

Coeficiente de fricción por curvatura no intencional en concreto postensado

Wobble friction coefficient in post-stressed concrete

Diego Ernesto Dueñas Puentes¹ y Maritzabel Molina Herrera²

RESUMEN

En el presente artículo se establece un coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K) para puentes de placa y vigas y puentes por voladizos sucesivos a partir de los registros de tensionamiento de algunos puentes postensados construidos en Colombia, el cual es inferior al empleado habitualmente en el diseño de puentes postensados en el país y establecido por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) publicado por el Instituto Nacional de Vías en 1995. Este estudio parte del hecho de que en algunas importantes obras se obtienen alargamientos de torones mayores a los estimados teóricamente, puentes de los cuales se dispone de registros de tensionamiento y de los que se deducen valores de coeficientes más cercanos a los indicados por las últimas ediciones de la *Standard Specifications for Highway Bridges*, publicada por American Association of State Highway and Transportation Officials "AASHTO". En Colombia, el CCDSP, considera un coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K) para cables, con valores entre 0.0050 y 0.00066 m^{-1} , dependiendo del material del que esté fabricado el ducto (acero galvanizado, sin galvanizar, metal brillante), valor superior al encontrado en este trabajo. En este artículo, en primer lugar, se realiza una breve descripción del efecto de fricción a lo largo de los cables, presentando los diferentes valores de coeficientes de fricción indicados en el CCDSP y en "AASHTO.", en el diseño de puentes preesforzados. Se hace una corta descripción de cada uno de los puentes de los cuales se tienen registros de tensionamiento con el fin de identificar otras variables que intervienen en el proceso de tensionamiento como materiales, equipos y mano de obra, y posteriormente, a partir de la validación y tabulación de datos registrados en obra (registros en los cuales se controla la fuerza aplicada y el alargamiento de los torones), se efectuó la evaluación del coeficiente de fricción K por curvatura no intencional para las condiciones de todos los cables de cada puente. Por último, a partir del análisis de los resultados obtenidos a través de los registros se propone el coeficiente de fricción por curvatura no intencional para diferentes tipos de puentes en concreto postensado, el cual es inferior al indicado por el CCDSP. También se presenta la relación existente entre el coeficiente de fricción por curvatura no intencional y la longitud de los cables ya que aparentemente no existe relación entre el coeficiente por curvatura no intencional y el área de los torones. Adicionalmente, y teniendo en cuenta la influencia del equipo de tensionamiento, de los materiales y de la mano de obra, se sugiere un formato para el registro de tensionamiento con el fin de disminuir las imprecisiones en las lecturas. Todo lo anterior conlleva a una reducción en los costos de tensionamiento, debido al mejor aprovechamiento del mismo.

Palabras clave: coeficiente de fricción, alargamientos, torón, cables, puentes por voladizos, puentes de placa y vigas.

ABSTRACT

This work was aimed at establishing a wobble friction coefficient (K) from records regarding some post-stressed bridges built in Colombia. Such records were arranged and analysed together with stress diagrams resulting from the corresponding plans, calculations and reports. Suitable records were produced from this review to make the analysis. Once the records had been selected, the probable wobble friction coefficient (K) was then calculated for each case and this coefficient was related to the length of the cable and the total area of the strands composing the cable. These records and their results were subsequently grouped according to the type of bridge to produce a wobble friction coefficient (K) for each specific structure. The study indicated that the wobble friction coefficient was lower than that indicated by the Colombian Seismic Bridge Design Code, Instituto Nacional De Vías, 1995]. The influence of tensioning equipment, materials and labour suggested a format for recording tensioning to reduce inaccuracy when readings are being taken. A reduction in the costs of tensioning would arise from taking the forgoing into account.

Keywords: wobble friction coefficient, strain, strand, cable, cantilever bridge, beam-slab bridge.

Recibido: diciembre 7 de 2006

Aceptado: octubre 26 de 2007

¹ Ingeniero civil, Especialista en estructuras y M. Sc., en Ingeniería - Estructuras, Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero especialista, Darío Farías y Cía Ltda. Profesor ocasional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. deduenasp@unal.edu.co

² Ingeniera civil, M. Sc., en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia. Estudiante del doctorado en Análisis Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. mmolinah@unal.edu.co

Introducción

De acuerdo con los registros de algunas obras construidas a partir del año 1999, es posible que el coeficiente de fricción por curvatura no intencional sea menor al indicado por el CCDSP (Instituto Nacional de Vías, 1995), caso en el cual se puede aprovechar mejor el tensionamiento en una estructura, efecto que conllevaría a una reducción de costos.

A nivel mundial, el estudio de las pérdidas por fricción (curvatura y curvatura no intencional) se ha desarrollado desde el año 1950, manteniéndose los valores establecidos casi invariables, en especial el valor de coeficiente de fricción por curvatura (μ), salvo lo señalado a partir de la edición interina de 1997 de "AASHTO." (American Association Of State Highway And Transportation Officials). En Colombia, el CCDSP (Instituto Nacional de Vías, 1995), al igual que la edición 16 de A.A.S.H.T.O., consideran un coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K) para cables, con valores entre 0.0050 y 0.00066 m^{-1} (0.0015 y 0.00020 ft^{-1}), dependiendo del material del que esté fabricado el ducto (acero galvanizado, sin galvanizar, metal brillante).

Actualmente en Estados Unidos, AASHTO (2002) elimina el empleo de ductos sin galvanizar y establece un coeficiente de fricción igual a 0.0002 ft^{-1} ó 0.00066 m^{-1} (desde la aparición de la norma interina de 1997), con ello se logra una disminución en los costos de tensionamiento al poder proveer desde el diseño una fuerza de tensionamiento con menores pérdidas inmediatas, de tal forma que para una misma sección se puede disminuir el tensionamiento entre un 10% y un 15% aproximadamente. Por otro lado, AASHTO. (2002) indica que al trabajar con valores altos del coeficiente de fricción indirectamente se está permitiendo un bajo control de obra en la etapa de colocación y tensionamiento de los cables.

La investigación recopilada en este artículo tuvo como objetivo principal determinar el coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K) en puentes de concreto post-tensado, a partir de registros de tensionamiento de algunos puentes construidos en Colombia, para ello comparó el coeficiente de fricción por curvatura no intencional de cada cable determinado a partir de registros de campo, con los valores establecidos en el CCDSP (Instituto Nacional de Vías, 1995), y por último, se propone un coeficiente de fricción por curvatura no intencional para ser empleado en el diseño de puentes en concreto post-tensado dependiendo del tipo de superestructura.

Generalidades del efecto de fricción

Las pérdidas de preesfuerzo en el concreto preesforzado se pueden agrupar en dos categorías (Lin, 1969, p. 110):

- Pérdidas elásticas inmediatas: ocurren durante el proceso de construcción del elemento. En esta categoría se encuentran las pérdidas por fricción, por penetración de cuña y por acortamiento elástico del concreto.

- Pérdidas diferidas o a largo plazo: se presentan durante el período inicial de funcionamiento del elemento (primeros años). Se consideran como pérdidas diferidas: la retracción de fraguado, el flujo plástico del concreto y la relajación del acero.

La determinación exacta de estas pérdidas, en especial las diferidas, no es fácil de realizar, ya que dependen de un gran número de factores, razón por la cual los parámetros empleados en los códigos de diseño han sido calculados por métodos empíricos.

Dentro de las pérdidas elásticas inmediatas se encuentran las ocasionadas por fricción, que son debidas a la curvatura de los torones en el interior del ducto (por el trazado de acuerdo con el diseño estructural) y las producidas por la curvatura no intencional (ocasionadas por la colocación del ducto con respecto del refuerzo pasivo).

Las pérdidas (ΔP) por curvatura no intencional a lo largo de una longitud infinitesimal dx , están expresadas como:

$$\Delta P = K P dx \quad (1)$$

P : fuerza en el elemento de longitud dx .

K : coeficiente empírico, denominado coeficiente por curvatura no intencional.

De otra parte, observando la Figura 1, si el tendón o torón a lo largo de la longitud dx presenta un cambio en el ángulo $d\alpha$, la fuerza normal N será igual a:

$$N = 2 P \text{sen}(d\alpha / 2) \quad (2)$$

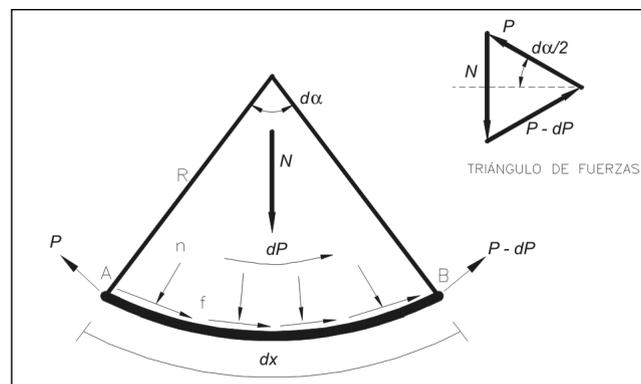


Figura 1. Cuerpo libre fuerzas de tensionamiento (basado en Lin, T. Y., 1963, p. 131).

Si el coeficiente de fricción entre el torón y el ducto se denomina μ , las pérdidas por fricción (dP) a lo largo de dx son iguales a μN . Como el ángulo involucrado generalmente es pequeño, la expresión " $2 \text{sen}(d\alpha / 2)$ " se puede tomar igual a $d\alpha$, con lo cual, las pérdidas por fricción a lo largo de la longitud infinitesimal dx corresponden a:

$$dP = \mu P d\alpha. \quad (3)$$

El cambio de fuerza entre cualquier par de puntos A y B a lo largo de un torón se puede calcular al integrar las anteriores expresiones:

$$\int_{P_B}^{P_A} \frac{dP}{P} = \mu \int_0^\alpha d\alpha + K \int_0^x dx \quad (4)$$

Resolviendo las integrales se encuentra que la fuerza en el punto B , cuando la carga es aplicada en A , es igual a:

$$P_B = P_A e^{-(\mu\alpha + Kx)} \quad (5)$$

P_B : fuerza de tensión en el punto bajo consideración

P_A : fuerza de tensión en el punto inicial, generalmente el anclaje

μ : coeficiente de fricción por curvatura

α : ángulo de variación entre los puntos considerados

x : longitud del tramo analizado.

A partir de las formulaciones anteriores se puede deducir que en trazados típicos de cables en puentes, el coeficiente por fricción por curvatura (μ) puede ser más relevante en cables cortos, mientras que para cables largos es más importante el coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K).

En la Tabla 1 se presenta un resumen con los diferentes valores de los coeficientes de fricción mínimos recomendados por la norma AASHTO (2002) y el CCDSP (Instituto Nacional de Vías, 1995), en ausencia de datos experimentales para el diseño:

Tabla 1. Coeficiente de fricción según normas de diseño de puentes

Ducto	Parámetro	AASHTO ED. 16 1996	CCP 1995	AASHTO ED. 16 Interim 97 a 00	AASHTO Ed 17 2002	AASHTO LRFD 2ª ED 2002
Rígido y semirrígido galvanizado	μ	-	-	0.15-0.25	0.15-0.25	0.15-0.25
	K (m^{-1})	-	-	0.00066	0.00066	0.00066
Metal brillante	μ	0.30	0.30	-	-	-
	K (m^{-1})	0.0066	0.0066	-	-	-
Metal galvanizado	μ	0.25	0.25	-	-	-
	K (m^{-1})	0.0049	0.0049	-	-	-
Galvanizado rígido	μ	0.25	0.25	-	-	-
	K (m^{-1})	0.00066	0.00066	-	-	-

Con respecto al alargamiento esperado, este se calcula siguiendo los principios de la teoría elástica de la siguiente forma:

$$\delta = PL / AE \quad (6)$$

P : fuerza de tensión

L : longitud del torón

A : área del torón

E : módulo de elasticidad del acero.

Descripción de puentes estudiados

Los puentes estudiados fueron construidos por diferentes firmas colombianas, empleando diversos sistemas de tensionamiento, y el diseño estructural fue realizado por la firma Darío Farías y Cía. Ltda. Los registros de tensionamientos analizados se dividieron en dos grupos, según el tipo de estructura: puentes de placa y vigas y puentes por voladizos sucesivos.

Puentes de placa y vigas

Viaducto K7

Este viaducto hace parte del Contrato No. 151 de 2002 "Construcción y pavimentación de la vía alterna interna Buenaventura, sector viaducto K7 – intersección Citronela, incluido el viaducto K7 y la intersección Citronela Ruta 40 tramo 4001" del Instituto Nacional de Vías. La construcción se inició en el año 2002, terminó en el 2004 y fue realizada por la firma Construcciones Civiles S.A. El viaducto tiene una longitud aproximada de 400 m, conformado por 16 luces de 25 m de longitud. El tensionamiento de las vigas está compuesto por 5 cables. Cada cable tiene entre 7 y 10 torones de $\frac{1}{2}$ " de diámetro nominal. De acuerdo con la información obtenida en campo (320 registros de tensionamiento), la longitud total de los cables es de 7.299 m, que corresponde aproximadamente a 51.900 m de torón de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. El tensionamiento se realizó con un gato T350 de Tecpresa.

Viaducto K9

Este viaducto hace parte del Contrato No. 151 de 2002 "Construcción y pavimentación de la vía alterna interna a Buenaventura, sector viaducto K7 – intersección Citronela, incluido el viaducto K7 y la intersección Citronela Ruta 40 tramo 4001" del Instituto Nacional de Vías. La construcción fue realizada por la firma Construcciones Civiles S.A., iniciando en 2002 y terminando en 2004. El viaducto tiene una longitud aproximada de 425 m, conformado por 17 luces de 25 m de longitud. El tensionamiento de las vigas está compuesto por 5 cables. Cada cable tiene entre 7 y 10 torones de $\frac{1}{2}$ " de diámetro nominal. Con base en la información obtenida en campo (340 registros de tensionamiento), la longitud total de los cables es de 7.750 m, que corresponde aproximadamente a 55.050 m de torón de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. El tensionamiento se realizó con un gato T350 de Tecpresa.

Puentes por voladizos sucesivos

Viaducto Pipiral

El viaducto Pipiral corresponde al Contrato 0484/99 "Estudio, diseño y construcción del viaducto Pipiral y sus accesos de la Carretera Santafé de Bogotá – Villavicencio", firmado entre el Instituto Nacional de Vías y Construcciones Civiles S.A. La etapa de estudios y diseño comenzó en el año 2000, finalizándose la construcción en el año 2002. El viaducto tiene una longitud aproximada de 545 m, conformado por un puente principal de 500 m de longitud y una luz de acceso de 22,5 m en cada extremo. El puente principal está compuesto por 3 luces centrales de 125 m y dos luces laterales de 62,5 m. El tensionamiento del puente principal está conformado por:

- Tensionamiento en fase isostática: cables de 19 torones de 1/2" de diámetro nominal.
- Tensionamiento de continuidad: cables de 12 torones de 1/2" de diámetro nominal.

Con base en la información obtenida en campo, la longitud total de torones de 1/2" de diámetro es de aproximadamente 57.100 m para cables de continuidad (114 registros de tensionamiento) y cerca de 233.800 m para cables en fase isostática (216 registros de tensionamiento). El tensionamiento se realizó empleando gatos tipo T-350 de Tecpresa.

Puente Paso La Torre

El puente Paso La Torre hace parte de la Concesión Malla Vial del Valle del Cauca y Cauca, en el tramo 5 Mulaló – Mediacanoa. La construcción de los puentes fue realizada por la Unión Temporal para la Construcción de la Malla Vial del Valle del Cauca y Cauca entre los años 1999 y 2001. Debido a que la vía es de doble calzada se tienen dos puentes idénticos, cada uno ubicado en una calzada. La longitud de cada puente es de 200 m aproximadamente, con una luz principal de 100 m y dos luces laterales de 49,6 m cada una. El tensionamiento del puente está constituido por:

- Tensionamiento en fase isostática: cables de 19 y 12 torones de 1/2" de diámetro nominal.
- Tensionamiento de continuidad: cables de 12 torones de 1/2" de diámetro nominal.

A partir de la información obtenida en campo, la longitud total de torones de 1/2" de diámetro es cercana a 20.200 m para cables de continuidad (48 registros de tensionamiento por calzada, 96 registros en total) y aproximadamente 135.000 m para cables en fase isostática (92 registros de tensionamiento por calzada, 184 registros en total). El tensionamiento de los cables de 19 torones fue realizado con un equipo ZPE19 de VSL, mientras que para los cables de 12 torones se empleó un equipo ZPE12 de VSL.

Puente Puerto Isaac

El puente Paso La Torre hace parte de la Concesión Malla Vial del Valle del Cauca y Cauca, en el tramo 6 Cencar – Aeropuerto. La construcción del puente fue realizada por la Unión Temporal para la Construcción de la Malla Vial del Valle del Cauca y Cauca, entre los años 1999 y 2002. La longitud aproximada del puente es de 181,4 m aproximadamente, con una luz principal de 116. m y dos luces laterales de 32,7 m cada una. El tensionamiento del puente está constituido por:

- Tensionamiento en fase isostática: cables de 19 torones de 1/2" de diámetro nominal.
- Tensionamiento de continuidad: cables de 12 torones de 1/2" de diámetro nominal.

De acuerdo con la información obtenida en campo, la longitud total de torones de 1/2" de diámetro es de 14.700 m aproximadamente para cables de continuidad (28 registros de tensionamiento) y alrededor de 70.100 m para cables en fase isostática (84 registros de tensionamiento). El tensionamiento de los cables de 19 torones se realizó con un equipo ZPE19 de VSL; de otra parte, para los cables de 12 torones se empleó un equipo ZPE12 de VSL.

Puente Yondó

El puente Yondó corresponde al Contrato No. 934 de 2001 "Estudios y diseños del puente sobre el río Magdalena en la carretera Barrancabermeja – Yondó" celebrado entre el Instituto Nacional de Vías y el Consorcio Desarrollo de Vías en el año 2002. La construcción estuvo a cargo de la firma ConConcreto S.A entre los años 2003 y 2005. La etapa de estudios y diseño se realizó en el año 2000. El puente principal tiene una longitud aproximada de 399,2 m. Está conformado por una luz central de 200 m y dos luces laterales de 99,6 m. El tensionamiento del puente principal está constituido por:

- Tensionamiento en fase isostática: cables de 19 torones de 5/8" de diámetro nominal.
- Tensionamiento de continuidad: cables de 12 torones de 5/8" de diámetro nominal.

Con base en la información obtenida en campo, la longitud total de torones de 5/8" de diámetro es de aproximadamente 127.600 m para cables en fase isostática (68 registros de tensionamiento). El tensionamiento fue realizado con un gato ZPE460-31 de VSL. En el momento del desarrollo de la investigación, sólo se habían construido los voladizos tres y cuatro del puente principal. En la Tabla 2 se presenta un resumen con los datos generales de los cables.

Procedimiento de análisis

A partir del trazado teórico de los cables y de los registros de tensionamiento de las obras estudiadas, en los cuales se

encuentran las características de los torones (área, módulo de elasticidad, longitud de cables) y los datos del tensionamiento (fuerza de tensionamiento, alargamientos), se elaboraron las correspondientes gráficas de tensionamiento que permitieran determinar la relación existente entre el coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K) con el área de los torones y la longitud de los cables. Este análisis se realizó para cada uno de los registros de tensionamiento (1.450 registros).

Tabla 2. Datos generales de los cables

Puente	Diámetro torones	Longitud cables (m)		Longitud total torones (m)	Número de registros
		mínima	máxima		
Viaducto K7	1/2"	17.6	24.2	~51900	320
Viaducto K9	1/2"	17.6	24.2	~50500	340
Pipiral	1/2"	11.1	121.8	~290900	330
Paso La Torre	1/2"	8.1	97.1	~155200	280
Puerto Isaac	1/2"	8.1	63.2	~84800	112
Yondó	5/8"	11.2	196.3	~127600	68

En la etapa de diseño se busca determinar el alargamiento esperado para ciertas condiciones conocidas (carga, geometría, propiedades de los cables) y supuestas (coeficientes de fricción), mientras que en obra, se conocen los alargamientos, cargas, geometría y propiedades de los cables y se desconocen los coeficientes de fricción.

Por esta razón, a partir de los resultados de obra se estima un coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K) de tal forma que los alargamientos obtenidos según los principios de fricción sean iguales a los leídos en obra. Este

procedimiento se realiza sucesivamente hasta encontrar el valor adecuado del coeficiente K . Debido a la longitud y al trazado de los cables, se asumió que la diferencia inducida al considerar fijo el efecto de fricción por curvatura del cable (μ), no afecta apreciablemente los resultados.

Con la información recopilada se elaboraron gráficas que relacionan el valor del coeficiente de fricción por curvatura no intencional K , con el área de los torones y con la longitud del cable. En la Figura 2 se presenta el formato empleado para calcular los alargamientos (diagrama de tensionamiento), tanto teóricos como de obra.

Resultados obtenidos

Evaluación de K con los datos de tensionamiento

A partir de una tabulación de resultados se encuentra que no se tiene una relación directa entre el coeficiente K y el área de los torones de los cables a pesar de que se puede considerar que existe una mayor superficie de contacto entre los torones y el ducto. A manera de ejemplo, en la Figura 3 se presenta la relación entre K y el área de torones para el viaducto Pipiral.

Con respecto a la relación entre el número de extremos tensionados (un extremo o ambos extremos) y el coeficiente de fricción K , tampoco

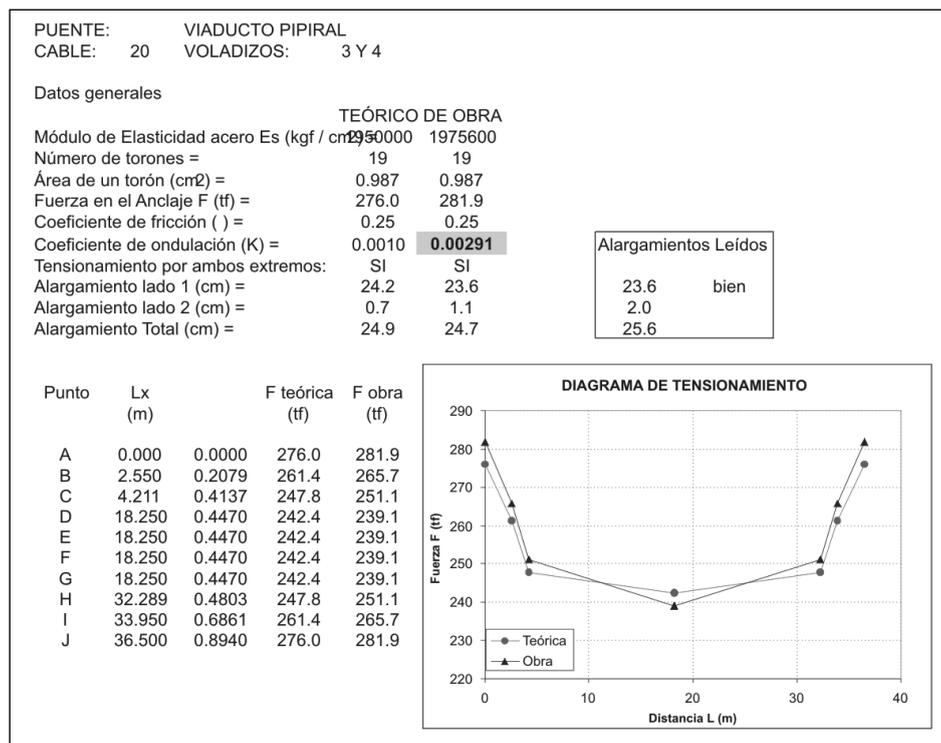


Figura 2. Formato para cálculo de alargamientos

se encontró relación alguna.

En las figuras 7 a 9 se presenta el resumen de datos para los resultados del coeficiente K en función de la longitud del cable, para puentes de placa y vigas, cables isostáticos y de continuidad, respectivamente.

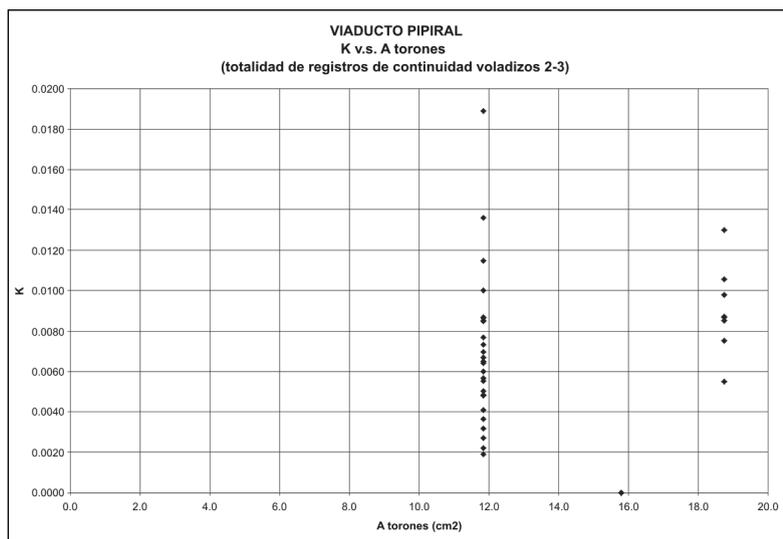


Figura 3. Relación coeficiente K y área de torones

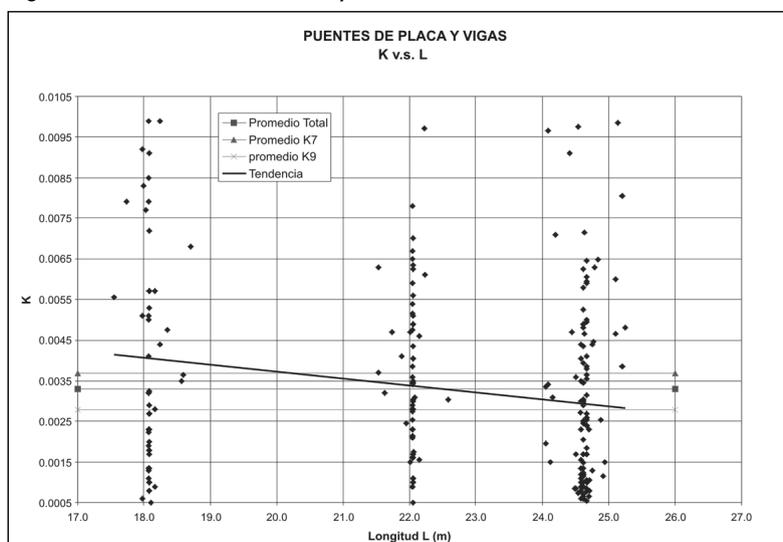


Figura 4. Relación coeficiente K y longitud cables. Puentes de placa y vigas (resumen)

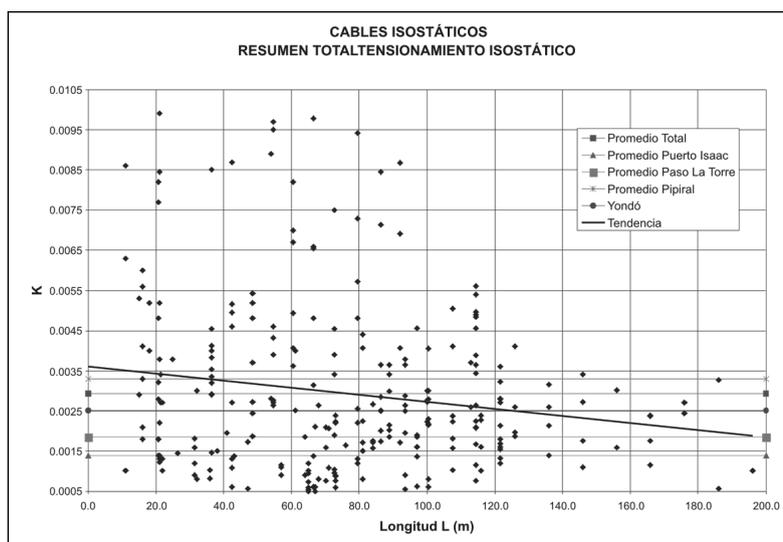


Figura 5. Relación coeficiente K y longitud cables isostáticos. Puentes por voladizos (resumen)

Determinación del coeficiente K según el tipo de puente

En la Tabla 3 se relaciona el coeficiente por curvatura calculado anteriormente, así como el número de registros analizados (NRA), el número de registros empleados en la determinación del coeficiente (NRDC) y el porcentaje que representan los registros empleados con respecto al total.

Conclusiones

Como se determinó en este trabajo, es posible que en Colombia se presente una reducción de los costos de tensionamiento, disminuyendo el coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K).

Se analizaron 1.406 registros de tensionamiento, equivalentes al mismo número de cables, con longitudes entre 8 m y 200 m aproximadamente, para una longitud total de torones de aproximadamente 760.000 m. De estos registros, fue posible emplear 638 registros (cerca del 45% del total), lo cual indica que la toma de datos en obra no es la más apropiada y que se debe, además de exigir un control más estricto, manejar formatos que contengan todas las variables que puedan afectar la toma de datos.

A partir de la evaluación realizada, se propone que el coeficiente de ondulación o coeficiente por curvatura no intencional (K) estipulado en el CCDSP (Instituto Nacional de Vías, 1995) sea reducido a los valores indicados en la Tabla 4, de acuerdo con el tipo de puente.

El coeficiente K calculado para los cables de continuidad en los puentes de voladizos sucesivos es el mayor de los resultados obtenidos, y su valor difiere apreciablemente de los demás resultados. Es posible que esta diferencia sea debida a las variadas curvaturas que presenta el cable, tanto por el trazado propio del cable, como por la curva de la placa inferior del puente, lo que implicaría que las pérdidas por curvatura son mayores que las contempladas en el diseño. Esto puede ocurrir porque los alargamientos obtenidos en obra tienden a ser mucho menores que los teóricos.

Con respecto a la influencia de la longitud del cable se observa una tendencia a obtener menores valores del coeficiente de ondulación K , a medida que aumenta la longitud del cable. No se encontró una relación entre el coeficiente de ondulación K y el área de los torones. Tampoco se evidenció influencia alguna entre el valor del coeficiente K y la forma de tensionamiento de los cable (por uno o ambos extremos).

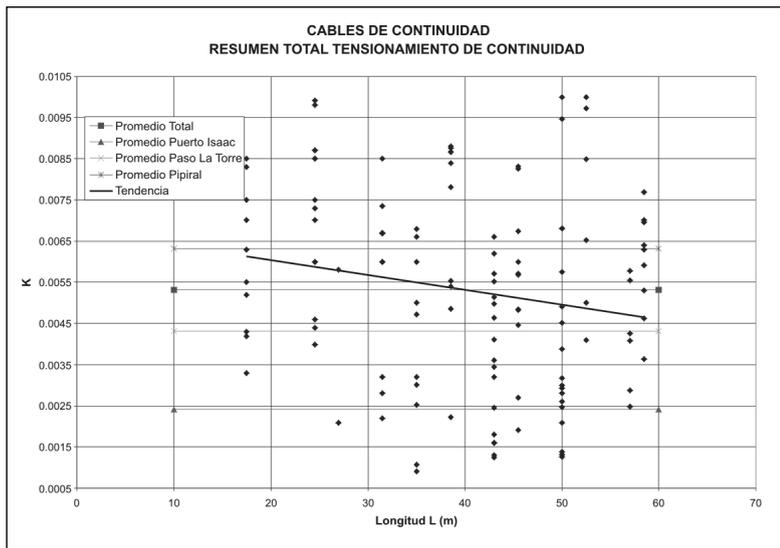


Figura 6. Relación coeficiente K y longitud cables de continuidad. Puentes por voladizo (resumen)

Tabla 3. Valor promedio del coeficiente K de acuerdo con el tipo de elemento

Tipo de puente	Tipo de cable	Coficiente K sugerido (m ⁻¹)
Placa y vigas	Todos	0.0033
Voladizos sucesivos	Isostático	0.0029
	Continuidad	0.0053

Tabla 4. Valor del coeficiente K sugerido.

Tipo de puente	Tipo de cable	Coficiente K promedio (m ⁻¹)	No. de registros (NRA)	No. de registros (NRDC)	% NRDC/NRA
Placa y vigas	Todos	0.0033	660	245	37.1
Voladizos sucesivos	Isostático	0.0029	552	271	49.1
	Continuidad	0.0053	194	122	62.9

Una vez analizados los registros de tensionamiento de 6 puentes construidos recientemente en Colombia, se observó que el hecho de no poder emplear un elevado número de registros indica que las lecturas de alargamientos de torones realizada en campo y de presiones reales (fuerza aplicada) no son adecuadas, por lo tanto, se debe establecer un proceso más riguroso para mejorarlas, ya que un error de pocos milímetros en la lectura puede resultar en una gran diferencia en alargamientos y por lo tanto en pérdidas.

La reducción del valor del coeficiente de fricción por curvatura no intencional K conduce a una reducción de costos de tensionamiento, especialmente en puentes de gran longitud. Además esta reducción de costos también

conlleva a un mejor control en la verificación del tensionamiento.

Recomendaciones

Se recomienda recopilar información de otros puentes que se están construyendo en el país, para corroborar o ajustar los resultados obtenidos con respecto al coeficiente de fricción por curvatura no intencional K.

Debido a que los principales problemas en el tensionamiento son producto de las diferencias de alargamientos, se recomienda emplear el formato de tensionamiento sugerido por Dueñas (Dueñas, 2006) y presentado en la Figura 7, en el cual se consigna toda la información necesaria para establecer si el procedimiento

de tensionamiento ha sido apropiado y se puede ejercer un control más detallado de los equipos empleados, del proceso de tensionamiento y del personal, con el fin de evitar posteriores problemas durante la vida útil de la estructura, ya que de ser necesario es posible tomar las medidas correctivas en la etapa de construcción de los elementos postensados. Por otro lado, la información consignada en el formato permite una futura tabulación de datos para poder recalculer de forma más confiable los valores del coeficiente de fricción por curvatura no intencional o coeficiente de ondulación (K).

Formato de tensionamiento propuesto

En la Figura 7 se presenta el formato propuesto para la toma de datos de tensionamiento. En este formato se incluyen los datos generales de la obra, del elemento a tensionar, las características de los materiales y la información del equipo de tensionamiento.

Los valores de alargamientos y presiones medidos en obra se anotan en el bloque de "control de tensionamiento", en el cual también se calculan los alargamientos totales y el porcentaje con respecto al alargamiento teórico corregido (los valores sombreados corresponden a la información tomada durante el proceso de tensionamiento). El alargamiento teórico corregido debe tener en cuenta el diámetro real de los torones y el módulo de elasticidad del acero, valores tomados de los respectivos certificados de calidad.

Por último, se incluyen observaciones generales sobre el proceso de tensionamiento y las firmas de los responsables del proceso; así se logra un control directo en obra, con lo cual, se pueden tomar las medidas correctivas antes de proceder con la inyección del ducto.

