

Estimación experimental de los coeficientes de fricción por desviación (k) y curvatura (μ) en cables postensados, mediante instrumentación electrónica.

Fecha de recepción: Febrero de 2009
Fecha de aprobación: 14 de julio del 2009

Resumen

En este trabajo se realizó una estimación experimental de los coeficientes de fricción por desviación y curvatura de cables postensados con diferentes materiales de ductos, uno plástico y otro metálico galvanizado, por medio de su instrumentación electrónica.

Para esto se construyeron dos vigas de concreto postensado, cuya instrumentación se realizó empleando un sistema de adquisición de datos y galgas de deformación, con los cuales se determinó la variación de las deformaciones unitarias y; por lo tanto, las pérdidas de tensión de los cables a lo largo de su longitud. Este diseño se concibió como un puente peatonal tipo viga losa.

Conociendo la geometría y las fuerzas de tensionamiento en cada punto de los cables, se estimaron los rangos de los coeficientes de fricción por desviación no intencional (k) y curvatura (μ), los cuales se compararon con las normas nacionales e internacionales. En esta investigación, se obtuvo para los ductos metálicos, que los rangos de sus coeficientes de fricción por desviación no intencional (k) son similares a los recomendados por las normas, mientras que los coeficientes por curvatura (μ) son mayores.

Para los ductos plásticos, los valores de sus coeficientes de fricción (k y μ), estimados en esta investigación son innovadores, ya que las normas consultadas no los especifican, por lo cual se constituyen en un aporte para la ingeniería nacional. Dicho trabajo es una base o semilla, que puede ampliarse con más investigaciones y posteriormente servir para las actualizaciones de la norma nacional. Este trabajo se realizó gracias al apoyo de VSL INTERNACIONAL y CEMEX, generando transferencia en tecnología e innovación para la industria y la sociedad.

Palabras clave: Puente Postensado, Preesforzado, Coeficientes de fricción, Coeficiente de desviación, Coeficiente de curvatura, Pérdidas instantáneas, Estimación experimental, Instrumentación Electrónica.

Abstract

This paper conducted a pilot estimate of the friction coefficients for deviation and post-curvature of wires of different pipeline materials, of galvanized metal and plastic, through its electronic instrumentation.

For this purpose, two post-stressed concrete beams were built, whose instrumentation was performed using a data acquisition system and strain gages, the ones which were used to determine the variation of the unit strain values, and therefore the tension losses of the cables, along their length. The design was conceived as a slab-beam type pedestrian crossway.

Carlos Eduardo Poveda Salamanca
Pontificia Universidad Javeriana
cpoveda@javeriana.edu.co
Jaime Andrés Rojas López
Pontificia Universidad Javeriana
jaime.rojas@javeriana.edu.co
Edgar Eduardo Muñoz Díaz
Pontificia Universidad Javeriana
edgar.munoz@javeriana.edu.co

Knowing the geometry and the tension at each point of the cables, the ranges of the friction coefficients were estimated for both, unintentional deviation (k) and curvature (μ), which were compared with national and international standards. In this research, it was concluded that the ranges of the friction coefficients of metallic pipelines for unintentional deviation (k) are similar to those recommended by the standards, while the coefficients for curvature (μ) are higher.

For plastic products, the values of their coefficients of friction (μ), estimated in this research are innovative, because they are not included in the standards, thus it is a contribution to the national engineering. This work is the base for further research and also to update the national standards. This project was possible thanks to the support of VSL International and CEMEX, generating innovation and technology transfer to the industry and the society.

Key words: Postensed Bridge, Prestressed, Friction Coefficients, Deviation Coefficient, Curvature Coefficient, Missed Snapshots, Experimental Estimation, Electronic Instrumentation.

1. Introducción

En Colombia no se cuenta con una verificación de los coeficientes de fricción en cables de preesfuerzo, debido a que las especificaciones establecidas en los diferentes códigos y normas de diseño son una recopilación de normas internacionales, las cuales emplean materiales utilizados en los Estados Unidos; estos materiales difieren de los utilizados actualmente en obra en nuestro país, por lo que genera cierta incertidumbre sobre si se está diseñando por encima o por debajo de lo que realmente solicita la estructura de preesforzado. De acuerdo a lo anterior, los valores y rangos de estos coeficientes dados por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) y la Normas Colombianas de diseño y construcción sísmo resistente (NSR-98), no proporcionan una completa seguridad en el diseño de los elementos estructurales preesforzados por la incertidumbre que hay sobre su comportamiento. Se realizó la evaluación experimental por medio de la instrumentación electrónica de los cables de dos tipos de vigas con diferente material de ducto (metal galvanizado y plástico en PVC corrugados, materiales utilizados actualmente en obra a nivel nacional) para

hallar valores aproximados de los coeficientes de fricción por desviación (K) y curvatura (μ), y poder así determinar las pérdidas instantáneas de la fuerza del preesforzado.

2. Objetivos

Determinar experimentalmente para dos vigas de concreto postensado, los coeficientes de fricción por desviación (K) y curvatura (μ) de cuatro cables (dos por viga) y compararlos con los especificados en el CCDSP y la NSR-98. Además:

a. Evaluar el estado del conocimiento a nivel nacional e internacional relacionado con el estudio experimental y analítico de los coeficientes de fricción de los cables de preesforzado, especificados en el CCDSP y la NSR-98.

b. Comparar el diagrama de tensionamiento experimental de cada cable, a partir de las pérdidas instantáneas con base en su instrumentación, con respecto al diagrama de tensionamiento analítico que generalmente es calculado por la ingeniería nacional y el cual se realiza siguiendo las especificaciones del CCDSP y la NSR-98.

3. Metodología

3.1 Diseño y construcción de las vigas postensadas

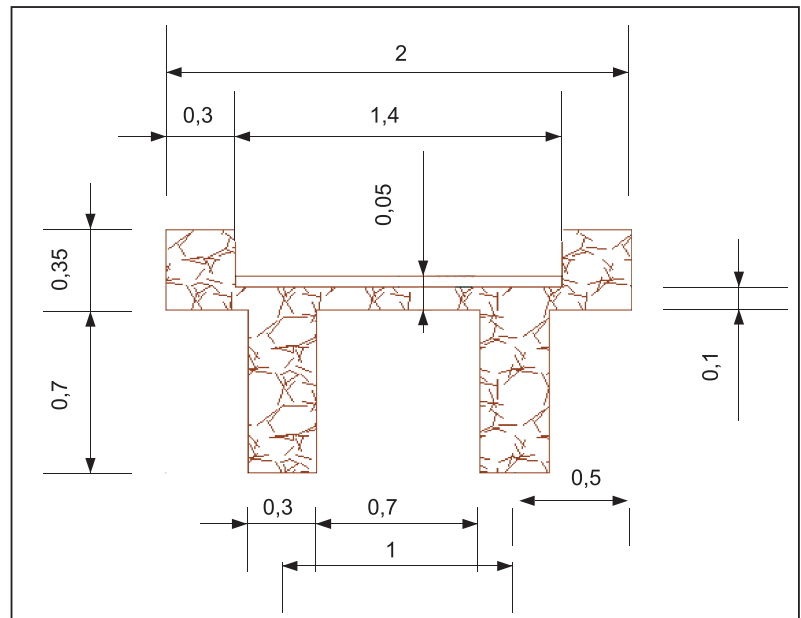
El diseño comprende la construcción de dos vigas de concreto postensado de 15 metros de luz, las cuales se diseñaron con concreto de alta resistencia de 35 MPa (ver Figura 1), cada una de ellas con diferente material de ducto (plástico y metálico), (ver Figura 2). El diseño de las vigas se realizó para que soportara su peso propio, losa, riostra, pavimentos, bordillos, barandas y carga viva; esto para un próximo trabajo de investigación, en el cual se tiene proyectado evaluar la capacidad de toda la estructura y diferentes tipos de reforzamiento como preesforzado exterior y/o fibras de carbono.

3.2 Instrumentación

Mediante la empresa Omega Engineering Inc, se adquirieron las galgas de deformación utilizadas para este trabajo, las cuales fueron calibradas mediante la realización de dos pruebas en la Empresa EMCOCABLES. Los resultados obtenidos experimentalmente fueron comparados con los

Sistema de vigas-losa de puente peatonal

Figura 1



calculados teóricamente, encontrando comportamientos similares, por lo que los datos arrojados por este sistema electrónico son confiables.

Los materiales utilizados para el sistema preesforzado, tales como ductos metálicos galvanizados, ductos plásticos, torones, entre otros (ver Figura 3), fueron brindados por la empresa SISTEMAS ESPECIALES DE CONSTRUCCIÓN VSL. La instalación del sistema

Construcción final de vigas postensadas

Figura 2



Figura 3 Materiales de preesforzado



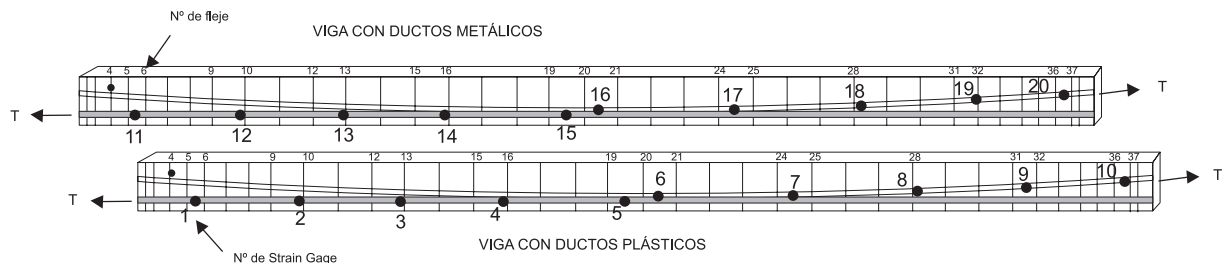
Figura 4 Galga de deformación instalada sobre torón



electrónico con galgas de deformación fue realizada sobre los torones (ver Figura 4 y Figura 5), marcando los puntos donde fueron instalados.

Como etapa final de la construcción de las vigas se procede al adecuado formateado (ver Figura 6), la

Figura 5 Ubicación de las galgas de deformación en las vigas postensadas



empresa Cemex Colombia proporcionó la cantidad de concreto necesaria para la fundida de las vigas, se procedió al vaciado de las mismas y a la toma de cilindros (ver Figura 7), para la realización de ensayos de compresión y de módulo de elasticidad.

4. Desarrollo y análisis de resultados

Para realizar el tensionamiento de las vigas se utilizó el sistema de adquisición de datos National Instruments de la Pontificia Universidad Javeriana conectado a un computador portátil, cuyos resultados se analizaron a través del programa LabView. Las galgas de deformación arrojan cambios de voltaje, los cuales se convierten en deformaciones unitarias y posteriormente en fuerzas de tensión. En la Figura 8, se muestra esquemáticamente la forma como se realizó la instrumentación y el tensionamiento.

En el proceso de tensionamiento, se realizaron incrementos de carga de dos toneladas, para evaluar su variación y estimar la carga en los puntos donde fueron instaladas las galgas de deformación (Figura 5), a lo largo de las dos vigas. De esta manera se calculó el delta de deformación unitaria de acuerdo a los saltos que se presentaban en las gráficas de deformación unitaria vs. tiempo, arrojadas por el programa Lab View para cada incremento de carga, en cada galga de deformación. Un ejemplo de este análisis se presenta en la Figura 9.

Para calcular la carga en los puntos donde se instalaron las galgas de deformación se usó la Ecuación 1.

$$\Delta P = A * E * \Delta \epsilon$$

Ecuación 1. Ley de elasticidad de Hooke

Donde A es el área del torón, E es el módulo de elasticidad y $\Delta \epsilon$ es el delta de deformación unitaria.

4.1 Estimación de los valores de coeficientes K

Para cada incremento de carga aplicada se conoce la carga que llega a cada uno de los puntos a lo largo del torón donde fueron instaladas las galgas de deformación. De esta manera se procedió a estimar los valores de los coeficientes de fricción, utilizando la Ecuación 2.

$$P_x = P_s e^{-(KL_x + \mu\alpha)}$$

Ecuación 2. Pérdidas por fricción

Donde:

P_s = fuerza de tensionamiento

P_x = Carga del cable a una distancia x de éste

K = Coeficiente de desviación

L_x = Longitud de una distancia x del cable

μ = Coeficiente de curvatura

α = Ángulo de diseño del cable

En los cables rectos sólo se hace presente el coeficiente K (coeficiente por desviación no intencional), debido a que el cable no presenta una curvatura respecto al eje vertical a lo largo de la viga; por lo tanto, se pudo discriminar el coeficiente μ de la ecuación anterior, tal y como se presenta en la Ecuación 3:

$$P_x = P_s e^{-(KL_x)}$$

Ecuación 3. Pérdidas por fricción para cables rectos

Por ser conocida la carga P_s , se determinó la carga P_x , donde se encuentran ubicadas cada una de las galgas de deformación (Figura 5). De esta manera se despejaron los valores de coeficiente K para cada uno de los incrementos de carga en cada una de las posiciones de instrumentación electrónica. Por obtener con este procedimiento datos estadísticos con amplia variación, se realizó un análisis probabilístico basado en tres casos:

Caso 1: Este consistió en el análisis probabilístico de todos los datos, con un ajuste estadístico empleando el método de Kolmogorov-Smirnov (K-S), obteniendo la curva que más se ajusta, que para este caso fue la distribución Log-normal (Figura 10).

Caso 2: Este consistió en el análisis probabilístico del intervalo donde se presenta mayor frecuencia de datos (Figura 11).

Vigas formaleteadas

Figura 6



Elaboración de cilindros de concreto

Figura 7



Esquema de la realización del tensionamiento y toma de datos

Figura 8

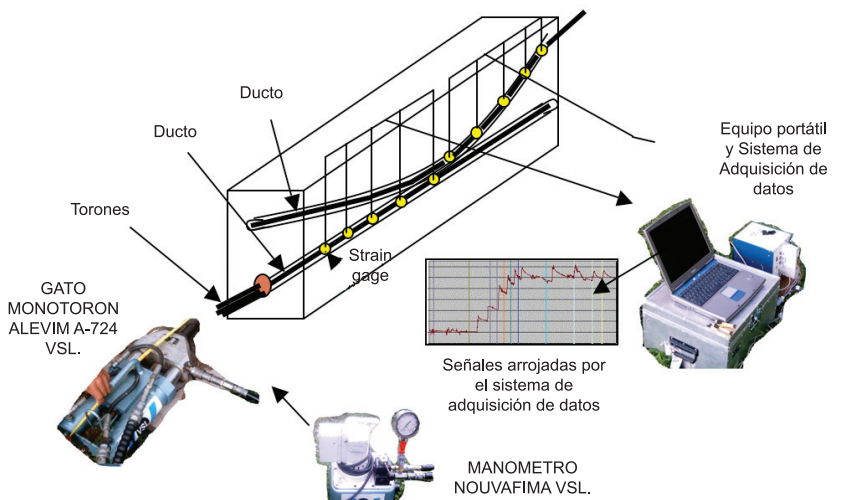


Figura 9 Análisis de las señales suministradas por el sistema de adquisición de datos

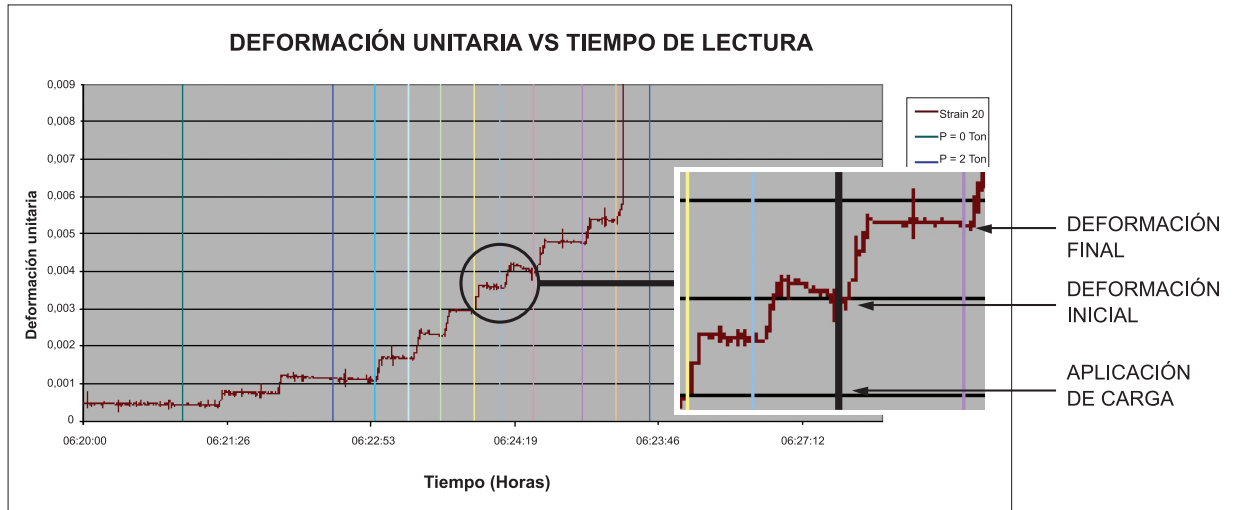
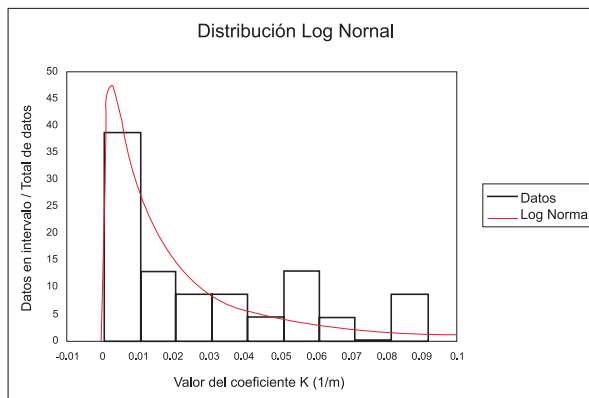


Figura 10 Análisis probabilístico de todos los datos

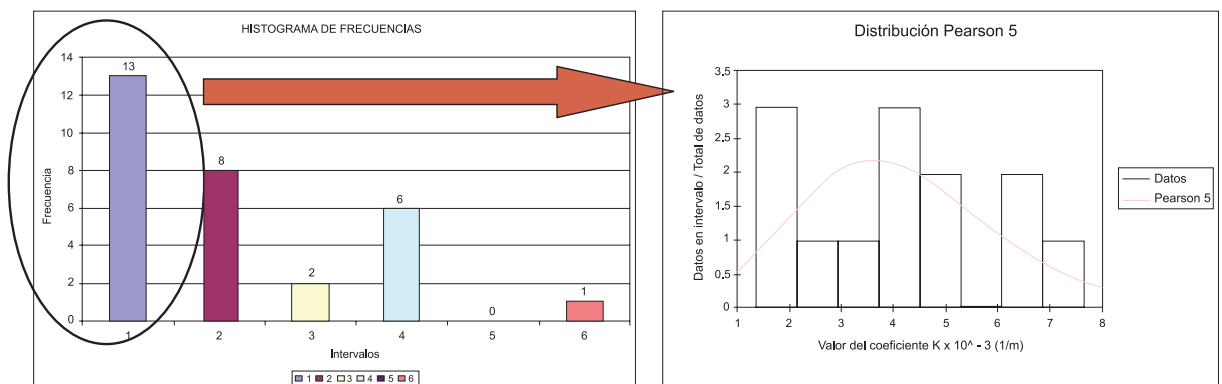


Caso 3: Este se basó en el análisis probabilístico de los datos obtenidos en cada galga de deformación y especialmente el que presentó un mejor comportamiento (Figura 12), lo cual estaba relacionado con las variables electrónicas y su instalación.

Basados en lo anterior se obtuvo lo presentado en la Tabla 1.

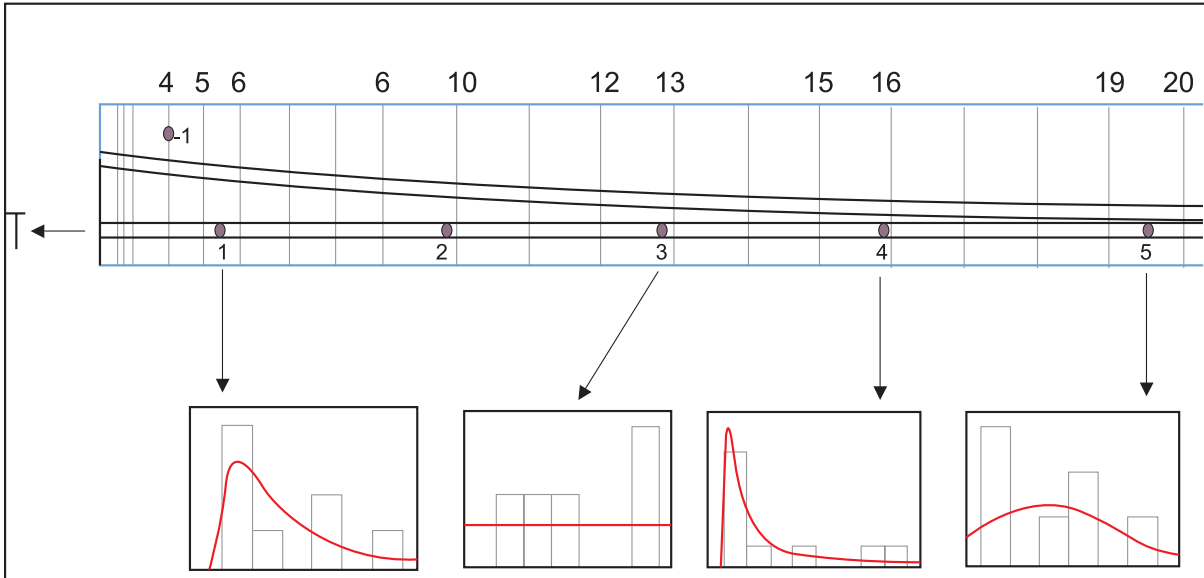
El rango de valores se definió a partir de la dispersión de resultados obtenidos del coeficiente de fricción por desviación no intencional en los casos 2 y 3 analizados, lo cual se decidió debido a que en estos casos se presentó mayor frecuencia de datos y mejor comportamiento.

Figura 11 Análisis probabilístico del intervalo de mayor frecuencia de datos



4.2 Estimación de los valores de coeficientes μ

Basados en los anteriores valores del coeficiente de fricción por curvatura no intencional (K), se procedió a



calcular el valor del coeficiente de curvatura (μ) para cada material, empleando la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\ln \frac{P_s}{P_x} - kLx}{\alpha}$$

Ecuación 4. Obtención del valor del coeficiente μ

Usando los diferentes valores límites de coeficientes k , se obtienen los valores de coeficientes μ luego de realizar análisis probabilístico, tanto para ductos plásticos como para ductos metálicos, como se muestra en la Tabla 2.

Por lo tanto el rango de valores para el coeficiente de fricción por curvatura para el ducto plástico y ducto metálico son respectivamente $\mu = 0.32-0.34$ y $\mu = 0.35-0.37$. Con los valores de los coeficientes de fricción (desviación K y curvatura μ) en ductos metálicos, se procedió a realizar los diagramas de tensionamiento tanto para los valores obtenidos en esta investigación como para los valores recomendados en los diferentes Códigos y Normas. Se asumió una carga inicial de 20 toneladas. Para el ducto metálico recto se tiene en la Figura 13.

Se procede a estimar la pérdida de carga a lo largo de la longitud de los cables.

Resultados obtenidos en diferentes casos y rango de resultados basados en los casos 2 y 3

Tabla 1

DUCTO PLÁSTICO RECTO

CASO	DUCTO PLÁSTICO
	K (1/m)
1	0.013
2	0.0041
3	0.0015

RANGO DE VALORES DE K

K: 0.0015 - 0.0041 (1/m)

DUCTO METÁLICO RECTO

CASO	METÁLICO
	K (1/m)
1	0.035
2	0.0069
3	0.0034

RANGO DE VALORES DE K

K: 0.0034 - 0.0069 (1/m)

Como se puede observar, al utilizar los valores de coeficientes de fricción hallados en esta investigación se presentan unas pérdidas de tensión debidas a la fricción del 7% del total de la fuerza aplicada en el anclaje móvil, el cual se encuentra dentro del promedio

de pérdidas obtenidas en los diferentes códigos de diseño. Para el ducto metálico curvo, se tienen en cuenta los dos coeficientes, obteniendo así:

El porcentaje de pérdida se incrementa a 11% debido a la influencia del valor del coeficiente μ hallado experimentalmente, el cual es mayor a los especificados en diferentes Códigos y Normas.

Tabla 2 Resultados obtenidos de los coeficientes de curvatura basados en los valores límites de los coeficientes por desviación no intencional

DUCTOS PLÁSTICOS	
K (1/m)	μ
0.0015	0.32
0.0041	0.34

DUCTOS METÁLICOS	
K (1/m)	μ
0.0034	0.35
0.0069	0.37

5. Conclusiones

a. Los coeficientes de fricción para ductos plásticos, determinados en este trabajo, son un aporte importante para la ingeniería nacional, porque no se encontraron especificaciones sobre estos valores en los códigos nacionales e internacionales consultados. Dicha investigación, se constituye en un aporte novedoso y muy importante, que puede ser tenido en cuenta en la actualización de este aspecto en la futura norma Colombiana. Actualmente se usa este material en diferentes obras de concreto preesforzado en el país y esta información puede ser utilizada por la ingeniería nacional para determinar con mayor confiabilidad las pérdidas de tensionamiento.

b. Los coeficientes (k) determinados en los ductos metálicos, son cercanos a los recomendados por los códigos consultados, lo que indica que las características de estos materiales son similares a los utilizados internacionalmente.

c. Los coeficientes por curvatura (μ) en ductos metálicos, determinados en este trabajo de grado, son mayores a los especificados por los diferentes códigos y normas, por lo que es indispensable corroborarlos con metodologías complementarias y nuevos ensayos experimentales.

d. Estos resultados se expresan a través de rangos y no mediante un dato específico, por la alta dispersión que se encontró en los datos experimentales que se obtuvieron de dichos coeficientes. Esto se debe a la cantidad de variables que los afecta y que se estimaron en forma aproximada en las labores experimentales y analíticas, tales como: magnitud de la tensión, longitud de los torones, sistema de instalación, etc.

e. Basados en los diagramas de tensionamiento realizado para cables curvos con ductos metálicos, se encontró que las pérdidas son

Figura 13 Comparación de diagramas de tensionamiento para diferentes valores de coeficientes (k) en ducto metálico recto

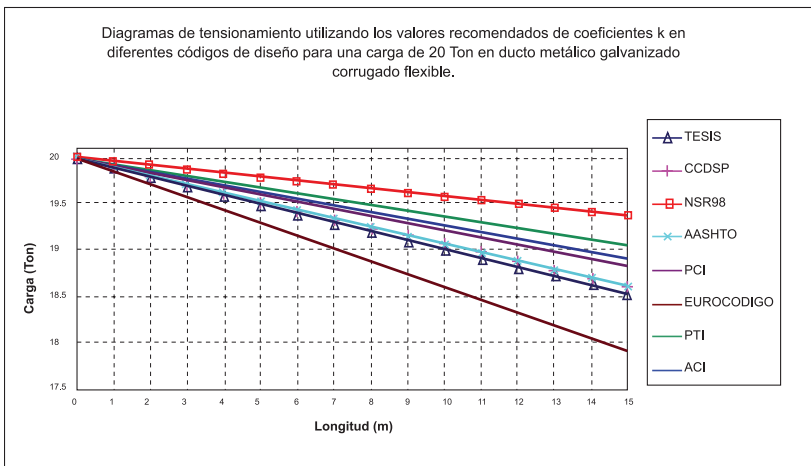


Tabla 3 Comparación de los porcentajes de pérdida para diferentes valores de coeficientes de fricción k en ductos metálicos rectos

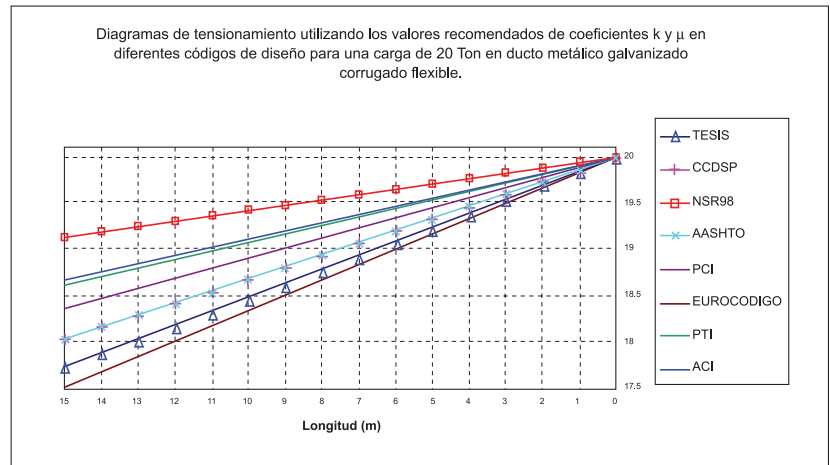
ITEM	TESIS	CCDSP	NSR 98	AASHTO	PCI	EUROCODIGO	PTI	ACI
K (1/m)	0.00515	0.0049	0.00215	0.0049	0.00409	0.0075	0.0033	0.0038
Ps en X=0m (Ton)	20	20	20	20	20	20	20	20
P en X=15m (Ton)	18.51	18.58	19.37	18.58	18.81	17.87	19.03	18.89
DIF CARGA	1.49	1.42	0.63	1.42	1.19	2.13	0.97	1.11
% PÉRDIDA	7%	%	%	%	%	%	%	%

mayores en un 1%, comparando con lo recomendado por el CCDSP y 7% mayores comparando con lo sugerido por la NSR-98. Para cables rectos, se obtienen pérdidas similares a las obtenidas utilizando el coeficiente recomendado por el CCDSP y mayores en un 4% a las obtenidas usando el valor recomendado por la NSR-98.

Agradecimientos

- Sistemas Especiales de Construcción Vsl Internacional, Ing. Alberto González, Ing. Ciro Martínez.
- CEMEX Colombia. Ing. Carlos Duque, David Molina.
- EMCOABLES. Ing. Jaime Soto.
- Departamento de Ingeniería electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Ing. Camilo Otálora.

Comparación de diagramas de tensionamiento para diferentes valores de coeficientes (k) y (μ) en ducto metálico curvo Figura 14



Referencias

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. Highway subcommittee on bridges and structure. Washington : AASHTO, 1996. 673 p.
2. American Concrete Institute Committee 318. Requisitos de reglamento para concreto estructural. Farmington Hills : ACI, 2005. 490 p. (ACI 318S-05)
3. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente. Bogotá : AIS, 1997. (NSR-98)
4. Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Concreto preesforzado : Diseño y construcción. Bogotá : ASOCONCRETO, 2005. 159 p.
5. Calle Calle, Gabriel Darío. Evaluación teórica-experimental de esfuerzos y coeficientes de fricción en vigas preesforzadas. Bogotá, 1999, 112 p. Tesis (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.
6. Colombia. Ministerio De Transporte. Instituto Nacional De Vías. Código colombiano de diseño sísmico de puentes. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1995. 600 p. (CCDSP)
7. DUEÑAS PUENTES, Diego Ernesto y MOLINA HERRERA, Maritzabel. Coeficiente de fricción por curvatura no intencional en concreto postensado. En : Revista de ingeniería e investigación. Vol. 27, No. 3 (sep. 2007); p. 16-23.
8. HENDY, C. R. y SMITH, D. A. Eurocode 2: Design of concrete structures. s.l. : Haig Gulvanessian, 2007. 415 p.

9. ICAZA AGUIRRE, Juan José. Factors affecting friction losses in multi-strand post-tensioning tendons including the effect of emulsifiable oils. Austin : 2004, 92 p. Tesis (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de Texas.
10. PALISADE CORPORATION. Probability distribution fitting for microsoft windows. [programa de computador]: Versión 4.5.2. 2002.
11. PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. Design hand book. 5 ed. Chicago : PCI, 1999.
12. POST-TENSIONING INSTITUTE. Post-tensioning manual. Phoenix : PTI, 1990. 406 p.
13. ROBAYO, Javier Orlando. Determinación experimental de los coeficientes de fricción "k" y curvatura "mu" en los tendones de preesfuerzo. Bogotá : 1997, Tesis (Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. 58 p.