivo principal de dicho documento era evaluar la influencia de los errores aleatorios producidos durante el montaje de los cables de los puentes atirantados, pero adicionalmente se estudiaron también los factores que determinan los axiles de los tirantes y la repercusión en los formatos de seguridad a considerar para estas fuerzas.

De esta forma se procedió al estudio de diferentes esquemas de puentes atirantados, todos ellos con las siguientes características comunes: puentes con tablero de hormigón, con luces cortas o medias, ejecutados por voladizos y con configuraciones de cables simétricas.

En estos puentes se analizó la influencia de la introducción de errores de carácter aleatorio, tanto en las fuerzas de tesado como en la posición de los anclajes de los cables, pero todos ellos dentro de la tolerancia admisible por normativa, y se evaluó su repercusión sobre los resultados en esfuerzos y deformaciones.

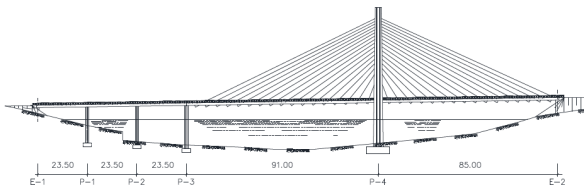


Figura 1. Estructura tipo Modelo 90 estudiada en [1]

Conocida la cuantía y repercusión de los efectos anteriores sobre los diferentes tipos de estructuras, en concreto se calculó la estructura de la figura 1 (Modelo 90), el mismo esquema con la mitad de tirantes (Modelo 90M), el caso de luz doble (Modelo 180) y un caso con tablero de inercia incrementada (Modelo 90-5I), se procedió a evaluar la problemática existente, señalada en distinta bibliografía (ver [4], [5], [6], [7][6]), sobre las consideraciones relativas a los coeficientes de seguridad a aplicar a los tirantes. Es sobre este segundo aspecto sobre el que vamos a centrar nuestra ponencia.

2. Axil activo y axil pasivo de un tirante.

Para analizar el comportamiento de los cables de un puente atirantado se debe tener en cuenta que

desde el momento de su instalación, reciben no sólo la acción de la propia tensión aplicada por los gatos en sus extremos, si no que a partir de ese momento absorberán una parte del peso propio de las nuevas dovelas hormigonadas. Es decir, que su comportamiento se podría descomponer en la suma de dos factores: uno como elemento activo (axil activo), debido a las cargas de tesado, y otro como elemento pasivo (axil pasivo), dado que al igual que el resto de la estructura, debe ser capaz de soportar las acciones aplicadas sobre ésta misma.

Esta característica particular del comportamiento de los cables se observa claramente a partir del esquema representado en la figura 2, la cual muestra el caso de una viga de un solo vano de longitud $2 \cdot L$, apoyada en un tirante en su punto medio, de tal forma que, suponiendo la ejecución de la viga cimbrada, se instalara el cable sin tensión, para a continuación proceder al descimbrado y posterior puesta en carga del tirante. La condición a imponer a la fuerza de tesado es que sea aquella que consiga anular el desplazamiento vertical del punto de anclaje del cable.

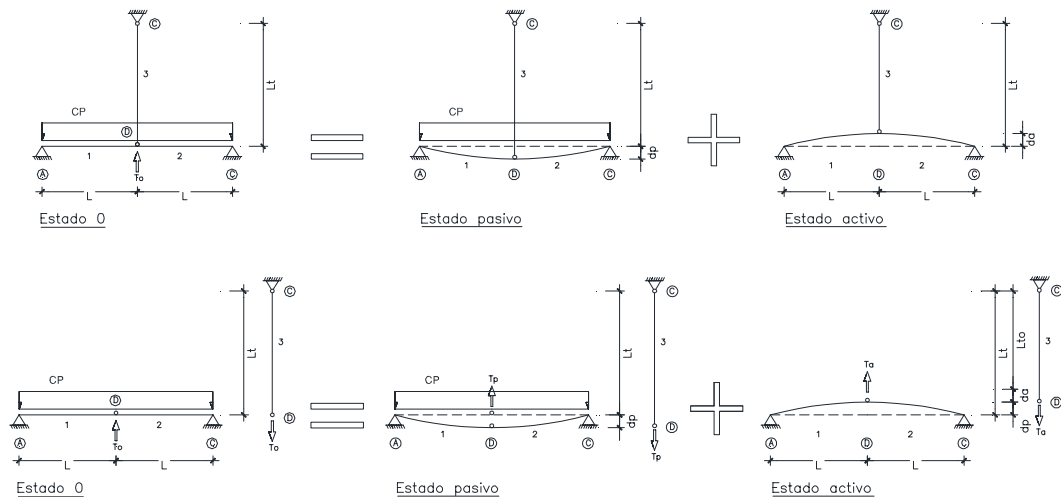


Figura 2. Esquemas del comportamiento de un tirante

De esta forma, y según el esquema de la figura anterior, se puede descomponer el estado final de la estructura (Estado 0) en la suma de otros 2 estados denominados Estado activo y Estado pasivo, en los que se han separado la

actuación de las cargas permanentes por un lado y por otro lado el efecto del tesado del cable. En base a la condición de compatibilidad se pueden evaluar los alargamientos del cable, de donde se deduce que el alargamiento total (d_t) será suma

del producido en el Estado activo (d_a) y del Estado pasivo (d_p): $d_L = d_p + d_a$ (1)

Igualmente ocurrirá con los axiles generados en el cable. Por otra parte, a partir de la longitud final del tirante (L_t) se podría definir la longitud inicial o longitud neutra (L_{t0}) de éste:

$$L_{t0} = L_t - d_L = L_t - d_p - d_a \quad (2)$$

A la vista del distinto origen de las componentes del axil del tirante, cabría preguntarse cómo se introducen los formatos de seguridad sobre estas fuerzas.

3. Parámetros que influyen en el axil activo y pasivo.

La primera cuestión que se estudió fue cuantificar el porcentaje de axil pasivo y activo sobre el total de estas fuerzas y evaluar la importancia de diferentes parámetros que pudieran influir en este reparto. En general, dicho reparto dependerá de las rigideces del tablero y de las pilas, de la rigidez del propio tirante, así como el valor de las cargas muertas aplicadas sobre la estructura.

Para valorar todos estos efectos se analizó el esquema estructural de la figura 3, el cual representa de forma simplificada un tablero atirantado ejecutado por avance en voladizo. Con este esquema se puede calcular tanto la influencia individual de cada uno de los anteriores factores, como evaluar su importancia relativa.

Utilizando la descomposición en estados mostrada en la figura 3, se plantearon las ecuaciones de compatibilidad en desplazamientos (3), (4) y (5) siguientes:

- Condición de anulación del giro en A para la Fase 3:

$$\theta_A^{Ia} + \theta_A^{Ib} + \theta_A^{IIa} + \theta_A^{IIb} = 0 \quad (3)$$

- Condición de anulación del giro en A para la Fase 4.

$$\theta_A^{IIIa} + \theta_A^{IIIb} + \theta_A^{IVa} + \theta_A^{IVb} = 0 \quad (4)$$

- Condición de anulación de los desplazamientos verticales en el nudo B.

$$\delta_B^1 + \delta_B^2 + \delta_B^3 + \delta_B^4 = 0 \quad (5)$$

A partir de las ecuaciones anteriores se obtuvieron las soluciones analíticas (6) a (10) para los esfuerzos axiles en el tirante, tanto la parte activa, como la parte pasiva, siendo:

pp → Peso por ml de sección del tablero KN/ml.

cm → Carga muerta sobre el tablero en KN/ml.

E_c → Módulo de deformación del hormigón del tablero en N/mm².

I → Inercia del tablero

E_s → Módulo de elasticidad del acero de los tirantes en N/mm².

A_s → Area del tirante en cm².

L → Separación entre anclajes en m.

H → Altura entre el punto de anclaje en el tablero y en el pilono en m.

M_A → Mto. en nudo A en KN·m.

F_A → Axil de tesado del tirante en KN.

F_P → Parte pasiva total del axil del tirante en KN.

F_{tot} → Axil total en el tirante en KN.

resultando así que:

$$F_{P,3} = \frac{1}{Z} \left(\frac{5}{48} \frac{pp \cdot L^4}{E_c \cdot I} - \frac{1}{4} \frac{M_A^{II} \cdot L^2}{E_c \cdot I} \right) \quad (6)$$

$$F_{P,4} = \frac{1}{Z} \left(\frac{5}{24} \frac{cm \cdot L^4}{E_c \cdot I} - \frac{1}{4} \frac{M_A^{IV} \cdot L^2}{E_c \cdot I} \right) \quad (7)$$

$$\text{siendo: } Z = \frac{H}{E_s \cdot A_s} + \frac{L^3}{6 \cdot E_c \cdot I} \quad (8)$$

$$\text{resulta: } F_P = F_{P,3} + F_{P,4} \quad (9)$$

$$F_a = \frac{3 \cdot E_c \cdot I}{L^3} \left[\frac{pp \cdot L^4}{8 \cdot E_c \cdot I} + \frac{(F_{P,3} + F_{P,4}) \cdot H}{E_s \cdot A_s} \right] \quad (10)$$

A partir de esta formulación se procedió a realizar un estudio paramétrico, con la intención antes señalada. Se resolvieron entonces así las ecuaciones anteriores, adoptando en cada caso un parámetro como variable y manteniéndose el resto constantes. Los valores de cada parámetro adoptados fueron:

- $E_c = 30.000 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200.000 \text{ N/mm}^2$
- Sección tablero $10'00 \times 1'00 \text{ m}^2$

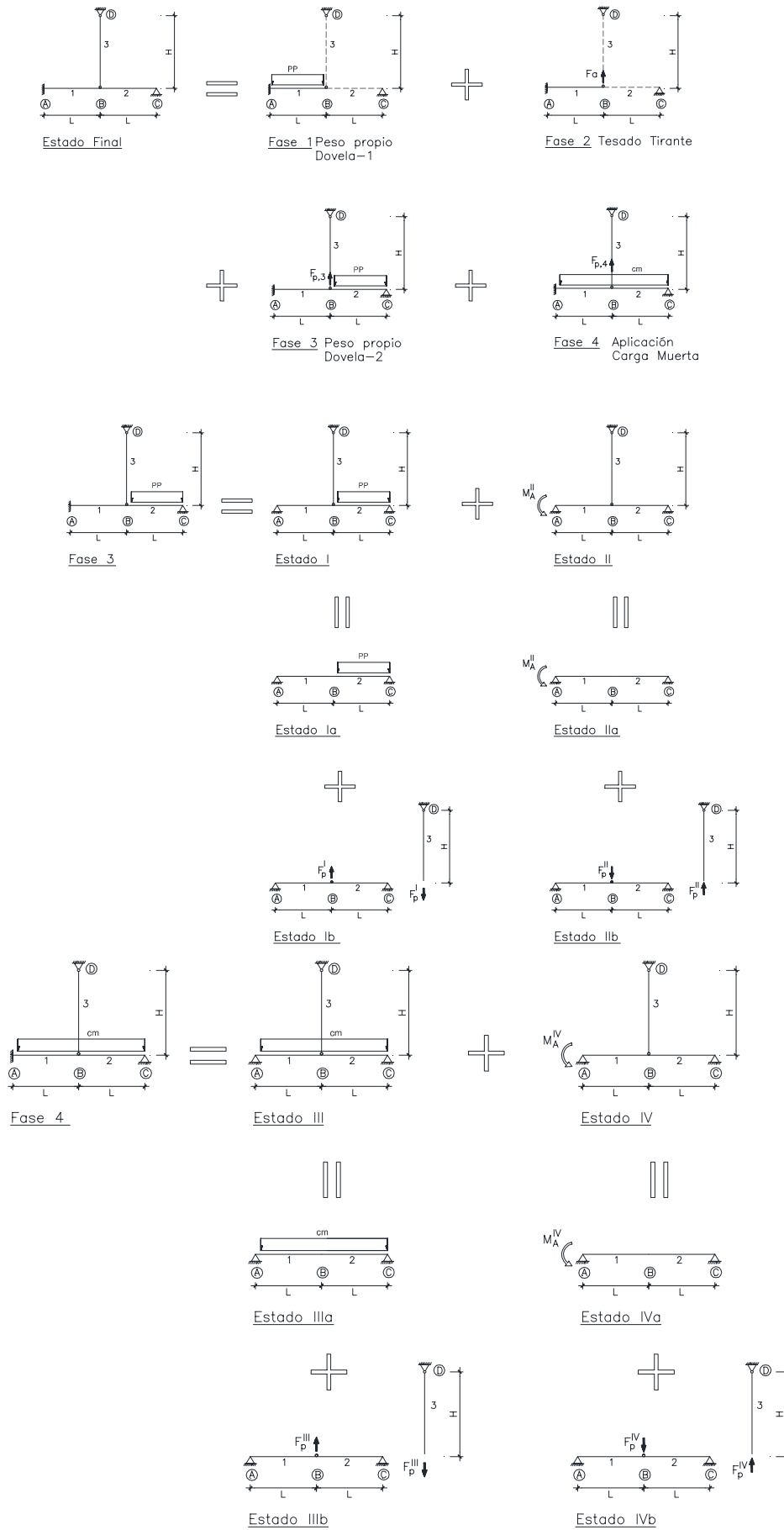


Figura 3. Esquema estructural del modelo simplificado y descomposición en estados.

- $H = 28^9$ m Altura anclaje
- $L = 8^00$ m, separación entre anclajes
- Areas de cables ajustadas para $\sigma_s \approx 500-600$ N/mm²
- $cm = 28^5$ KN/ml

a) *Variación del %Fp/Ftot en función de la separación entre anclajes.*

Se calculó el porcentaje del axil pasivo que resultaba para una variación de este parámetro desde 4'0 a 11'0 m.

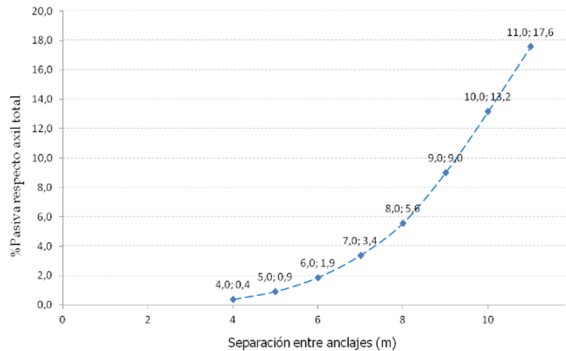


Figura 4. %axil pasivo/ Axil total en función de la separación entre anclajes.

b) *%Fp/Ftot en función de la longitud del tirante.*

Se procedió a evaluar este parámetro para conocer la influencia que tiene la rigidez del tirante, evaluada a partir de su longitud.

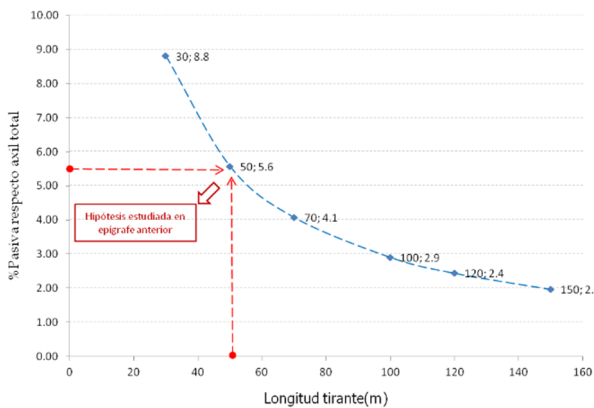


Figura 5. %axil pasivo/ Axil total en función de la longitud del tirante.

c) *%Fp/Ftot en función del ancho del tablero.*

Se calculó en este caso la variación del axil pasivo que genera la modificación del ancho del tablero. Este parámetro influye de dos maneras diferentes: En primer lugar, por el ajuste del canto a la dimensión transversal del tablero, en concreto se ha establecido una relación 1/10 para el cociente entre el canto y ancho del tablero, aumentándose en consecuencia la

inercia longitudinal del tablero. En segundo lugar, incrementando el peso propio del tablero.

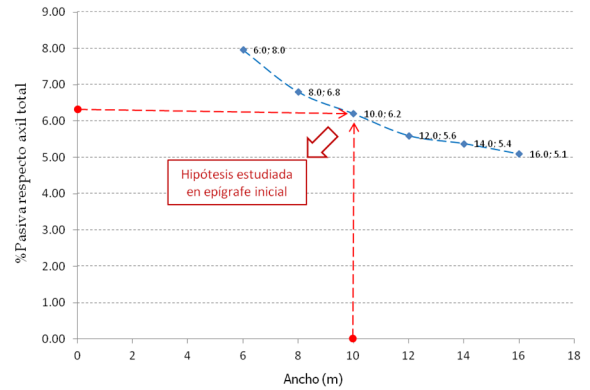


Figura 6. %axil pasivo/ Axil total en función del ancho del tablero

d) *%Fp/Ftot en función de la tensión generada en el tirante.*

Se buscaba analizar, en función del grado de aprovechamiento de los tirantes, su repercusión sobre el axil pasivo de los tirantes. El aprovechamiento de los tirantes se mide mediante la tensión generada en ellos, cuyo rango se establece entre 200 y 800 N/mm².

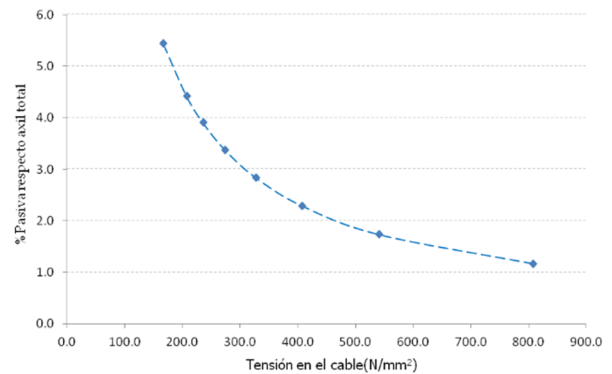


Figura 7. %axil pasivo/ Axil total en función del valor de la tensión del tirante.

e) *%Fp/Ftot en función de la rigidez del tablero.*

Se analizó también la influencia de la variación de la rigidez del tablero, sin que esto implicase un incremento de su peso propio.

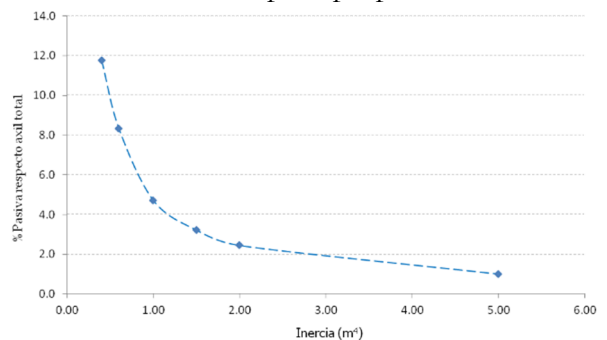


Figura 8. %axil pasivo/ Axil total en función de la rigidez del tablero.

Las conclusiones de los anteriores resultados serían entonces:

- ✓ Que para todos los casos analizados el axil pasivo en ningún caso supone más de un 20% del axil total, quedando en la mayoría de los casos por debajo del 10%, es decir supone un porcentaje reducido del axil total de los tirantes.
- ✓ Que el incremento de la separación entre anclajes genera el efecto más acusado de aumento del porcentaje de la parte pasiva respecto del axil total en el tirante de todos los casos analizados.
- ✓ Que el aumento de la longitud del cable y el aumento de la rigidez del tablero, es decir la disminución de la eficacia del mecanismo resistente del atirantamiento del tablero, conlleva una disminución del porcentaje de la parte pasiva respecto del axil total del tirante.
- ✓ Que la modificación de las cargas muertas no implica una variación importante del porcentaje de la parte pasiva del axil del tirante.
- ✓ Que el aumento de la tensión en el tirante implica un decremento de la parte pasiva del axil del tirante, dado que dicho aumento deriva de una menor área del tirante colocado y por lo tanto una menor rigidez y eficacia del sistema de atirantamiento.
- ✓ En definitiva se concluyó que, conforme se disminuye la rigidez del tablero manteniendo constante la del sistema de atirantamiento, mayor es el porcentaje de axil pasivo en el cable, es decir, que conforme aumenta la eficacia del atirantamiento aumenta a su vez la capacidad de absorber esfuerzos por parte del tirante después de ejecutado su tesado (esfuerzo pasivo).

4. Cuantificación del axil pasivo y activo en modelos calculados.

A lo largo del estudio realizado en [1] se pudo llegar a conocer, para los distintos casos estudiados, los porcentajes de axil pasivo y axil activo de cada uno. Todos estos valores se resumen en la Tabla 1, donde se presentan los resultados para un cable corto (cables 3I y 3D), un cable intermedio (cables 8I y 8D) y un cable extremo o de retenida (cables 18I y 18D). De estos valores se pueden deducir varias cuestiones:

%Axil pasivo respecto del axil final del tirante				
Cable	Modelo 90	Modelo 90M	Modelo 180	Modelo 90-5I
3D	7.0	23.0	24.0	0.0
3I	25.0	61.0	28.0	32.0
8D	13.0	29.0	25.0	8.0
8I	13.0	29.0	25.0	11.0
18D	9.0	9.0	8.0	9.0
18I	21.0	24.0	28.0	17.0

Tabla 1. % Axil pasivo respecto del axil final en los cables. Modelos 90, 90M, 180 y 90-5I.

- En primer lugar, que el porcentaje de axil pasivo es constante en los cables centrales, pero presenta singularidades importantes en el caso de los cables extremos.
- En segundo lugar, que a mayor rigidez del tablero menor será la componente pasiva de los tirantes, luego este aspecto deberá considerarse en adelante.
- Por último, que en ningún caso los axiles pasivos representan más allá de un 30% respecto del axil final del tirante.

Hay que indicar que estos valores se refieren al caso del axil pasivo respecto del axil final, pero en las situaciones de construcción, donde se alcanzará el mayor valor del axil calculado cuando se instale la dovella adyacente, en esas fases los porcentajes de axil pasivo serán muy superiores, dado que el efecto del peso de este elemento es directo sobre el cable. De esta última consideración se derivaría entonces que el porcentaje de axil pasivo de un cable será a su

vez variable en función de la fase del proceso constructivo que se analice.

5. Efecto de la puesta en carga errónea de un tirante.

De los cálculos desarrollados en [1] al aplicar un proceso erróneo de puesta en carga de un tirante en las estructuras comentadas (Modelos 90, 90M, 180 y 90-5I), se dedujo un efecto sobre los propios axiles de los tirantes que se puede resumir en la Tabla 2:

Desviación máxima respecto del valor teórico del axil del tirante			
Modelo	Cable	Final	Construcción
Modelo 90	3D	6.7	3.1
	8D	5.6	3.0
	18D	4.1	4.1
Modelo 90M	3D	6.1	1.9
	8D	6.4	2.2
	18D	4.1	4.2
Modelo 180	3D	8.8	2.2
	8D	6.3	2.5
	18D	3.8	3.8
Modelo 90-5I	3D	5.6	3.5
	8D	5.3	3.5
	18D	4.1	4.1

Tabla 2. %Desviación de los axiles en tirantes por proceso erróneo de montaje. Modelos 90, 90M, 180 y 90-5I.

De estos datos se deduce que:

- La cuantía de error no es homogénea en todos los cables de una estructura, para cada situación en concreto calculada, siendo mayor en los cables más cortos, es decir en los primeros colocados.
- Que la cuantía del error medio queda en el intervalo del 5 al 7% respecto del axil teórico, salvo en el caso del Modelo 180, donde claramente los errores son mayores, lo que implica que la luz de la estructura tendrá una cierta influencia en la cuantía de los errores finalmente introducidos por los cables.

En conclusión se podría señalar que la propia arbitrariedad en el axil de los tirantes, debida a los procesos erróneos de ejecución, tienen en general una repercusión relativamente acotada siempre que se realice un control de obra que permita limitar el valor de los errores introducidos.

6. Influencia de la variabilidad de las cargas permanentes.

Es importante también distinguir un aspecto específico, como es el momento en que se produce la variación de la carga permanente en relación al instante de la puesta en tensión de los tirantes.

Por ejemplo, se puede analizar situaciones donde el efecto de la variación de los pesos propios, respecto de los teóricos previstos, se produce antes de la instalación de los cables, caso de tableros cimbrados por completo sobre apoyos provisionales, donde la desviación debe ser asumida íntegramente por un ajuste del axil a aplicar a los cables. Este incremento se considerará cubierto, a nivel de las verificaciones en rotura, por los coeficientes de seguridad a aplicar a las cargas permanentes según la normativa vigente, pero tendrá sus implicaciones a nivel de las verificaciones en servicio y del control geométrico de la estructura que deberán ajustarse durante la propia ejecución.

Si la ejecución del tablero mediante dovelas es simultánea a la puesta en carga de los tirantes, como en los casos estudiados en [1], dichos errores en los volúmenes de hormigón deberían ser detectados y por lo tanto corregidos o ajustados durante la propia ejecución, siendo razonable pensar que debería eliminarse, o por lo menos reducirse, la causa de este error. Es decir, que la ejecución por avance en voladizo implicará un control de los pesos aplicados simultáneo a la colocación de los tirantes que no se dispone si el tablero se ejecuta sobre apoyos provisionales. Esta cuestión nos llevaría a plantear este aspecto, en relación a la variabilidad

de las cargas de peso propio, de forma diferenciada dependiendo del método constructivo empleado.

7. Control geométrico de la ejecución.

Según se indica en la referencia [4], el principal método para la corrección de las desviaciones producidas durante el proceso de montaje de los cables será la realización de un control geométrico de las deformaciones verticales del tablero, dada además la gran flexibilidad de este tipo de estructuras, sobre todo en las fases avanzadas del proceso constructivo.

Hay que tener en cuenta que la corrección geométrica de la rasante de un tablero en la situación final es, en la mayoría de los casos, muy difícil de lograr, por lo que la corrección geométrica de la rasante del tablero deberá realizarse durante el proceso constructivo, encajando la geometría del tablero respecto de los valores teóricos, bien mediante el ajuste de la posición del carro de avance, bien mediante el recálculo de los axiles a aplicar a los cables utilizando los resultados en deformaciones que la monitorización del tablero estaría aportando.

En cualquier caso, será muy importante distinguir el origen de las desviaciones de las deformaciones verticales, que se estén produciendo sobre el tablero, respecto de lo teóricamente calculado. Esas desviaciones podrán estar originadas por la actuación tanto de una carga térmica, como por alguna carga provisional no contemplada originalmente, como a una mala evaluación de las cargas permanentes o incluso por una incorrecta determinación del módulo de deformación del hormigón.

Teóricamente si los cables se instalan utilizando el método de las deformaciones, basado en la definición de la longitud en vacío de los cables (descrita en el epígrafe 2), tanto los efectos de la temperatura ambiente, como de los gradientes térmicos o de las cargas provisionales

aplicadas en la estructura se podrían evitar, al ser independiente de estos factores el parámetro utilizado para la puesta en tensión de los cables. Pero como se comenta en [3] y se dedujo en [1], este método exige un control geométrico muy preciso de la posición de los anclajes de los cables, aspecto que hace de muy difícil aplicación este método en el caso de los puentes con tablero de hormigón. Por este motivo, resulta que lo más habitual en puentes con tablero de hormigón sea la colocación de los cables mediante la medición de las fuerzas de tesado, siendo entonces necesario, antes de proceder a realizar ningún tipo de corrección, conocer el origen de las desviaciones detectadas.

El otro aspecto que dificultará el control geométrico del tablero será la flexibilidad de la estructura, es decir el orden de magnitud de las deformaciones a producirse. El problema puede aparecer cuando la estructura no sea tan flexible, como puede ocurrir en el caso de puentes de luces no muy grandes o bien en el caso de las fases iniciales del proceso constructivo. En estos casos el control geométrico deberá ser mucho más exigente.

Por el contrario se deberá asumir que en puentes con tablero de hormigón de luces cortas o medias los errores podrán ser introducidos y no corregidos, por lo que en los formatos de seguridad a plantear para los axiles de pretensado de los cables se debe valorar la cuantía de dichos errores.

8. Análisis de la normativa vigente.

Se procede a continuación a realizar un repaso de los planteamientos de la normativa actual en relación a los formatos de seguridad a aplicar a los tirantes:

a) *LAP11 e LAPF07.*

Se propone para el pretensado en cables que, al depender su valor directamente del valor de las cargas permanentes y por lo tanto, se deberán ver afectados por los mismos

coeficientes de seguridad utilizados para estas últimas.

b) *Eurocódigos.*

Tanto el documento de “Bases de cálculo”, como el documento de “Diseño de estructuras de cables de alta resistencia” se hace mención al tratamiento a dar a las acciones de pretensado de los tirantes de las estructuras de cables, indicando que se deberán considerar de forma conjunta con las cargas permanentes.

Establece también una diferenciación entre las fases provisionales de montaje y las fases definitivas de cálculo, señalando diferentes coeficientes de seguridad en ambas:

c) *Manual de tirantes. ACHE 2007.*

Se señala en este documento la diferenciación entre el comportamiento activo y pasivo de los tirantes, indicando el diferente origen de cada uno, y la necesidad de evaluar ambos efectos de diferente manera debido a su distinto origen.

Se señala además que la consideración adoptada en las normativas de acciones IAP98 de mayorar el pretensado por el mismo coeficiente que el de las cargas permanentes quedará del lado de la inseguridad en los casos en los que las estructuras sean relativamente rígidas.

d) *Haubans. Recommandation de la commission interministérielle de la précontrainte. SETRA 2001.*

Se indica en este documento la diferenciación entre las componentes activas y pasivas de las tensiones de los cables, así como se comenta que el control geométrico deberá ser capaz de detectar errores sistemáticos en la geometría ejecutada, que implicarán el recálculo de todo el proceso. Cuando se generen errores geométricos recomienda no corregirlos mediante variaciones en las tensiones de los cables.

Por último, en lo relativo a los formatos de seguridad empleados, remite a la aplicación de los mismos que se establecen en el Eurocódigo señalado anteriormente.

9. Revisión de estos planteamientos.

Diversos autores como Virlogeux [4], del Pozo [6] y Ruiz Terán [5], coinciden en señalar que al existir una parte del valor de las tensiones finales en los cables que depende de la magnitud de las cargas permanentes, se debería mayorar en consecuencia por los mismos coeficientes de seguridad empleados para el caso de estas cargas.

El problema se encuentra en el tratamiento de la parte activa de las tensiones finales en los cables, ya que llegados a este punto es donde encontraremos las discrepancias en su análisis.

Todos los autores antes indicados aceptan que el tratamiento del conjunto de las fuerzas de tesado de los cables por los mismos coeficientes de seguridad que las cargas permanentes no es correcto, y que incluso puede llevar a situaciones del lado de la inseguridad. En general se propone que sea el criterio del proyectista el que fije estos coeficientes de seguridad.

En concreto Ruiz-Terán [5] señala que el formato de seguridad propuesto por la normativa puede llevar a situaciones del lado de la inseguridad si el incremento de las acciones permanentes se produce después de haber tesado los tirantes.

Comentar que también Ruiz-Terán [5] señala muy acertadamente la incoherencia que supone de multiplicar los pesos propios por un coeficiente de 1'35, cuando el propio proceso constructivo implica la realización de un control geométrico del tablero que en definitiva sirve también para calibrar de forma muy ajustada los pesos del tablero.

Del Pozo [6] añade que el tratamiento de las fuerzas de tesado por el mismo coeficiente de seguridad que el aplicado a las cargas permanentes, será tanto más desacertado cuanto mayor sea la rigidez del tablero, es decir cuanto mayor sea la componente activa de las tensiones de los tirantes. Por lo que indica que para puentes de luces pequeñas o medias es cuando

este planteamiento llevará a mayores errores. Este autor propone finalmente la utilización de dos coeficientes de seguridad diferentes para cada componente de la tensión en los cables.

Por último hay que comentar que Ploch [7] planteó que los coeficientes de seguridad a emplear para el pretensado de los cables se mayorasen de distinta forma en función de la flexibilidad de la estructura.

10. Conclusiones derivadas de este estudio.

De todo lo señalado anteriormente se puede concluir:

- Que la componente pasiva del axil de un tirante depende principalmente de la rigidez relativa del atirantamiento respecto de la del tablero.
- Que el análisis de que parte del axil de un tirante procede de la aplicación de las cargas permanentes es complicado, ya que dependerá del cable en concreto en estudio.
- Que en puentes de luces cortas o medias pueden resultar las componentes pasivas de pequeña cuantía en relación al axil activo.
- Que el control geométrico permite una calibración muy aproximada de las cargas permanentes aplicadas sobre la estructura.
- Que en las estructuras analizadas la flexibilidad de la estructura no es tan alta como la que considera el formato de seguridad de la normativa.
- Que en algunos casos la consideración de la mayoración del axil de pretensado por el mismo coeficiente que las cargas permanentes puede dar lugar a situaciones del lado de la inseguridad.
- Que a partir de los resultados de la investigación [1] el efecto de un proceso erróneo de montaje de los cables lleva a unas desviaciones de los axiles teóricos, en general, relativamente acotadas, por lo que el criterio de mayorar la parte activa del axil de un tirante por unos coeficientes similares

a los del pretensado convencional sería razonable. Este planteamiento es tanto más válido cuanto mayor sea la rigidez del tablero en proporción a la del sistema de atirantamiento.

Por todo ello se concluye que, en el caso de puentes atirantados con tablero de hormigón luces medias y ejecución mediante voladizos sucesivos desde el pilono, puede ser razonable considerar la aplicación de los coeficientes de seguridad del pretensado convencional para el caso del axil de los tirantes.

Referencias

- [1] Carrillo Alonso, L. "Análisis teórico de la variación aleatoria de los esfuerzos de montaje de los cables en los puentes atirantados" Tesis doctoral dirigida por D.M.A. Astiz. UPM 2016
- [2] Svensson, H. "Cable-stayed bridges. 40 years of experience worldwide". Ernst&Sohn. 2012.
- [3] Gabrow, M.J. "Construction stage analysis of cable-stayed bridges". Thesis submitted to the Faculty of the Technical University of Hamburg. 2004.
- [4] Virlogueux, M. "Erection of cable-stay bridges. The control of the desired geometry". Conference AFPC sur le ponts suspendus et à haubans. Deauville. France. 1994.
- [5] Ruiz Terán, A. "Puentes atirantados no convencionales. Comportamiento estructural y criterios de diseño ". Tesis Doctoral dirigida por A.C. Aparicio. U.P. Cantabria 2005.
- [6] del Pozo, F. "Puentes atirantados. Modelización". Jornada Técnica anual sobre "Últimas tendencias y realizaciones de puentes atirantados". Madrid. Mayo 2007.
- [7] Ploch, J. "Zur definition und zum Sicherheitskonzept der vorspannung". Institut für Leichtbau Entwerfen und konstruieren. ILEK. Universidad de Stuttgart. 2004.