

Calculation of posttensioning loss on table beams of central piers of General Rafael Urdaneta Bridge"

Antonio Sarcos Portillo e Hildrun F. García Legl

Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia. Apartado 1247, Maracaibo, Venezuela
e-mail: asarcos@europa.ica.luz.ve

Abstract

A theoretical methodology is proposed to attempt an assessment of tension loss in the posttensioned cables of the central pier table beams of General Rafael Urdaneta Bridge on Maracaibo Lake. This methodology is based on experimental tests run *in situ*. The importance of this methodology lies in the fact that the stays are joined to the table beam by concrete, making experimental measurement of tension impossible. The results indicate a possible 16% loss of their original tension. This procedure enables future evaluation of cable conditions.

Key words: Piers, wires, pier table beam, posttensioned wires.

Cálculo de la pérdida del postensado de la viga mesa de las pilas centrales del Puente "General Rafael Urdaneta"

Resumen

En el presente trabajo se propone una metodología teórica para intentar evaluar la pérdida de tensión en los cables postensados pertenecientes a las vigas mesas de las pilas centrales del Puente sobre el Lago de Maracaibo, basada en pruebas experimentales realizadas en sitio y en la propuesta de un modelo estructural de las pilas. Esto es importante puesto que actualmente los cables están unidos por medio de una lechada de concreto a la viga mesa lo que imposibilita la medición experimental de su tensión. Los resultados de este trabajo indican una posible pérdida de tensión en los cables hasta el 16,50% de su valor inicial. Con este procedimiento se puede evaluar las condiciones de los cables en el futuro.

Palabras clave: Pilas, guayas, viga mesa, cables postensados.

Introducción

Las vigas mesas pertenecientes a las pilas centrales del puente "General Rafael Urdaneta" fueron diseñadas para permitir la libre navegación de todo tipo de barcos, inclusive, los de gran tamaño. Por eso se construyeron con longitudes libres hasta de 200 metros y 45 metros de altura. Estas condiciones obligaron a postensar las vigas mesas con la finalidad de absorber las fuerzas

cortantes a nivel de los fustes "X" y mantener la horizontalidad a lo largo de los tramos.

Para que las vigas mesas se mantuvieran horizontales en los tramos centrales, fue necesario colocar en los cuatro nervios de su sección transversal, un total de 396 guayas de postensado cada una de las cuales está dividida en seis cables. Durante el tensado de éstos últimos se colocaron manómetros con los cuales fue posible medir la tensión aplicada en cada uno de los 2376 cables.

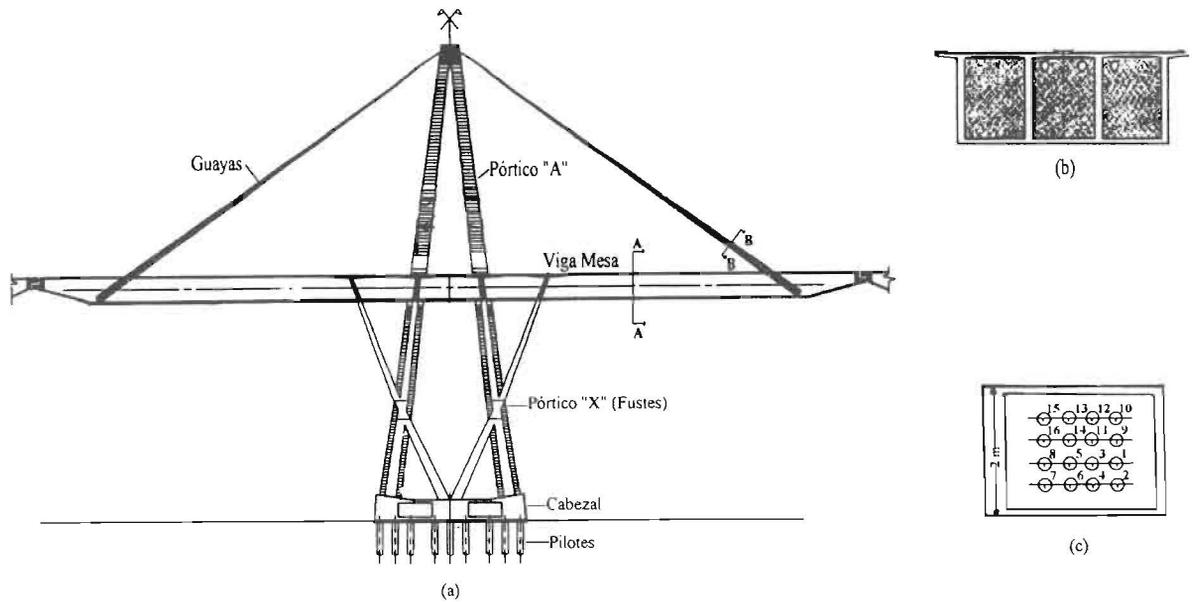


Figura 1 (a) Partes de la pila central, (b) Viga Mesa (corte A-A), (c) Guayas (corte B-B).

Al terminar el proceso de postensado, se introdujo una lechada de concreto para sellar los ductos en los nervios de las vigas mesas, esto en la actualidad dificulta notablemente la verificación de las tensiones reales de los cables.

Este trabajo tiene como finalidad, calcular en forma indirecta la pérdida del postensado de los cables pertenecientes a la viga mesa de los tramos centrales del Puente "General Rafael Urdaneta", basándose en estudios anteriores y en mediciones experimentales de la tensión de las guayas en los años 1962 [1] y 1989[2].

Parte Experimental

La parte experimental de este trabajo se fundamentó en pruebas realizadas por el M.O.P. y el CONSORCIO PUENTE MARACAIBO en 1962 [3], [4] y las practicadas por T.Y. Lin International en 1989 [2].

Medición de las tensiones de los cables de postensado de la viga mesa

Para mantener la horizontalidad de las vigas mesas de las pilas, fue necesario colocar en los cuatro nervios de su sección transversal (ver Figura 1b) un total de 396 guayas, cada una de las cuales se dividió en seis cables. Durante el tensado de estos cables se colocaron manómetros en los

gatos hidráulicos que permitieron elaborar un registro diario de las tensiones de cada uno de ellos [3], obteniéndose un total de 2.376 tensiones medidas, cuyo valor promedio resultó de 185.61 toneladas por cable [3]. La Figura 2 muestra un detalle de la distribución de las guayas en el postensado de la viga mesa en la zona de los fustes de una pila central. Los conductos por donde se colocaron y tensaron los cables de postensado fueron llenados por una lechada de concreto para proteger los cables de la intemperie y para permitir una mejor adherencia entre los cables y el concreto, sin embargo, esto en la actualidad no permite verificar experimentalmente la tensión de los mismos [5].

Medición de la tensión de las guayas

La carga de las guayas, al momento de la construcción del Puente "General Rafael Urdaneta" (ver Figura 1c), se midieron en base de las presiones producidas en los gatos hidráulicos que se utilizaron en el proceso de tensión. En estos gatos hidráulicos, el error era del 3 al 7%, o sea, en el caso presente, de 5 a 12 toneladas por cable [1]. La verificación de las tensiones se hizo por medio de mediciones de oscilación.

Al momento de la construcción de la estructura se fijó una cuerda de cáñamo en la parte inferior del cable [4], haciéndolo oscilar a mano y midiéndose el tiempo en que este realizó 100 oscilaciones, la exactitud de la medición fue del 2 al

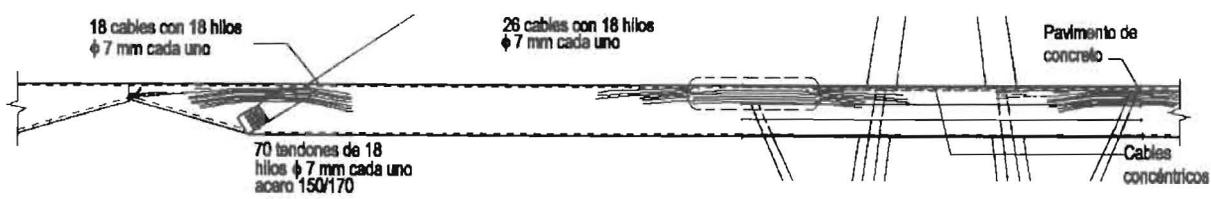


Figura 2. Cables postensados en la viga mesa.

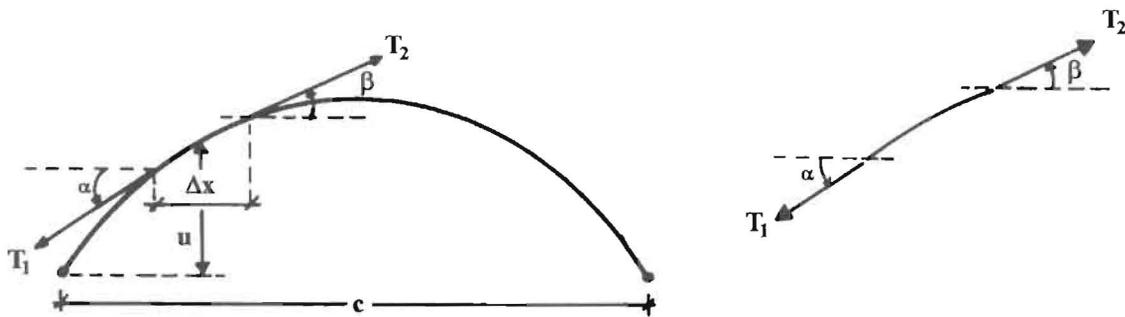


Figura 3. Equilibrio en cuerda vibrante.

3% y correspondía a una fuerza de 3 a 5 toneladas [1]. La formulación matemática para el cálculo de la tensión de la guaya en campo por análisis de vibraciones, se basa en lo siguiente:

Al realizar el equilibrio dinámico de una cuerda vibrante en un tiempo t de vibración (ver Figura 3) se obtiene:

$$\sum F_x = 0 \quad T_1 \cos \alpha = T_2 \cos \beta = T \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad T_2 \sin \beta - T_1 \sin \alpha = \text{Masa} \cdot \text{aceleración} \quad (2)$$

donde T es la tensión de la guaya, $\text{Masa} = \rho \Delta x$ y la aceleración $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ siendo $\frac{\rho}{gl}$ la masa por unidad de longitud de la guaya, u el desplazamiento, t el tiempo.

Al dividir la ecuación (2) por T y hacer tender Δx a cero se obtiene

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3)$$

donde $a^2 = \frac{T}{\rho}$, resolviendo la ecuación (3) para el caso de la Figura 3, mediante el método de separación de variables, resulta:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(\frac{2}{c} \int_0^c f(x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{c}\right) dx \right) \cdot \sin\frac{n\pi x}{c} \cdot \cos\frac{n\pi at}{c} \right) \quad (4)$$

En la ecuación anterior el primer término de la sumatoria representa la participación de cada uno de los modos a la vibración de la cuerda, el segundo término representa (al variar n) las diferentes formas modales de la cuerda y el tercer término representa el factor de participación de cada modo en función del tiempo. De esta ecuación se deduce que, la frecuencia circular de la vibración se puede calcular, de acuerdo al tercer término de la ecuación (4) como:

$$\omega = \frac{n\pi}{c} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

De donde, sabiendo que $\omega = 2\pi \cdot f$, donde f es la frecuencia en Hertz de la cuerda, y tomando $n=1$ para el primer modo, se obtiene la tensión de la guaya como:

$$T = 4 \cdot f^2 \cdot c^2 \cdot \omega / (g \cos \theta) \quad (5)$$

De esta fórmula, únicamente f es desconocida, ésta se calculó en 1962 [4], [1] colocando una cuerda de cáñamo en la parte inferior del cable, haciendo oscilar a mano y midiendo el tiempo en que se obtienen 100 oscilaciones, mientras que en

1989 [2] se colocó en el cable un acelerómetro conectado a su vez a un analizador de señales dinámicas y se aplicó vibración para registrar las oscilaciones. Con estos registros se calcularon los espectros de Fourier (FFT) correspondientes a cada cable, para obtener la frecuencia predominante de vibración en cada uno de ellos. Uno de estos registros se muestra a manera de ejemplo en la Figura 4. Las tensiones promedio resultantes, correspondientes a los dos métodos se muestran en la Tabla 1.

Procedimiento Analítico

Una vez obtenidos los modelos que reproducen el comportamiento de la pila de acuerdo a análisis experimentales y teóricos [6], [7], al encontrar la tensión de las guayas en el año 1989 ligeramente superior a la obtenida en el año 1962 (26.08 toneladas para los 16 cables que conforman

la tensión total), se atribuyó este comportamiento a la pérdida de tensión de los cables postensados de la viga mesa. Con el modelo obtenido para las pilas centrales para el año 1989 [6], se realizó un análisis iterativo variando las tensiones de las 396 guayas (2376 cables) postensados de la viga mesa hasta conseguir ajustar la tensión en las guayas a un valor muy próximo al conseguido por T.Y. LIN en 1989 [2]

Este cálculo se realizó utilizando los datos de resistencia del concreto y guayas [6], mostrados en la Figura 5.

Tabla 1
Valores medidos de las guayas

| Organismo | Tensión promedio en las guayas |
|--------------|--------------------------------|
| M.O.P. 1962 | 170 Ton |
| T.Y.LIN 1989 | 171.63 Ton |

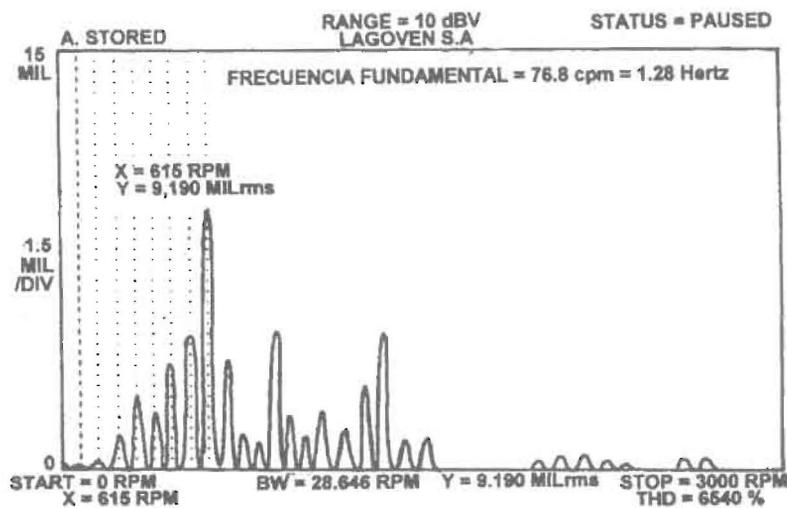


Figura 4. Espectro de Fourier realizado a una de las guayas de las pilas centrales.

| Parte de la Pila | Módulo de elasticidad (kg/cm ²) |
|--------------------------------|---|
| Pilotes | 320312 |
| Cabezal | 237171 |
| Pórtico A | 292247 |
| Fuste "X" | 231171 |
| Viga mesa | 291247 |
| Guayas | $1.7 \cdot 10^7$ ton/m ² |
| Tirantes postensados viga mesa | $1.7 \cdot 10^7$ ton/m ² |

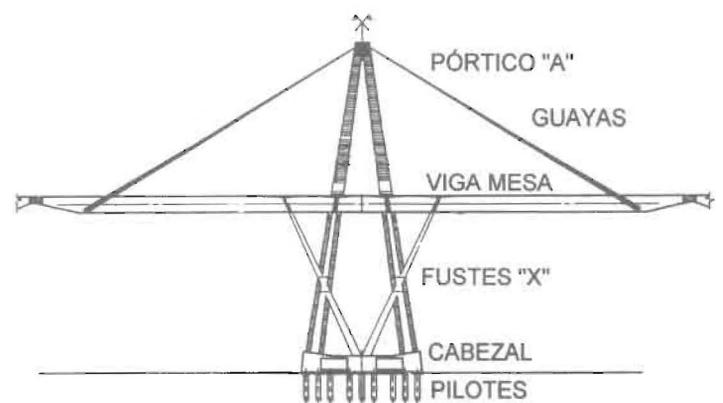


Figura 5. Módulos E del concreto y guayas de las pilas centrales.

Los pasos para la realización del proceso analítico fueron los siguientes:

1. Se seleccionó el modelo de la pila, considerando las propiedades de los materiales de la Figura 5 y las tensiones iniciales de los cables postensados de la viga mesa [6]
2. Se calculó la tensión de las guayas y se comparó con la medida en 1989 [2]
3. Se supuso las propiedades de los materiales constantes [6] para el modelo propuesto y se varió en forma iterativa la tensión de los cables postensados de viga mesa hasta hacer coincidir la tensión de la guaya teórica y medida en campo.

El cálculo teórico de la tensión de la guaya se realizó de acuerdo a lo estipulado en la referencia [6].

Un estudio teórico-analítico puede ser realizado si se acepta que las pérdidas por fricción [8] de la carga de postensado de las guayas se puede expresar mediante la ecuación:

$$\Delta P = P_s \left(1 - e^{-(Kl + \mu\alpha)} \right) \quad (6)$$

donde ΔP representa la carga de postensado perdida por las guayas, P_s es la carga inicial de postensado de las guayas, K es el coeficiente de deformación de longitud del ducto por pie lineal, l representa la longitud de la guaya, μ es el coeficiente de curvatura y α el ángulo de curvatura de los cables.

Se estimaron para K y μ valores de 0.0002 y 0.25, respectivamente, según se recomienda en los comentarios de las normas para puentes AASHTO, [9]. Para los tramos cercanos a los volados se calculó una longitud promedio de los cables de 21.80 metros y un ángulo de curvatura promedio de 0.19 radianes, mientras que para los tramos centrales se calculó una longitud promedio igual a 26.96 metros y un ángulo de curvatura de 0.20 radianes.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación (6) se obtiene:

Tramos cercanos al volado:

$$\Delta P = P_s \left(1 - e^{-(0.0143 + 0.0475)} \right) = P_s * (0.06) \quad (7)$$

Tramos centrales:

$$\Delta P = P_s \left(1 - e^{-(0.0177 + 0.05)} \right) = P_s * (0.07) \quad (8)$$

Además de las pérdidas por fricción, existen pérdidas por flujo plástico, contracción y relajamiento, que se pueden calcular para este problema en particular, en forma aproximada, en un 10% de la carga inicial [8]. También existen pérdidas por acortamiento elástico y deslizamientos de los anclajes de las guayas que pueden estimarse como un 3% de P_s [8], en total se obtiene una pérdida de tensión en las guayas que asciende a un 20% de la carga inicial, aproximadamente. Este resultado es bastante cercano a la pérdida hallada en este trabajo.

Otros autores más conservadores [10] opinan que las pérdidas para un concreto normal por flujo plástico, contracción y relajamiento del concreto pueden ascender a un 18% de la carga inicial, P_s . Según este criterio, las pérdidas del postensado de la viga mesa ascendería a un 28% de la carga inicial, aproximadamente.

Bajo estos criterios, los resultados indican que las pérdidas de tensión en las guayas es inferior a la que se podría estimar a través de estudios teóricos en la actualidad, sin embargo, es necesario verificar el valor para el porcentaje de pérdidas asumido en el cálculo y diseño inicial de las pilas estudiadas.

Resultados

Los resultados de este trabajo muestran que la tensión de los cables postensados y viga mesa tienen una pérdida de tensión de 16,5%, lo anterior se deduce porque la tensión promedio al momento de la construcción de la pila fue de aproximadamente 185,61 toneladas [3], y actualmente se registra una tensión promedio de 154,98 toneladas. Este resultado puede deberse al relajamiento por fluencia plástica del acero de los cables, pero el retensado de los mismos es difícil de realizar ya que se encuentran embebidos en mortero de cemento. Se debe considerar la posibilidad de la colocación de cables postensados externos en cada uno de los nervios de la viga mesa.

Discusión de Resultados

Al concluir este trabajo, se nota un porcentaje de pérdida de tensión en los cables postensados de la viga mesa normal, es necesario verificar si esta pérdida de tensión en los cables pueda originar flechas intermedias altas en los tramos de

la viga mesa y sobre todo en el volado, sin embargo para el caso en estudio la pérdida de tensión en los cables del postensado, origina que las guayas tomen más carga que la que le corresponde, pero esta es pequeña en comparación a la carga total actuante en ellas.

Conclusiones

Los resultados demuestran que se cuenta con un modelo estructural con el cual es factible verificar, en forma indirecta, las tensiones de los cables postensados de la viga mesa a medida que transcurre el tiempo, con esto se propone una metodología de prevención y mantenimiento de algunos elementos pertenecientes a las pilas centrales.

Se obtiene una pérdida de tensión en los cables de 16,50%, en aproximadamente 35 años de vida útil del Puente, con ella se reduce el factor de seguridad del cortante de viga mesa a nivel de los fustes, ya que estos cables tienen también como objetivo tomar el cortante en el extremo del tramo.

La pérdida de tensión en los cables ocasiona que las guayas absorban tensión adicional.

Referencias Bibliográficas

1. Bauverlag GmbH, "El Puente sobre el Lago de Maracaibo", Berlín, 1970.
2. T.Y. Lin Internacional: "Final Report on the Structural Investigation of the Lake Maracaibo Bridge", San Francisco, California, U.S.A, Marzo, 1990.
3. Consorcio Puente Maracaibo: "Actas de las pruebas de carga realizadas en la calzada del Puente sobre el Lago de Maracaibo", Archivo del M.T.C., Maracaibo, Venezuela, 1962.
4. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS: "El Puente sobre el Lago de Maracaibo General Rafael Urdaneta".
5. Sarcos Portillo, Antonio, "Análisis Estructural de una Pila Central del Puente General Rafael Urdaneta, a través del computador". Trabajo de ascenso para obtener la categoría de Profesor Agregado de L.U.Z. Universidad del Zulia, Venezuela. Mayo. 1990.
6. Sarcos, Antonio, García, Hildrun: "Theoretical and experimental analysis of the central piles of the General Rafael Urdaneta Bridge". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 20, No. 3, 205-214. Diciembre, 1996.
7. Oladis T. de Rincón, Miguel Sánchez, Daniel Contreras, Rafael Fernández, Waldo Zambano, César Vezga, Antonio Sarcos Portillo, Heinz Hennerberg y Antonio González: "Contribución Técnico-Científica de la Facultad de Ingeniería al Puente sobre el Lago de Maracaibo". Rev. Técnica Ing. Univ. Zulia, Vol 14, 63. 1991.
8. Arthur H. Nilson: "Diseño de estructuras de concreto presforzado", Editorial Limusa, México, 1990
9. The American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc. "Standard Specifications for Highway Bridges", Washington D.C, 1989
10. Branson, Dan: "Diseño de Vigas de Concreto Presforzado", Noriega Editores, México, 1990.

Recibido el 17 de Junio de 1996

En forma revisada el 25 de Noviembre de 1996