



Received: 03-04-2016  
Accepted: 14-04-2016

## Monitorización de cubiertas atirantadas Monitoring covered straining

Jaime Santamarta

División de Ingeniería Estructural, Acciona Ingeniería S.A. (jaime.santamarta.martinez@acciona.com)

**Resumen**— La implementación de un adecuado sistema de control de la tensión de los tirantes en cubiertas atirantadas se antoja esencial para preservar el correcto funcionamiento de los mismos a lo largo del tiempo. Tomando como ejemplo la cubierta del parque de carbones de la Central Térmica de As Pontes, se analizan cuatro casos de estudio: Modelo teórico, modelo indirecto de cuerda vibrante, modelo de pesaje con gato y modelo con sistema permanente de monitorización. Con el objeto de dar validez al sistema de monitorización instalado se efectúa un contraste de resultados a partir del análisis de los cuatro modelos. De este análisis se puede concluir que no sólo se trata del sistema más aproximado a los resultados esperables del modelo teórico, sino que sus ventajas funcionales llevan a recomendar su aplicación de manera generalizada. El sistema instalado, se fundamenta en la colocación de unas células de carga de galgas extensiométricas y en la implementación de un sistema de adquisición de datos inalámbrico. Se lleva a cabo una innovadora mejora tecnológica consistente en la colocación de unos transmisores de comunicación remota y en el desarrollo de una aplicación Android que permita el acceso directo a las lecturas y a la configuración del sistema.

**Palabras clave**— Tirantes; cubierta; monitorización; transmisores.

**Abstract**- The implementation of an adequate system of stress control of the suspenders in covered straining is essential to preserve the correct functioning of the same over time. Taking as an example the cover of the coal park of As Pontes Thermal Power Station, four case studies are analyzed: Theoretical model, indirect model of vibrating string, weighing model with cat and model with permanent monitoring system. In order to validate the installed monitoring system, a results comparison is made based on the analysis of the four models. From this analysis we can conclude that not only is the system more approximate to the expected results of the theoretical model, but its functional advantages lead to recommend its application in a generalized way. The installed system is based on the placement of load cells of strain gauges and the implementation of a wireless data acquisition system. An innovative technological improvement is carried out consisting in the placement of a transmitters of remote communication and in the development of an Android application that allows the direct access to the readings and the configuration of the system.

**Index Terms**— Suspenders; cover; Monitoring; Transmitters.

### I. INTRODUCCIÓN

El empleo de cubiertas atirantadas en el ámbito de la Edificación va más allá de lo que podría calificarse como

construcción convencional. Su singularidad hace que su aplicación se encuentre dentro de un marco a camino entre la ingeniería civil, la ingeniería industrial y la propia ingeniería de edificación. Utilizadas en aquellos casos en los que se pretende salvar grandes luces sin apoyos intermedios, destaca por ejemplo su uso en las cubiertas de los estadios deportivos, grandes marquesinas, hangares o naves industriales (Leonhardt,

J. Santamarta está en la División de Ingeniería Estructural de la empresa Acciona Ingeniería S.A..

1977).

Se toma como caso modelo la cubierta del parque de carbones de la Central Térmica de As Pontes, situada en la localidad de Puentes de García Rodríguez y perteneciente a la empresa eléctrica Endesa.

La solución adoptada para dicha estructura consiste en una sucesión de arcos poligonales metálicos de sección circular pretensados, de los cuales se suspende la cubierta y donde se lleva a cabo un cerramiento a dos niveles para permitir la correcta ventilación en la instalación. Dicha cubierta tiene una superficie total de 96.000 m<sup>2</sup> y está formada por 16 arcos de 160 m de luz (figura 1).



Fig. 1. Vista general de la cubierta (fuente: Acciona Ingeniería S.A.).

Combinando la estructura metálica convencional y la técnica del pretensado, la cubierta se caracteriza por su ligereza, flexibilidad y estabilidad. A modo de analogía, para tener un orden de magnitud de las dimensiones de la superficie cubierta, bajo ella se podrían albergar hasta 12 campos de fútbol.

Actualmente, los trabajos que desarrolla Acciona Ingeniería en esta cubierta se engloban dentro del plan de mantenimiento establecido por Endesa para el período 2010-2020. Estos consisten en una serie de actuaciones predictivas, preventivas y correctivas sobre los tirantes, que a la postre permitirán prolongar la vida útil de las instalaciones de la central térmica.

En este sentido, la implementación de un adecuado sistema

de control de la tensión de los tirantes en este tipo de cubiertas, se antoja esencial para preservar el correcto funcionamiento de los mismos a lo largo del tiempo.

## II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La instalación del sistema permanente de monitorización dispuesto en la cubierta de As Pontes en colaboración con Worldsensing S.L., se fundamenta por un lado, en la colocación de unas células de carga de galgas extensiométricas situadas en los anclajes activos de los tirantes, y por otro lado, en la implementación de un sistema de adquisición de datos inalámbrico de bajo consumo.

Para alcanzar tal fin, se ha llevado a cabo una innovadora mejora tecnológica consistente en la instalación de unos transmisores de comunicación remota, llamados también dataloggers, y en el desarrollo de una aplicación Android que permita el acceso directo a las lecturas y a la configuración del Sistema (figura 2).

Estos transmisores de nueva generación son planamente autónomos y tienen un consumo muy bajo, por lo que tomando y transmitiendo una lectura cada 6 horas, la vida de la batería es de más de 20 años. Se minimiza así al máximo la necesidad de mantenimiento.

Su alcance de más de 4 km permite tener la estación base en las oficinas de control donde, bien por conexión local directa a la misma o a través de dirección IP de internet, se pueden descargar los datos transmitidos y analizar su evolución en el tiempo. La estación base puede ir provista de tarjeta sim para que en caso de no existir puerto de internet al que conectarla, tenga pleno funcionamiento a través 3G.

Mediante el desarrollo de la aplicación Android para móvil, se puede configurar el datalogger y tomar lecturas de la célula de carga por conexión directa a la misma. Esto supone un gran avance dado que facilita enormemente el acceso a los datos y a la manipulación de su configuración, especialmente en aquellos casos en los que se quiera modificar los tiempos de lectura o cuando se deseen tomar datos in-situ y no se tenga cerca la estación base para recibir esos datos.

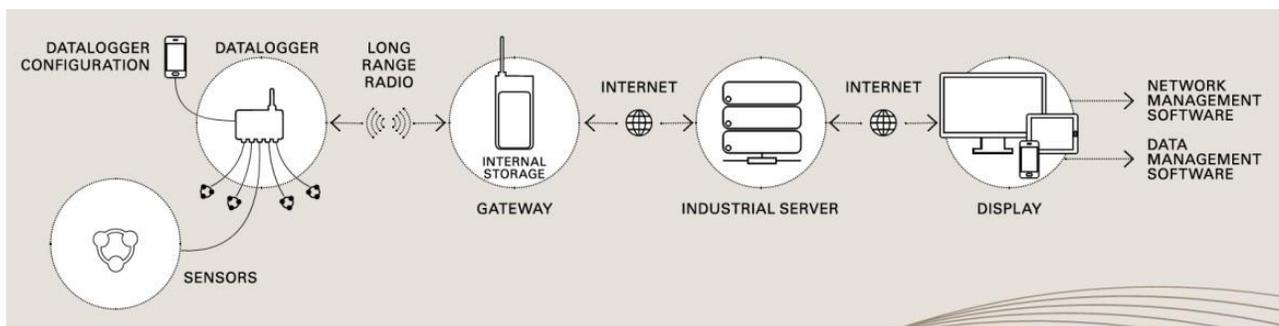


Fig. 2. Red de comunicaciones del sistema de monitorización (fuente: Worldsensing S.L.).

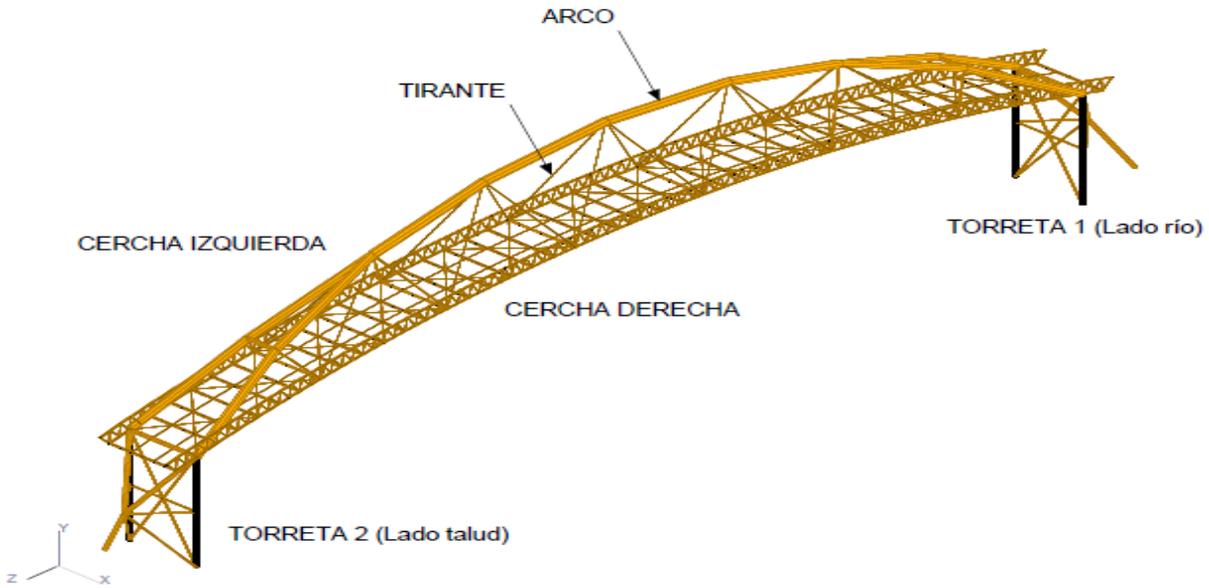


Fig. 3. Modelo estructural del arco (Iberinsa, 2010).

Valga como ejemplo el caso en el que se procede al tesado o al pesaje del tirante. Haciendo coincidir los tiempos de lectura con los escalones de carga a aplicar en los gatos, se puede llevar a cabo un contraste de lecturas. O también por ejemplo casos en los que se desee temporalmente analizar la respuesta tensional de los tirantes a los ciclos de temperatura día-noche.

### III. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Con una periodicidad de 6 años, dentro del programa del plan de mantenimiento de la cubierta de As Pontes, se inspeccionan los 16 tirantes de 8 de los arcos, de modo que se pueda conocer la carga de trabajo y el porcentaje de carga de rotura de los mismos.

Con el objeto de dar validez al sistema de monitorización instalado, se efectúa un contraste de resultados a partir del análisis de los cuatro modelos de estudio que se describen a

continuación.

#### A. Modelo teórico estructural

La modelización del arco objeto de análisis se efectúa mediante la implementación de un sistema tridimensional de nudos y barras procesado con el software de cálculo matricial de estructuras GtStrudl (figura 3).

En particular, la estructura del arco se caracteriza por estar formada por los siguientes elementos principales:

- Dos cerchas que hacen las veces de cordón inferior de la estructura, unidas entre sí mediante perfiles transversales y arriostramientos en diagonal para formar un entramado horizontal que alberga las dos aceras longitudinales, los contrapesos y los cerramientos. En cada una de estas dos cerchas, se apoya lateralmente la estructura metálica de cubierta del nivel inferior, la cual consiste en paneles de chapa grecada. Los dos cordones, inferior y superior de cada cercha,

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS DE LOS TIRANTES (IBERINSA, 1980)

Péndola	Tipo	L (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	Composición
201	I	8.592	410	705	8 torones Ø 0,5". Tubo exterior Ø 219 <sup>6</sup> -8 <sup>18</sup>
203	II	22.320	710	1.255	3 torones Ø 0,5". Vaina polietileno Ø53x2,8
205	I	15.397	460	730	8 torones Ø 0,5". Tubo exterior Ø 219 <sup>6</sup> -8 <sup>18</sup>
207	III	22.555	660	920	8 torones Ø 0,5". Vaina polietileno Ø53x2,8
209	III	19.869	460	715	8 torones Ø 0,5". Vaina polietileno Ø53x2,8
211	III	22.425	660	740	8 torones Ø 0,5". Vaina polietileno Ø53x2,8

se encuentran pretensados por unos cables dispuestos en el interior de cada perfil tubular, definido éste mediante dos “U” metálicas e inyectadas con mortero.

- Cordón de compresión del arco de tubo metálico compuesto por un tramo central circular y en sus extremos abierto con dos patas en forma de “Y” invertida para conectar con los puntos de apoyo.

- Tirantes pretensados rellenos con lechada de hormigón.
- Torreta de estructura metálica que recibe el apoyo del arco y cimentada con zapatas y anclajes al terreno.

En el modelo teórico se introducen las acciones que solicitan la estructura (pesos propios, cargas muertas y acciones de pretensado), y de cuyos resultados se podrán extraer los valores de la carga en los tirantes (tabla I).

#### B. Modelo de ensayo indirecto de cuerda vibrante

El procedimiento de ensayo consiste en obtener mediante ensayo indirecto de cuerda vibrante la frecuencia fundamental de vibración del tirante, para así conocer la carga de trabajo y el porcentaje de carga de rotura.



Fig. 4. Sensor instalado en un tirante (fuente: Acciona Ingeniería S.A.).

A partir de los registros de frecuencias recogidas por los sensores instalados en los tirantes (figura 4), se aplica la Teoría de la Cuerda Vibrante, despreciando la rigidez a flexión propia de los cables y utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT):

$$N = 4 \cdot m \cdot L^2 \cdot f^2 \quad (1)$$

donde

N = carga axil [N]

m = masa de la péndola por unidad de longitud [kg]

L = longitud efectiva de la péndola [m]

f = frecuencia fundamental de vibración de la péndola [Hz]

Para el cálculo de la anterior expresión se tiene en cuenta que para la obtención de la longitud efectiva o libre del tirante, se tiene que descontar a la longitud total, las correspondientes

a las zonas de anclajes activos y pasivos. Así mismo, en la masa por metro lineal se totaliza la correspondiente a cables, vainas y mortero de relleno.



Fig. 5. Anclaje activo del tirante (fuente: Acciona Ingeniería S.A.).

#### C. Modelo de ensayo mediante pesaje con gato

Para realizar el pesaje del tirante, se coloca sobre la cabeza roscada del anclaje activo un gato hidráulico y se aplican cinco escalones de carga hasta alcanzar la carga de diseño del tirante (figura 5). Con este procedimiento, se toman lecturas de la carga en el gato, del alargamiento del cilindro y de la penetración de cuñas.



Fig. 6. Transmisor (fuente: Acciona Ingeniería S.A.).

#### D. Modelo de toma de lecturas en el sistema de monitorización

La toma de lecturas con este sistema es automática quedando los valores accesibles a través de internet. Para ello, los transmisores (figura 6) envían las lecturas tomadas en unidades de mV/V, de modo que puedan ser recibidas en la estación base y posteriormente transformadas a unidades de fuerza dentro del software de gestión de datos propio que lleva instalado:

TABLA I  
RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ESTUDIO

Modelo	Axil (kN)	Error (%)
1. Modelo teórico estructural	356.79	±0.00
2. Modelo de ensayo indirecto de cuerda vibrante	371.99	+4.26
3. Modelo de ensayo mediante pesaje con gato	345.00	-3.30
4. Modelo de toma de lecturas en el sistema de monitorización	352.24	-1.28

$$N = (R_i - R_0) \cdot C/S \quad (2)$$

donde

N = carga axil [N]

$R_i - R_0$  = diferencias de lecturas [ $\Delta mV/V$ ]

C = capacidad de la célula de carga [N]

S = factor de sensibilidad [ $mV/V$ ]

Para el objeto del estudio, se estima suficiente referir los resultados exclusivamente al tirante catalogado como péndola 207. De este modo, en cada uno de los cuatro modelos se obtienen las cargas axiles que se muestran seguidamente en la tabla 2.

#### IV. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden extraer unas conclusiones claras y unívocas.

Las desviaciones de lecturas en cada modelo de estudio son en todos los casos inferiores al 5% respecto del modelo teórico. Por una parte, esto no hace más que confirmar empíricamente la gran aproximación del modelo estructural a la realidad, y por otra parte, que cualquiera de los métodos de ensayo propuestos pueden considerarse válidos para el análisis del estado de carga de un tirante.

Sin embargo, a la vista de los valores porcentuales del error obtenido en cada caso, se puede confirmar que el sistema de monitorización implementado es sin duda el más aproximado a los resultados esperables del modelo teórico.

Teniendo en consideración además las ventajas funcionales que supone el mismo: fácil instalación y mantenimiento de instrumentos, prolongada vida útil, pequeña movilización de equipos, cómoda toma de lecturas, reducción de costes de inspección, versatilidad en la configuración; se confirma el potencial y la efectividad de su aplicación de manera generalizada en el control y mantenimiento de cubiertas atirantadas.

#### AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a la empresa Worldsensing S.L. que colabora con Acciona Ingeniería S.A. como desarrollador y suministrador del sistema de monitorización.

#### REFERENCIAS

- IBERINSA Ibérica de Estudios e Ingeniería S.A. (2010). Informe de Comprobación de las Péndolas de la Cubierta. Plan de Mantenimiento del Parque de Homogeneización de Carbones de la Central Térmica de As Pontes (Endesa).
- IBERINSA Ibérica de Estudios e Ingeniería S.A. (1980). Proyecto de Ejecución de la Cubierta del Parque de Carbones. Central Térmica de Puentes de García Rodríguez (La Coruña). Endesa (Empresa Nacional de Electricidad).
- Leonhardt, Fritz. (1977). Hormigón Pretensado: Proyecto y Construcción (Leonhardt). Primera Edición. Instituto Eduardo Torroja.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.