

Replacement of cables of the cover archs carbon park in As Pontes (A Coruña)

Santamarta Martínez, Jaime¹; Alonso Raso, Jose Ignacio²

ABSTRACT

The work done by Acciona Engineering at the coal yard located in As Pontes, is included within the maintenance plan established by Endesa for the period 2010-2020. This consists of predictive, preventive and corrective actions on the cables of the roof structure, which ultimately will allow extending the useful life of the facilities of the power plant.

Several pathologies were detected in numerous cables, and in particular, "cable 15 of arch n^{er}15", suffered an advanced state of degradation with significant loss of its resistant section. This led to recommend its replacement, for which an engineering detail design project was carried out. Therefore, a structural model of the whole arch affected by the pathology was done to allow the analysis of the structural behaviour of the cover during the replacement of the cable.

To achieve this goal, the model was performed by implementing a three-dimensional system of nodes and bars processed with GtStrudl structures software.

Keywords: maintenance, pathology, replacement, cable, model.

1. INTRODUCCIÓN

La Central Térmica de As Pontes, situada en la localidad de Puentes de García Rodríguez, en La Coruña (España) y perteneciente a la empresa eléctrica Endesa, es una de las instalaciones de mayor importancia en España en el ámbito de la generación de energía. Ésta consta tanto de un ciclo convencional de carbón de 1468 MW de potencia como de un ciclo combinado de gas natural de 800 MW, gracias a los cuales se cubre el 5% de la demanda total del territorio nacional. Las instalaciones están formadas por un complejo donde destacan el propio edificio de la central donde se encuentran las calderas y las turbinas, los silos de escorias, las torres de refrigeración, el centro de transformación y el parque de carbones.

En lo que respecta al parque de carbones, hay que resaltar que en él se acopian 400.000 T de lignito para abastecer la central a través de tres líneas de cintas transportadoras que recorren el parque longitudinalmente desde su extremo sur hasta el extremo norte, lo que significa una distancia total de 592 m. A ambos lados de dichas cintas se disponen las cuatro parvas de carbón que se ven protegidas

¹ Structural Engineering Department. Acciona Ingeniería (SPAIN). jaimе.santamarta.martinez@acciona.com
(Corresponding author)

² Structural Engineering Department. Acciona Ingeniería (SPAIN). joseignacio.alonso.raso@acciona.com

de la lluvia y en general de la intemperie gracias a la cubierta que fue proyectada y construida a principios de los años 80.

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 m² y está formada por 16 arcos de 160 m de luz. Combinando la estructura metálica convencional y la técnica del pretensado, la cubierta se caracteriza por su ligereza, flexibilidad y estabilidad, habiendo significado un hito en el diseño de cubiertas de grandes luces. 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.

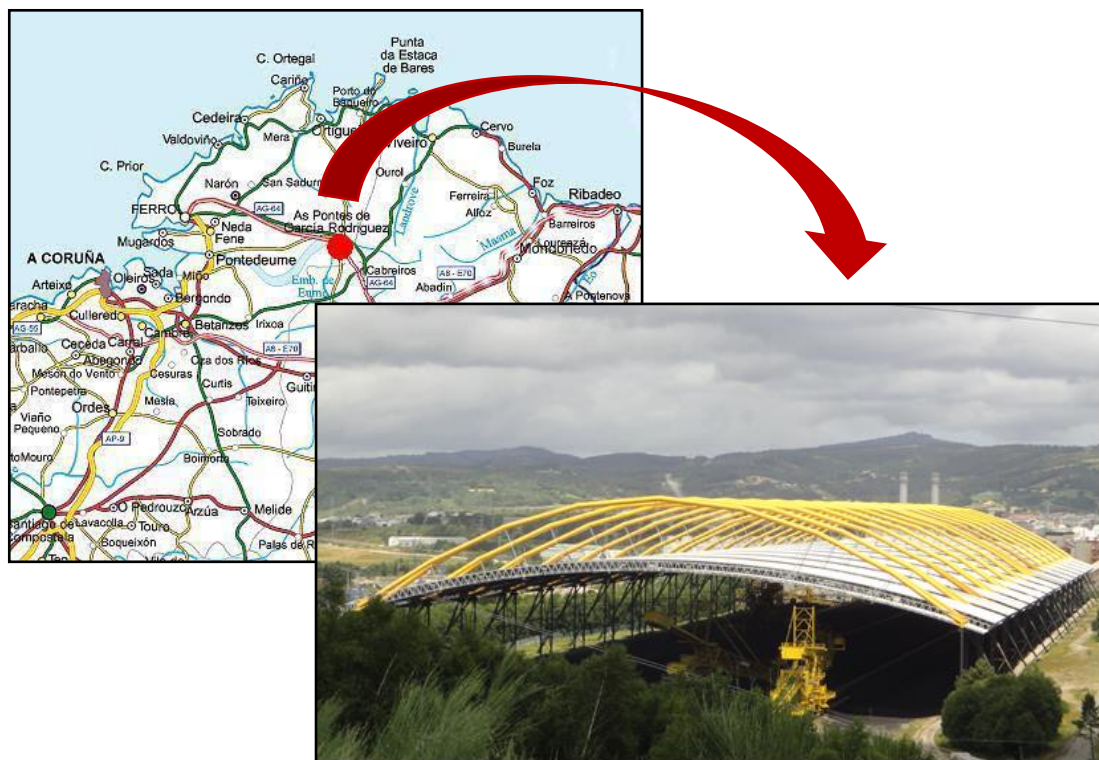


Figura 1. Localización y vista general de la cubierta del Parque de Carbones

2. ANTECEDENTES

Actualmente, los trabajos que desarrolla Acciona Ingeniería en el parque de carbones de la central, 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 las péndolas y los anclajes de cimentación de la estructura de la cubierta, que a la postre permitirán prolongar la vida útil de las instalaciones de la central térmica.

A continuación se enumeran cada una de las operaciones de mantenimiento llevadas a cabo y se describen de manera resumida aquellas que atañen de forma específica a las péndolas de la cubierta.

2.1. Mantenimiento predictivo y preventivo

Las operaciones de mantenimiento predictivo y preventivo que se indican más adelante, pretenden ser una serie de actuaciones que permitan anticiparse a la aparición de patologías graves que obliguen a llevar a cabo una reparación exhaustiva de la estructura, lo cual en general, a la postre acaba suponiendo un ahorro a medio plazo en las inversiones de mantenimiento de la central.

- Inspección de anclajes de cimentación y puesta en carga
- Análisis de las aguas subterráneas
DENOMINACION DE LAS PENDOLAS
- Inspección de péndolas de la cubierta:

Con una periodicidad de 6 años, de entre el conjunto de los 16 arcos existentes, se inspeccionan las 16 péndolas de 8 de los arcos de la cubierta. El procedimiento de ensayo consiste en obtener mediante ensayo indirecto de cuerda vibrante la frecuencia fundamental de vibración de la péndola para así conocer la carga de trabajo y el porcentaje de carga de rotura. Asimismo, se lleva a cabo una inspección visual del estado de las vainas y una propuesta de actuaciones futuras fundamentada en los resultados obtenidos, consistente en la recomendación de reparación de vainas y/o la sustitución de péndolas defectuosas.

Tabla 1. Características de las péndolas

Péndola	Tipo	L (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	Composición
201	I	8.592	410	705	8 torones Ø 0,5". Tubo exterior Ø 219 ⁶ -8 ¹⁸
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 ⁶ -8 ¹⁸
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

2.2. Mantenimiento correctivo

En aquellos casos en los que se detecta un inadecuado funcionamiento estructural de los elementos que son objeto del mantenimiento predictivo y preventivo, resulta preciso abordar una reparación que quedará recogida dentro de la planificación del mantenimiento correctivo, el cual engloba las siguientes actividades.

- Sustitución de anclajes de cimentación defectuosos
- Reparación de vainas de las péndolas:

Las péndolas con defectos subsanables en las vainas se reparan mediante un procedimiento de ejecución consistente en el corte de las mismas, picado de la lechada, pasivación, colocación de nueva vaina e inyección. Durante el proceso de reparación, en caso de detectar una pérdida de sección, se propone la sustitución de la péndola.

- Sustitución de péndolas defectuosas:

Se elabora un proyecto de ingeniería de detalle en el que se modeliza el arco afectado por la patología, para así analizar el comportamiento estructural de la cubierta durante la sustitución de la péndola. El procedimiento de ejecución se realiza mediante transferencia de cargas, para lo cual se instalan unos tirantes provisionales cuyo diseño se incluye en el proyecto junto con la definición y dimensionamiento de la nueva péndola y de los detalles metálicos que la componen. Se incorpora también un sistema de monitorización permanente de la tensión en los nuevos elementos instalados.

2.3. Justificación de la acción correctiva

A tenor de la planificación recogida en el programa de mantenimiento, y tras las últimas pruebas de inspección patológica llevadas a cabo en las péndolas de la cubierta, se determinó la recomendación de sustitución de la péndola 15 del arco 15 debido a que ésta presentaba un estado de degradación muy avanzado, con pérdida significativa de su sección resistente.



Figura 2. Fotografías en las que se puede observar el grado de deterioro de la péndola

Los ensayos indicaban que el valor de la tensión de la péndola estaba en torno al 35% de la carga máxima de rotura para el 100% de la sección teórica resistente, y que no existía ninguna péndola contigua sobrecargada. Sin embargo, se determinó que era preciso sustituir dicha péndola de manera urgente ya que la degradación sufrida afectaba a más del 50% de su sección resistente. Por tanto, la tensión de la péndola realmente representaba un porcentaje de la carga de rotura muy superior al 35%, pudiéndose dar el caso de que estuviera próximo a la rotura, ante lo cual sí podrían entonces sobrecargarse otras péndolas afectando consecuentemente al estado tensional y de deformaciones en el conjunto del arco.

Para visualizar claramente el porcentaje de carga de rotura al que se encontraban las péndolas del arco 15 en el momento de la realización de los ensayos, se incluye a continuación la siguiente tabla.

ARCO 13									
4	211	22.425	11.23	22581.35	4.79	518108.79	52.87	35.25	
5	211	22.425	11.23	22581.35	4.88	537761.34	54.87	36.58	
6	209	19.869	11.23	17727.07	5.57	549980.69	56.12	37.41	
7	207	22.555	11.23	22843.92	4.47	456442.15	46.58	31.05	
8	203	22.320	8.34	16615.38	3.28	178754.90	18.24	32.43	
9	203	22.320	8.34	16615.38	3.09	158645.30	16.19	28.78	
10	207	22.555	11.23	22843.92	4.52	466710.49	47.62	31.75	
11	209	19.869	11.23	17727.07	5.57	549980.69	56.12	37.41	
12	211	22.425	11.23	22581.35	4.79	518108.79	52.87	35.25	
13	211	22.425	11.23	22581.35	5.06	578163.89	59.00	39.33	
14	209	19.869	11.23	17727.07	4.52	362171.21	36.96	24.64	
15	207	22.555	11.23	22843.92	3.24	174421.61	17.80	31.64	
16	203	22.320	8.34	16615.38	3.24	174421.61	17.80	31.64	

Tabla 2. Cálculo del porcentaje sobre la carga de rotura en base a los ensayos de cuerda vibrante

	PÉNDOLA	TIPO	LONGITUD L (m)	MASA m (kg/m)	FACTOR $K=4mL^2$	FRECUENCIA F (Hz)	AXIL N (N) = KF^2	AXIL N (Tn) = KF^2	% Carga de Rotura
ARCO 15	1	203	22.320	8.34	16615.38	3.56	210576.67	21.49	38.20
	2	207	22.555	11.23	22843.92	4.76	517588.48	52.82	35.21
	3	209	19.869	11.23	17727.07	5.54	544072.25	55.52	37.01
	4	211	22.425	11.23	22581.35	4.80	520274.34	53.09	35.39
	5	211	22.425	11.23	22581.35	4.62	481985.40	49.18	32.79
	6	209	19.869	11.23	17727.07	5.54	544072.25	55.52	37.01
	7	207	22.555	11.23	22843.92	4.52	466710.49	47.62	31.75
	8	203	22.320	8.34	16615.38	3.42	194340.12	19.83	35.25
	9	203	22.320	8.34	16615.38	3.52	205871.20	21.01	37.35
	10	207	22.555	11.23	22843.92	4.70	504622.26	51.49	34.33
	11	209	19.869	11.23	17727.07	5.54	544072.25	55.52	37.01
	12	211	22.425	11.23	22581.35	4.57	471609.27	48.12	32.08
	13	211	22.425	11.23	22581.35	4.61	479901.14	48.97	32.65
	14	209	19.869	11.23	17727.07	5.50	536243.98	54.72	36.48
	15	207	22.555	11.23	22843.92	4.75	515416.02	52.59	35.06
	16	203	22.320	8.34	16615.38	3.51	204703.14	20.89	37.13

3. METODOLOGÍA

Una vez tomada la decisión de que la péndola 15 del arco 15 debía sustituirse, se procedió al estudio en oficina técnica de la mejor solución para la sustitución por una nueva péndola, para lo cual se tuvo en cuenta la documentación histórica del proyecto de construcción de la cubierta del parque de carbones. Se redactó un proyecto de ingeniería de detalle en el que se modelizó el arco afectado por la patología en todo su conjunto para que de este modo, se pudiera analizar el comportamiento estructural que experimentaría el mismo durante el proceso de sustitución de la péndola.

Para alcanzar este objetivo, la modelización se efectuó mediante la implementación de un sistema tridimensional de nudos y barras procesado con el software de cálculo de estructuras GtStrudl. Con la intención de calibrar adecuadamente el modelo, los resultados tanto de los esfuerzos obtenidos en las péndolas como de las reacciones en las torretas, se contrastaron respectivamente con los valores recogidos en los informes de inspección del mantenimiento predictivo (*ver tabla 2*). Una vez establecido y validado el modelo junto con las ponderaciones de cargas, el nivel de tesado en los cordones de pretensado de las cerchas del arco y el nivel de tesado en las péndolas, se analizó su respuesta bajo los siguientes dos supuestos.

- **Caso A:**

Estado de esfuerzos y desplazamientos en los nudos ante un posible fallo completo de la péndola antes de ser sustituida.

- **Caso B:**

Estado de incremento de esfuerzos y deformaciones debido al proceso de ejecución durante la sustitución de la péndola.

El procedimiento de ejecución se planteó mediante transferencia de cargas, para lo cual se diseñó la instalación de unos tirantes provisionales que permitieran no someter a la cubierta a esfuerzos ni deformaciones por encima de los tolerables. Así pues, en el proyecto constructivo, junto con la definición de la nueva péndola se incluyó también el dimensionamiento de dichos tirantes provisionales así como de los detalles de las piezas metálicas auxiliares para el anclaje de los mismos al arco de la cubierta.

Este procedimiento distinguía cuatro fases bien diferenciadas:

- **FASE 1:**

Colocación y puesta en carga del sistema de tirantes provisionales con la consiguiente descarga de la péndola a sustituir.

- **FASE 2:**

Corte y retirada de los cordones de la péndola a sustituir. Su carga residual se transferiría a la estructura del resto del arco y a las barras del sistema provisional.

- **FASE 3:**

Colocación y puesta en carga de la nueva péndola al 65% de la carga teórica final.

- **FASE 4:**

Corte y retirada del sistema provisional de barras. Su carga residual se transferiría al resto de la estructura del arco y a la nueva péndola llegando su tensión al axil teórico de trabajo.

3.1. Diseño y justificación del modelo estructural

Tal como se ha mencionado anteriormente, el modelo de cálculo implementado en el proyecto de sustitución de la péndola 15 del arco 15 (en el modelo péndola tipo 207) se basa en la utilización del cálculo matricial de barras y nudos en 3D mediante el empleo del software de cálculo de estructuras GtStrudl. Los datos geométricos necesarios para la definición de dicho modelo a través del cual se discretiza la estructura del arco en todo su conjunto, se obtuvieron a partir de los planos del proyecto de ejecución elaborado por IBERINSA en mayo-junio de 1980.

3.1.1. Descripción de la estructura modelizada

La cubierta consiste en la disposición de una serie de arcos en paralelo separados entre sí 40 m y que cubren un ancho de 12 m cada uno con una luz de 160 m. Estos 12 m conforman el nivel de cubierta superior, mientras que los 28 m existentes entre arcos adyacentes dan lugar a la cubierta de nivel inferior, la cual se sustenta mediante una estructura metálica a base de cerchas transversales.

En particular, la estructura del arco de la cubierta modelizado, 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, 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.



Figura 3. Vista de los arcos y de las cerchas desde la cubierta del nivel inferior

- Péndolas pretensadas rellenas con lechada de hormigón que unen el arco superior con los dos cordones inferiores formados por las cerchas.



Figura 4. Vista de las péndolas desde la cubierta del nivel superior

- Todo el arco se cimenta en el terreno mediante una torreta de estructura metálica que recibe el apoyo del arco en la parte superior y cuyos extremos inferiores se anclan al terreno con las correspondientes zapatas. Para soportar las tracciones presentes en la misma se disponen anclajes al terreno en las zapatas.

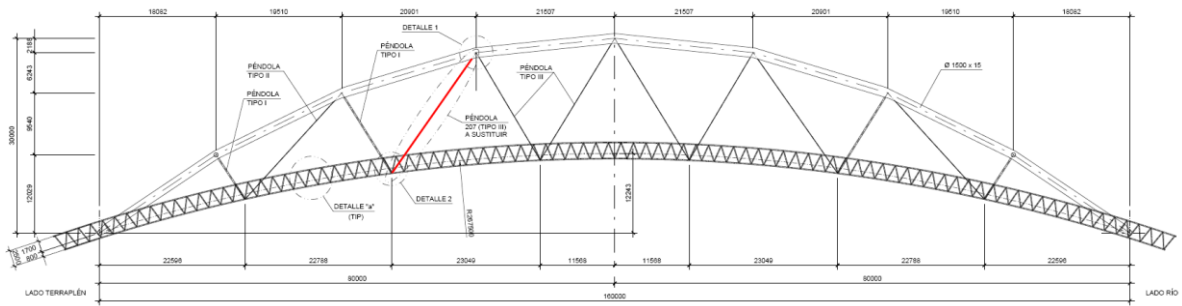


Figura 5. Alzado del arco 15

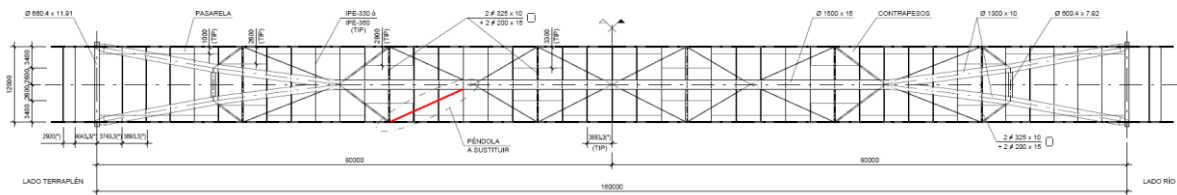


Figura 6. Planta del arco 15

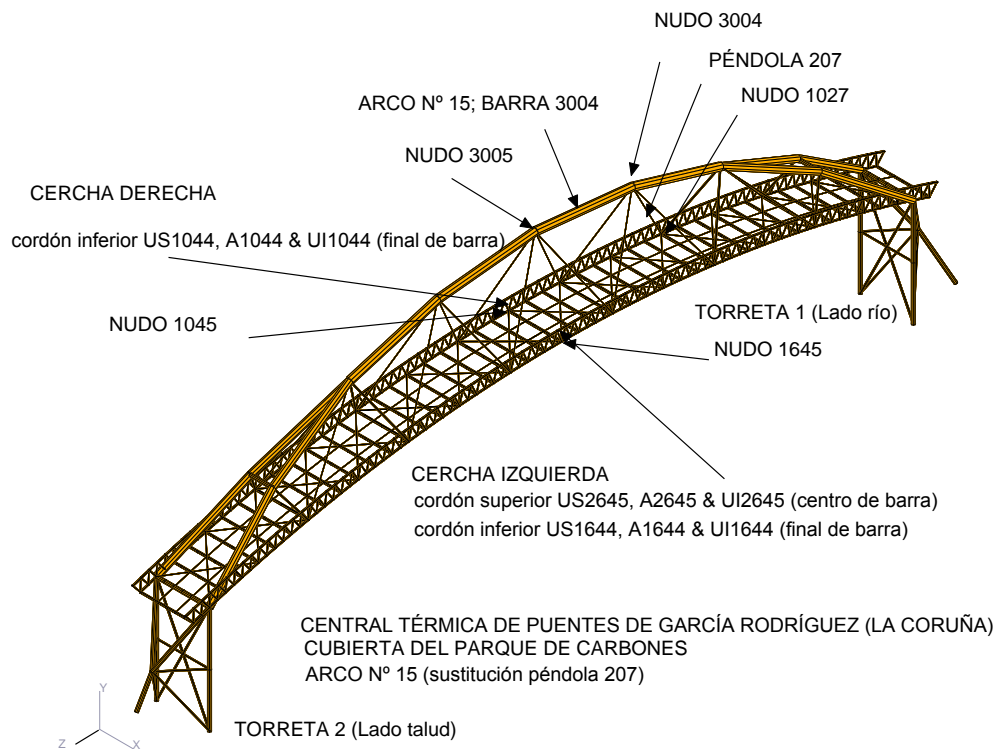


Figura 7. Esquema del modelo estructural

3.1.2. Acciones implementadas en el modelo

Las acciones introducidas en el modelo fueron las siguientes:

- Peso propio de la estructura metálica y morteros de los elementos estructurales del arco nº15 generado por el propio programa de cálculo a partir de sus características mecánicas y las densidades de los materiales de cada barra.
- Pretensado del cordón superior e inferior de cada una de las dos cerchas del arco nº15 introducido como contracción térmica de cada barra que representa cada tramo de los tendones pretensados. Se consideran tesados al 79% ($P_o=1161.71$ kN) compuesto cada cable por 8 torones de $98.71\text{mm}^2/\text{torón}$ con trazado en arco de circunferencia según el eje de cada uno de los cordones superior e inferior de ambas cerchas. Al estar en el interior de la estructura metálica las pérdidas diferidas se consideran despreciables.
- Pretensado de cada una de las péndolas del arco nº15 introducido como contracción térmica de las barras que representan los cables de pretensado de cada una de las péndolas.
 - Péndolas Tipo I: Tesadas al 53% de la carga de rotura (773.47 kN).
 - Péndolas Tipo II: Tesadas al 53% de la carga de rotura (290.05 kN).
 - Péndolas Tipo III: Tesadas al 53% de la carga de rotura (773.47 kN).
- Pesos muertos de contrapesos y aceras sobre la estructura metálica transversal que une ambas cerchas del arco nº15 para dar estabilidad frente a la acción del viento.
- Peso de la estructura metálica del resto de cubierta existente entre los arcos adyacentes y aplicado en los nudos de ambas cerchas del arco nº15.

3.1.3. Consideración del proceso constructivo del arco

En el proceso de ajuste del modelo estructural se tuvo en consideración el procedimiento constructivo que tuvo lugar durante la ejecución de la cubierta del parque de carbones en 1980. De este modo, se tuvieron en cuenta las siguientes fases de cálculo en las que se fueron variando las condiciones de contorno y la rigidez de los correspondientes elementos del modelo.

- Fase de tesado de las péndolas:

Para modelizar la fase de tesado de las péndolas teniendo en cuenta que este proceso se realizó con la estructura metálica montada completamente y situada a nivel del suelo, en el modelo sólo se activó la carga definida para esta situación 'PEND' asignando una rigidez despreciable en aquellas barras que representaban los rellenos de mortero dentro de los cordones superior e inferior de cada una de las dos cerchas del arco nº15.

También se tuvo en cuenta que los tubos metálicos que envuelven a algunas de las péndolas (las del tipo I) estarían sin conectar en los extremos para así permitir la transmisión de esfuerzos al resto de la estructura cuando éstas se tesaran.

- Fase de posicionamiento del arco sobre cada torreta:

En esta fase se conectaron los tubos que envuelven las péndolas tipo I (201, 202, 205, 206, 219, 220, 223 y 224) activando en el modelo únicamente la carga de peso propio 'PP'.

- Fase de conexión del arco con cada torreta:

Primeramente, para modelizar los rellenos de mortero dentro de los cordones superior e inferior de cada una de las dos cerchas del arco nº 15 sin que ello aportara rigidez alguna, se activó sólo la carga de peso de la inyección del mortero 'C1' y se retiraron las liberaciones de movimientos entre los nudos de conexión del arco y cada torreta para que así desde este momento se transmitieran esfuerzos horizontales a las mismas.

Posteriormente, se dio rigidez a estas barras y se activaron las cargas de pretensado de los cordones inferior y superior de cada celosía 'PRET', el peso de las aceras dispuestas 'AC', el peso de los contrapesos 'CP' y el peso de la cubierta de chapa grecada 'CB'

3.1.4. Valores de reacciones, esfuerzos y deformaciones obtenidas del modelo

En la tabla 3 se muestran los resultados de reacciones en las torretas de apoyo del arco, así como los movimientos de los nudos para cada una de las cargas básicas aplicadas al modelo en cada fase de cálculo. También se indican las reacciones para cada hipótesis, restando las correspondientes a cada torreta, y donde la carga 'PP' se pondera con el coeficiente $1.16 = 240 \cdot 9.81 / 2021.98$ para considerar la parte proporcional de rigidizadores en los nudos y otros elementos, y así igualar el peso declarado del arco de 240 T con respecto a lo que resulta del modelo.

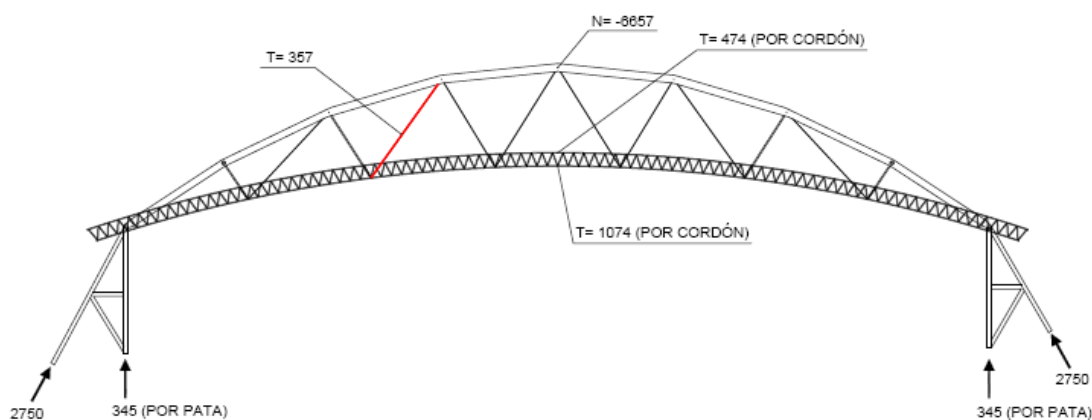


Figura 8. Esquema de reacciones y esfuerzos

El nudo 1 de la pata trasera inclinada, el 3 y el 603, se corresponden con los nudos de apoyo de la torreta del lado río (torreta de apoyo 1) mientras que los nudos de conexión de ésta con el arco nº15 son el 1003 y el 1603. Los nudos simétricos y los de la torreta del lado talud son los 89, 87 y 687, mientras que los de conexión del arco son 1087 y 1687.

La simetría de movimientos se da para las cargas 'PP' y 'PEND' pero no así en el resto, debido a la distinta rigidez presente en cada una de las dos torretas, donde resulta más rígida la del lado talud por tener la pata inclinada más corta que la de lado río.

El estado de esfuerzos en las péndolas y en los tubos del tipo I para la carga 'TODAS1', que es la combinación característica de las cargas básicas, ofrece resultados en los que destacan los esfuerzos de las péndolas 207, 208, 209 y 210, en las que no se superan los 357 kN = 36.5 T frente a las 55.52 T obtenidas con el método de cuerda vibrante.

Tabla 3. Reacciones y desplazamientos obtenidos del modelo

REACCIONES Y MOVIMIENTOS DE LAS CARGAS BÁSICAS 50%(I)+50%(II)+50%(III)
Pretensado del cordón inferior del arco al 75%; 'PP'*1.16+'CB'*1.20

fuerzas en kN.		1 pata inclinada		3		603		1003 ó 1603
TORRETA LADO RIO		Fv	FI	Fv	FI	Fv	FI	despl. [mm]
peso propio	PP	19.38	11.05	543.93	-5.52	543.93	-5.52	-76.59
péndolas	PEND	0	0	0	0	0	0	53.39
mortero inyct.	C1	288.57	165.65	-33.53	2.26	-33.53	2.26	-8.9
pretensado	PRET	-271.63	-155.8	135.8	-1.81	135.8	-1.81	10.52
aceras	AC	363.63	208.77	-31.6	2.83	-31.6	2.83	-11
contrapesos	CP	1538.34	883.02	-229.31	11.79	-229.31	11.79	-48.54
resto cubierta	CB	447.49	256.9	-42.23	3.51	-42.23	3.51	-13.6

fuerzas en kN.		89 pata inclinada		87		687		1087 ó 1687
TORRETA LADO TALUD		Fv	FI	Fv	FI	Fv	FI	despl. [mm]
peso propio	PP	6.62	-13.12	545.59	6.56	545.59	6.56	76.59
péndolas	PEND	0	0	0	0	0	0	-53.39
mort. inyct.	C1	289.95	-165.84	-34.26	-2.17	-34.26	-2.17	6.2
pretensado	PRET	-273.15	155.79	136.59	1.82	136.59	1.82	-7.98
aceras	AC	365.33	-209.04	-32.5	-2.69	-32.5	-2.69	7.6
contrapesos	CP	1545.8	-883.93	-233.27	-11.33	-233.27	-11.33	34.13
rest. cubierta	CB	449.6	-257.21	-43.35	-3.35	-43.35	-3.35	9.41

peso propio de torretas:

torre1= 96.2553291 kN
 torre2= 86.8046475 kN
 total= 183.059977 kN

fuerzas en kN.		TOTALES del arco	
TORRETA LADO TALUD		Fv	FI
peso propio	PP	2021.98	0.01
péndolas	PEND	0	0
mort. inyct.	C1	442.94	-0.01
pretensado	PRET	0	0.01
aceras	AC	600.76	0.01
contrapesos	CP	2158.98	0.01
rest. cubierta	CB	725.93	0.01

3.1.5. Validación del modelo estructural

Tomando como referencia los datos del proyecto de ejecución original de 1980, a partir de la comparación de resultados se llegó a la conclusión de que la situación que representaba el estado actual de la estructura suponiendo que la péndola a sustituir no se encontrara alterada, era asumiendo un 53% de tesado de las péndolas, un 79% de pretensado en los cordones superior e inferior de las cerchas, un incremento del 16% en el peso propio de la estructura y un 20% del resto de cubierta.

Con el fin de validar el modelo, se realizaron cálculos considerando variaciones del tesado de las péndolas y se compararon los resultados con el estudio de esfuerzos de cada una de ellas llevado a cabo a través del método de cuerda vibrante. Variando el tesado de estas péndolas se obtuvieron resultados de esfuerzos que no llegaban a los valores de los estudios de cuerda vibrante, que ofrecían resultados del orden de las 50 T, mientras que en el modelo rondaban las 35 T. Se estimó que estas discrepancias se debían a una imprecisión de los valores reales de las masas y longitudes de vibración tomadas en estos estudios de cuerda vibrante.

Reduciendo la longitud de vibración de la péndola a valores que tuvieran en cuenta la rigidez de los nudos extremos, es decir, tomando un valor de la longitud corregida de $L^* = 22.555 - 0.96 - 0.92 = 20.675$ m, una frecuencia de 7.75 Hz y una masa de 8.17 kg/m, el método de la cuerda vibrante ofrecía la siguiente carga axil corregida:

$$N = 4 mL^2f^2 = 315.18 \text{ kN} = 32.13 \text{ T} \quad (1)$$

Este valor resultó ser más próximo al obtenido en el modelo 3D de 357 kN = 36.5 T, con lo que quedó así verificado y validado el modelo.

3.1.6. Características de la nueva péndola a instalar

Seguidamente, de manera resumida se definen las características principales de la nueva péndola a instalar.

- Anclaje superior H1000 fijo con manguitos de extrusión.
- Anclaje inferior H1000 activo y regulable con cuñas (carrera de 100 mm).
- 6 cordones de 7 hilos de acero tipo Y 1860/S/7/16.0 según prEN 10138-3, diámetro 15,7 mm autoprotegidos (galvanizado, revestimiento de vaina de polietileno de alta densidad y protección con relleno de cera petrolífera).
- Capot galvanizado en caliente ISO 1461.
- Vaina de polietileno clase PE100 de diámetro exterior 110 mm y espesor 6 mm.
- Tubo antivandálico de acero tipo S 235.
- Cera de inyección para rellenar el capot del tipo INJECTELF C.P.H.P.F.
- Carga de tesado: 230 kN.
- Carga final: 355 kN (una vez transferida la carga de los tirantes provisionales).

3.2. Análisis del Caso A: fallo completo de la péndola antes de ser sustituida

Para analizar el caso de fallo completo de la péndola 207 se estudió el modelo liberando el extremo de la barra que representaba esta péndola y se introdujo una carga unitaria de 100 kN alineada con la barra en el nudo extremo: 'R207'.

En este caso se procedería a instalar la nueva péndola sin usar un sistema provisional, por lo que la puesta en tensión de ésta se efectuaría en el modelo mediante la carga denominada 'T207'.

El sistema de tirantes provisionales en paralelo 'PR207', no obstante se mantuvo en el modelo. Sin embargo, para este supuesto se asignaron a las barras representativas de dichos tirantes unas características mecánicas con un módulo E anulado por lo que no intervendrían en los resultados estructurales.

Bajo estos condicionantes se obtuvieron los esfuerzos en los elementos más representativos del arco, y que son los que se recogen a continuación.

- Las barras del arco: 3004 y 3005.
- Las barras de la cercha derecha.
 - a. Cordón superior: las dos "U" 'US2045' y 'UI2045', y el cable tesado 'A2045'.
 - b. Cordón inferior: las dos "U": 'US1044' y 'UI1044', y el cable tesado 'A1044'.
- Las barras de la cercha izquierda.
 - a. Cordón superior: las dos "U": 'US2645' y 'UI2645', y el cable tesado 'A2645'.
 - b. Cordón inferior: las dos "U": 'US1644' y 'UI1644', y el cable tesado 'A1644'.
- La péndola 'PD1027'

El estado de esfuerzos obtenidos en las péndolas y en los tubos del tipo I para la carga 'TODAS2', que es la combinación característica de las cargas básicas añadiendo la carga 'R207' que anula el estado de esfuerzos en la barra, dejó entrever resultados en los que la péndola 205 era la que mayor incremento de carga presentaba, pasando de 399.65 kN a 538.02 kN, es decir, un 34.6% más. La péndola 206 sin embargo se relajaba casi el mismo porcentaje.

Teniendo estos valores en consideración, las fluctuaciones de los esfuerzos en estos elementos de control se consideraron perfectamente tolerables.

En cuanto a los movimientos, los nudos sufrirían desplazamientos cuyos valores máximos no superarían los 7 cm que para la longitud de vano de 160 m de luz, significaría una relación deformación/luz inferior equivalente a 1/2286.

En la tabla 4 se pueden ver los valores de los desplazamientos en los nudos 1027 y 3004, y junto a ello, los alargamientos del cable dentro del gato, que junto a la presión aplicada en el mismo serán los dos

parámetros fundamentales a controlar en la fase de tesado de cables. Este alargamiento del cable dentro del émbolo del gato es la suma del acercamiento de nudos extremos al aplicar el tesado y el alargamiento de los cables de la péndola al entrar en carga.

Tabla 4. Desplazamientos esperables obtenidos del modelo estructural

FASES DE LA SUSTITUCIÓN DE LA PÉNDOLA 207			FASE 1	FASE 2
			Corte y retirada de péndola 207	Tesado péndola 207 al 100%
MOVIMIENTO DE LOS EXTREMOS	1027	Ux [mm]	2.43	-2.43
		Uy [mm]	-42.39	42.41
		Uz [mm]	10.22	-10.21
	3004	Ux [mm]	55.94	-55.95
		Uy [mm]	9.47	-9.48
		Uz [mm]	6.83	-6.82
RECORRIDO DEL GATO	entre nudos	$\Delta L1$ [mm]	74.60	-74.62
	péndola	$\Delta L2$ [mm]	(0.00)	55.29
	SIST. PRV.	$\Delta L3$ [mm]	*****	*****
	total en gato	ΔL [mm]	*****	129.92

3.3. Análisis del Caso B: sustitución según el procedimiento de ejecución

Siguiendo el procedimiento de ejecución que se planteó mediante transferencia de cargas en 4 fases, se analizó la respuesta estructural del conjunto del arco así como en las péndolas adyacentes a la catalogada como 207 en el modelo.

- FASE 1:

Colocación y puesta en carga del sistema de tirantes provisionales con la consiguiente descarga de la péndola a sustituir.

Los tirantes provisionales se proyectaron para una carga de 125 kN cada uno, lo que supuso que la tensión del sistema provisional sería equivalente al 70% (250.21 kN) de la carga que poseía en teoría el cable de la péndola (357.44 kN). Esta carga denominada 'PR207' se aplicó al modelo del arco al que se le añadió una barra en paralelo entre los nudos extremos de la péndola 3004 y 1027 con unas características equivalentes a los cables del sistema provisional. La carga consistió en un acortamiento térmico aplicado en esta barra, equivalente a la fuerza de tesado.

- FASE 2:

Tras el corte y retirada de los cordones de la péndola a sustituir, la carga residual se transferiría a la estructura del resto del arco y a las barras del sistema provisional.

Se aplicó en el modelo la carga 'C207' de valor de 100 kN y orientada según la barra que unía los nudos extremos 3004 y 1027. En la combinación de ésta con la fase anterior se la ponderaría con el esfuerzo axial residual del cable de la péndola al finalizar la fase 1 anterior (230.59 kN).

- FASE 3:

Colocación y puesta en carga de la nueva péndola al 65% de la carga teórica final (232.34 kN).

La carga 'TN207' aplicada en el modelo se simuló como una contracción térmica equivalente en la barra que representaba el cable de la péndola.

- FASE 4:

Corte y retirada del sistema provisional de barras. Su carga residual se transferiría al resto de la estructura del arco y a la nueva péndola llegando su tensión al axil teórico de trabajo. Los valores obtenidos en este proceso fueron de 354.78 kN en vez de los supuestos 357.44 kN, lo cual constituyó una considerable aproximación.

Esta carga 'CPR207' se introdujo en el modelo como una carga en el nudo 3004 y otra opuesta en el extremo de la barra del sistema provisional liberado del nudo y de valor 100 kN. Esta carga se combinó con el estado anterior mediante el coeficiente 2.4914 para introducir la fuerza residual del mismo de valor 249.14 kN. El esfuerzo de tracción presente en el centro de la barra que representaba el cable de la péndola 207 sustituida era de 357.44 kN, un valor muy aproximado al presente inicialmente en el centro de la barra (356.79 kN) por lo que se dio por cumplido el objetivo del modelo.

Bajo estos condicionantes se obtuvieron los esfuerzos en los elementos más representativos del arco, y que son los mismos que los analizados para el Caso A, a los que hay que añadir las barras que simulan los tirantes provisionales. Estos son los que se indican a continuación.

- Las barras del arco: 3004 y 3005.
- Las barras de la cercha derecha.
 - a. Cordón superior: las dos "U" 'US2045' y 'UI2045', y el cable tesado 'A2045'.
 - b. Cordón inferior: las dos "U": 'US1044' y 'UI1044', y el cable tesado 'A1044'.
- Las barras de la cercha izquierda.
 - a. Cordón superior: las dos "U": 'US2645' y 'UI2645', y el cable tesado 'A2645'.
 - b. Cordón inferior: las dos "U": 'US1644' y 'UI1644', y el cable tesado 'A1644'.
- La péndola 'PD1027'
- La barra del sistema en paralelo 'PR207'.

De manera concluyente se pudo afirmar que la evolución de los esfuerzos así como de los desplazamientos en el arco nº15 se movían dentro de unos márgenes perfectamente tolerables por la estructura tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Esfuerzos y desplazamientos esperables obtenidos del modelo estructural

ESFUERZOS AXILES EN KN : FASES DE CONSTRUCCIÓN

ELEMENTO	ESTADO INICIAL	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
		Tesado del Sistema Provisional 70%	Corte de la Péndola 207	Tesado de la Nueva Péndola 207 al 65%	Destesado y Retirada del Sistema Provisional
Péndola 207	356,79	230,59	0,00	232,34	354,78
Tirantes provisionales(por unidad)	0,00	125,10	196,06	124,57	0,00
Arco	-6656,69	-6660,32	-6657,73	-6660,35	-6656,64
Tablero (por cordón superior)	473,58	447,68	466,20	447,54	474,00
Tablero (por cordón inferior)	1074,63	1103,45	1082,84	1103,60	1074,16

MOVIMIENTOS RELATIVOS EN MM. DE LA PÉNDOLA SUSTITUIDA . FASES DE CONSTRUCCIÓN

MOVIMIENTOS EN LA PÉNDOLA 207			FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
			Tesado del Sistema Provisional 70%	Corte de la Péndola 207	Tesado de la Nueva Péndola 207 al 65%	Destesado y Retirada del Sistema Provisional
MOVIMIENTO DE LOS EXTREMOS	Tablero	Ux [mm]	-0,84	0,60	-0,61	0,87
		Uy [mm]	14,71	-10,52	10,60	-15,02
		Uz [mm]	-3,54	2,54	-2,55	3,61
	Arco	Ux [mm]	-19,41	13,88	-13,99	19,83
		Uy [mm]	-3,29	2,35	-2,37	3,36
		Uz [mm]	-2,37	1,68	-1,70	2,42
MOVIMIENTO ENTRE EXTREMOS	Arco-tablero	ΔL [mm]	-25,89	18,51	-18,65	26,44

4. VALIDACIÓN DE LA EJECUCIÓN EN BASE AL MODELO ESTRUCTURAL

La validación del modelo estructural llevada a cabo en la fase de desarrollo del proyecto constructivo condujo no sólo a poder realizar un diseño preciso de cada uno de los nuevos elementos estructurales a instalar, sino que ante todo, permitió abordar la ejecución de la obra de sustitución de la péndola con plenas garantías de seguridad.

Tanto durante el proceso de tesado de los tirantes provisionales, como durante el desmontaje de la vieja péndola y el montaje y tesado de la nueva, se fueron tomando diversas lecturas en la cabeza activa del anclaje para así poder contrastar estos valores con los obtenidos del modelo estructural.

En concreto, se tomaron las siguientes medidas:

- La carga en el gato.
- El alargamiento del cilindro.
- La penetración de las cuñas.
- La lectura de la célula de carga.



Figura 9. Cabeza activa del anclaje de la péndola

El proceso de tesado se realizó por Isotensión[®], empezando por el cordón de referencia, el cual iba equipado con una célula de carga provisional. Durante el tesado de los siguientes cordones, se comprobó la carga en el cordón de referencia y se hicieron 3 pasadas hasta poder garantizar la fuerza de tesado especificada en proyecto (230kN).

Las conclusiones fueron que a lo largo de las distintas fases de ejecución, se obtenían desviaciones del entorno del 3,7% sobre los alargamientos teóricos en los cables. Al tratarse de valores inferiores a la cota máxima de error preestablecida en el 5%, se asumieron como válidos, lo cual no hizo más que confirmar empíricamente la gran aproximación del modelo estructural a la realidad.

Tabla 6. Recorrido de los gatos durante el tesado

RECORRIDOS DE LOS GATOS DURANTE EL TESADO		FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4
		Tesado del Sistema Provisional 70%	Corte de la Péndola 207	Tesado de la Nueva Péndola 207 al 65%	Destesado y Retirada del Sistema Provisional
TIRANTES PROVISIONALES	ΔL [mm]	49,27	*****	*****	*****
NUEVA PÉNDOLA 207	ΔL [mm]	*****	*****	54,60	*****

Una vez tesada la nueva péndola y destesados los tirantes provisionales, se procedió a comprobar la carga de la péndola mediante un pesaje. Con ello se verificó que ésta tenía una carga aproximada de 345 kN, lo que suponía un error en torno al 3% respecto de la carga teórica del modelo del proyecto constructivo. Con este nivel de error se pudo dar también por correcta la transferencia de carga que se había producido de los tirantes provisionales a la nueva péndola. No obstante, para dejar cargada la péndola en niveles del proyecto constructivo, se procedió a hacer un pequeño retesado hasta alcanzar los 355 kN de proyecto.

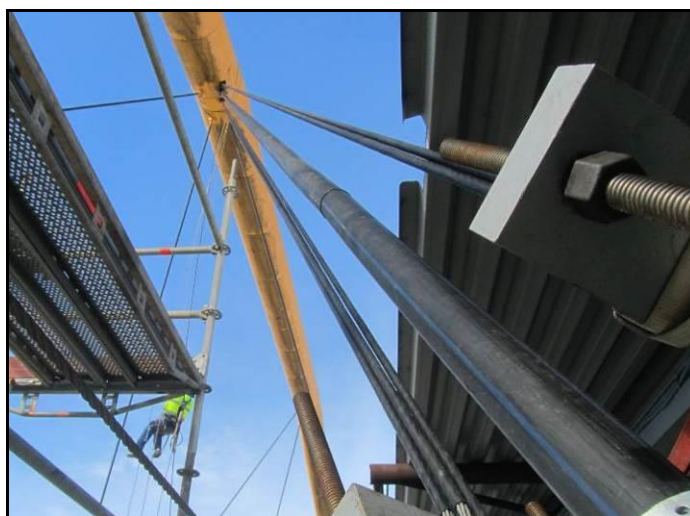


Figura 10. Nueva péndola junto con los tirantes provisionales (Fase 3)

5. CONCLUSIONES

Tras el estudio de los esfuerzos y desplazamientos de los nudos del modelo estructural se extrajeron las siguientes conclusiones que no hacen más que poner en relieve la importancia que tiene desarrollar un modelo llevando a cabo una verificación minuciosa de los resultados que de él se obtienen. A la postre esta labor permitirá validar el modelo con garantías y acercarse al comportamiento real de la estructura durante su ejecución y su estado final.

- En el supuesto de que la péndola estuviera fuera de servicio debido a un fallo completo de la misma (Caso A), tanto los esfuerzos como los desplazamientos de las péndolas anexas permanecerían en niveles de seguridad aceptables debido a la gran flexibilidad de la estructura metálica.
- En el Caso B, el proceso de tesado de los tirantes provisionales colocados en paralelo a la péndola a sustituir conllevaría también unos desplazamientos y un reparto de esfuerzos aceptables en la estructura metálica y péndolas de su cercanía.
- Se lograría descargar por completo la péndola a sustituir aplicando un esfuerzo de acercamiento entre nudos extremos de la misma del orden del doble al que posee teóricamente la péndola (715 kN). Este esfuerzo produciría desplazamientos insignificantes frente a la luz del arco.
- Las medidas de contraste tomadas durante la ejecución de la obra de sustitución de la péndola, arrojaron la conclusión de que existía una gran aproximación de los resultados del modelo estructural con la realidad.

AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a D. Jose Manuel Rodríguez Otero, Jefe de Mantenimiento del Parque de Carbones de la Central Térmica As Pontes de Endesa, por quien todo este proyecto ha podido ser llevado a cabo, así como a D. Jorge Sánchez en representación de la empresa Freyssinet S.A., que colaboró con Acciona Ingeniería S.A. en el desarrollo de los trabajos de ejecución de la obra.

REFERENCIAS

- [1] 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)*.
- [2] 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)*.
- [3] Leonhardt, Fritz. (1977). Hormigón Pretensado: Proyecto y Construcción (Leonhardt). Primera Edición. *Instituto Eduardo Torroja*.