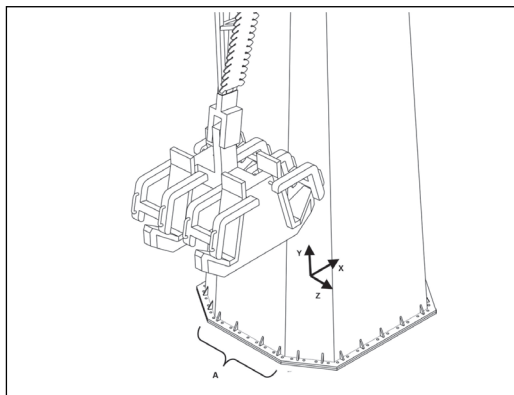


Análisis del accidente de "el péndulo" en el parque de atracciones Tibidabo de Barcelona



David Carretero-Alfaro*
David Sánchez-Molina**
Eva Martínez-González***
Juan Velázquez-Ameijide**
Carlos Arregui-Dalmases***

Ingeniero Mecánico
Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

* SCHAEFFLER IBERIA. C/ Foment, 2. Pol. Pont Reixat - 08960 Barcelona. Tfno: +34 934 803410.

EUETIB-UPC. ** Dpto. Resistencia de Materiales y Estructuras en Ingeniería y *** Dpto. Ingeniería Mecánica. Comte d'Urgell, 187 - 08036 Barcelona. Tfno. +34 934 137335, david.sanchez-molina@upc.edu

Recibido: 01/10/2012 • Aceptado: 04/10/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5401>

ANALYSIS OF THE ACCIDENT OF 'EL PÉNDULO' IN THE AMUSEMENT PARK OF TIBIDABO IN BARCELONA

ABSTRACT

• An analysis of the possible causes of the collapse of an attraction (El Péndulo) located in the amusement park of Tibidabo (Barcelona) has been performed. This analysis corroborates some hypotheses asserted by Professional association of Industrial Engineers of Catalonia (COEIC) by numerical computations. The accident caused a fatality and additional injured people.

This attraction was opened in August of 2006, that indeed, it lasted for 4 years. In the analysis carried out, it is analyzed in detail the most probable hypothesis that could have happened focusing the causes of the collapse on the preloaded screws provided to the lower base of el Péndulo and the presence of corrosion on the screws.

Publicly known data have been used for an accurate reconstruction of the geometry of el Péndulo. This is used for kinematical and dynamical computations in detail. These suggest to discard some possible failure causes, and they point to corrosion and tightening torque as factors involved in the collapse.

• **Key Words:** Pendulum; Tibidabo; Accident; Amusement Park; Fatigue of materials; Corrosion.

RESUMEN

Para el presente estudio se ha llevado a cabo un análisis de las posibles causas del colapso de una atracción (*El Péndulo*) situada en el parque recreativo del Tibidabo (Barcelona); este análisis confirma algunas de las hipótesis planteadas por expertos del *Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Cataluña* (COEIC) mediante cálculos numéricos. El accidente causó un fallecimiento y heridos adicionales.

La atracción fue inaugurada en agosto de 2006 y, de hecho, sólo duró 4 años. En el análisis realizado se revisan en detalle las hipótesis probables de lo que pudo suceder, focalizando las causas de colapso relacionadas con los pernos precargados de la base inferior de El Péndulo así como la presencia de corrosión en los mismos.

Los datos públicos se han usado para llevar a cabo la re-

construcción adecuada de la geometría de El Péndulo, usada en cálculos cinemáticos y dinámicos detallados. Estos sugieren descartar algunas causas de fallo posibles y señalan a la corrosión y el par de apriete como factores involucrados en el colapso.

Palabras Clave: Péndulo, Tibidabo, Accidente, Parque de Atracciones, Fatiga de materiales, Corrosión

1. INTRODUCCIÓN

La atracción de *El Péndulo*, del parque de atracciones barcelonés Tibidabo, se desplomó el 16 de julio de 2010 causando el fallecimiento de una joven de 15 años y heridas a tres personas más. La conmoción social de los hechos generó un alud de informaciones en los medios de comunicación sobre las causas del suceso. Probablemente, como en cualquier accidente de estas

características, la causa no es única y, tal como apunta el informe pericial que solicitó el *Ayuntamiento de Barcelona*, el accidente es la consecuencia de una cadena de defectos y errores tanto de diseño como de mantenimiento. El COEIC encargó y publicó informes periciales los cuales señalan las posibles causas del fallo mecánico que pudieron provocar el colapso. En este artículo se analizan diferentes hipótesis previamente planteadas por otros expertos independientes, sometiéndolas a cuantificación numérica. Este trabajo independiente ha permitido juzgar como probables algunas de las posibles causas propuestas por el COEIC y otros expertos que formalizaron sus opiniones a través de diferentes medios de comunicación.

El estudio se centra en el comportamiento de los pernos de sujeción de la atracción durante el tiempo de servicio de la misma, ya que estos son los únicos elementos que presentaron fallo estructural. A partir de los datos públicos sobre la atracción y de las informaciones publicadas, se propone un estudio cuantitativo de la causa del colapso, con resultados comparables con los datos conocidos sobre el accidente. Para ciertas propiedades mecánicas no recogidas explícitamente en los informes públicos se ha establecido tentativamente su valor escogiendo los valores típicos que suelen utilizarse para estructuras como la estudiada, por lo que algunos hechos secundarios sólo se podrán ratificar, cuando se publique la documentación y los ensayos de diversos peritajes. Sin embargo, ninguno de los valores tentativos resulta crítico, por lo que las conclusiones no dependen críticamente de estos valores estimados hipotéticamente.

El valor de este estudio radica en cálculos numéricos con lo que se mejora cualitativamente y cuantitativamente la información disponible, complementando las opiniones cualitativas de expertos sobre las causas probables del accidente. Los autores consideran que, entre la información pública accesible actualmente, falta un estudio basado en cálculos numéricos que evalúe las hipótesis que se han planteado hasta el momento de manera objetiva. Tal y como se verá más adelante, los resultados que proponen los autores, ajenos a la redacción de alguno de los informes anteriormente citados, se ajustan a los existentes en el periodo en el que la atracción estuvo en servicio; se corroboran dichos resultados a partir de videos hallados por medios públicos en los cuales se verifica la respuesta precisa del modelo creado.

1.1. ANTECEDENTES

Tres horas y media antes del accidente operarios de mantenimiento del parque revisaron la atracción alertados por usuarios que escucharon “*ruidos extraños*” producidos en los anclajes. Los operarios detectaron también un movimiento inusual de la estructura, y por ello, procedieron a verificar la atracción según los protocolos habituales del parque. Se realizó una prueba con la góndola vacía, y se dio por bueno el estado de El Péndulo, abriendo de nuevo la atracción al público. Justo antes de fallar, se puso en marcha y en la primera oscilación, al volver a su posición inicial, toda la estructura se desplomó fallando los anclajes de la base de hormigón.

Al examinar los anclajes *in situ*, la policía autonómica manifestó que presentaban muestras de corrosión. Este hecho se considera clave en el estudio realizado. En los informes periciales encargados al COEIC, se indican las posibles causas del fallo mecánico. Si bien se han realizado valoraciones acerca del estado de los pernos de fijación y demás elementos presentes en las construcciones anexas (o más exactamente el estado en el que se encontraba todo el conjunto justamente después del accidente), los autores de este artículo no han podido acceder a ningún documento o información que haya analizado cuantitativamente las causas de colapso, siendo la mayoría de referencias que han localizado valoraciones cualitativas de las posibles causas.

En el informe del COEIC, se detalla que en la caída de El Péndulo pudieron intervenir varias causas, aunque fueron determinantes las deficiencias en el diseño de la base de la atracción. Según el informe, la atracción falló debido a la fatiga en los anclajes; y apunta posibles errores en el cálculo de los pernos y falta de definición de la calidad y características

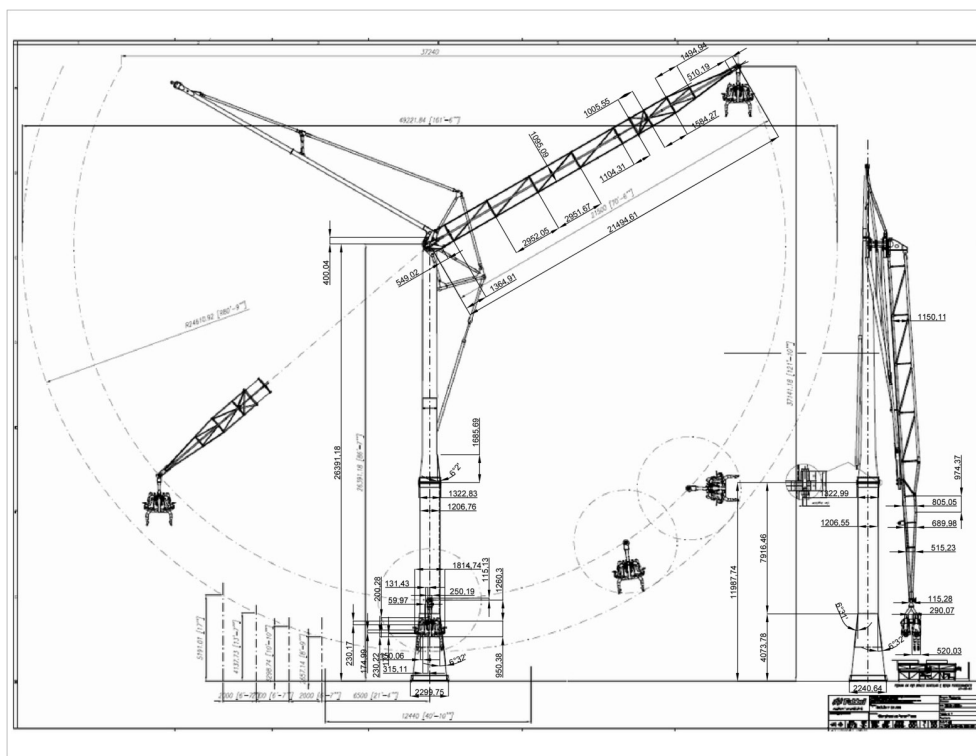


Fig. 1: Plano del Péndulo realizado por el fabricante con acotaciones intermedias realizadas con AutoCAD

de los pernos de fijación de la base. También señala que no se detectó la rotura de los pernos en la última inspección de ultrasonidos, realizada por la empresa certificadora el 9 de Junio, cinco semanas antes del colapso.

2. MÉTODOS Y DATOS

2.1. RECONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA

Con la finalidad de realizar un modelo para analizar las causas del colapso, resulta crucial disponer de los parámetros intrínsecos de la atracción tales como masas, inercias, dimensiones, etc. El punto de partida es el plano del modelo *Air Diver* (el modelo del Péndulo) de la empresa fabricante mostrado en la Fig. (1). Para completar el modelo geométrico se ha reconstruido la geometría completa del Péndulo a partir del plano y el auxilio de fotografías comparables con dicho plano que permite estimar algunos parámetros adicionales.

A partir de las dimensiones acotadas en el plano, se han determinado, cotas secundarias no indicadas, a partir de la proporcionalidad del escalado y ajustando los efectos de la perspectiva en las fotografías, ver Fig. (2). Para los detalles en los que no ha sido posible por falta de detalle, extrapolando estas medidas a fotografías halladas con la finalidad de medir sobre las mismas. Se ha realizado de esta forma un análisis estadístico de todas y cada una de las dimensiones con la finalidad de obtener el valor más probable para cada cota.

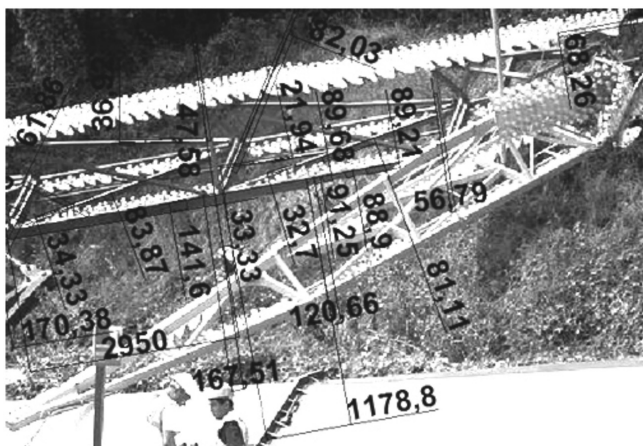


Fig. 2: Reconstrucción de la geometría del brazo del Péndulo cotas en [mm]

Finalmente se ha obtenido el modelo reconstruido mostrado en la Fig. (3). Una placa de anclaje se une con la zapata de cimentación, en esta placa de anclaje se une la base del Péndulo que está descompuesta en tres partes (inferior, intermedia y superior). Junto a la base superior está situado el brazo unido mediante una articulación que permite el giro. Finalmente, con el brazo se encuentra unida la góndola también mediante una articulación la cual se bloquea mecá-

nicamente en cuanto el sistema brazo-góndola pasa por el punto más bajo.



Fig. 3: Comparativa entre el modelo (centro y derecha) y el existente (izquierda)

2.2. RECONSTRUCCIÓN CINEMÁTICA

A partir del modelo en 3D reconstruido se han obtenido todos los parámetros relevantes para el cálculo (masa, inercias, etc). Con todos estos datos, se realiza un análisis cinemático para dos casos diferentes:

- En el primer caso se modeliza la atracción como un sistema con dos grados de libertad (teniendo libertad de giro tanto el brazo como la góndola del Péndulo) con la base totalmente perpendicular respecto suelo.
- En el segundo caso se considera que la base está inclinada un grado en sus ejes más desfavorables. Este caso recoge la inclinación del apoyo debido a las escorrentías que habían detectado en el terreno en el cual estaba El Péndulo, el hormigón de la zapata, al ser poroso podía haber sufrido una cierta inclinación provocando la pérdida de la perpendicularidad de la base con el suelo de tal forma que los esfuerzos que se produjeran fueran distintos a los que habían sido inicialmente previstos (este segundo caso examina una hipótesis apuntada por A. Massagué, consultor de estructuras cuya opinión apareció en diversos medios de comunicación).

A pesar de que se han examinado dos casos de cálculo diferentes, en el presente artículo tan sólo se mostrarán en forma de ecuaciones y figuras aquellas referidas al modelo con la base totalmente perpendicular al suelo debido a la similitud de resultados entre ambos casos.

Para el estudio de la cinemática del movimiento se ha empleado un esquema de cálculo con dos grados de libertad (posición angular del brazo y posición angular de la góndola) estando articulados tanto el brazo con la base superior como el brazo con la góndola, véase la Fig. (3). Este esquema de cálculo es un modelo matemático no-lineal de grandes oscilaciones y dos grados de libertad acoplados, que incluye el rozamiento viscoso por la presencia del aire, lo cual produce una disminución progresiva de la amplitud, ver Fig. (4). Con el modelo usado, se obtiene una duración total del movimiento del sistema brazo-góndola de aproximadamente 140 segundos tal y como ocurría en el parque de atracciones (estas mediciones se han realizado a partir de vídeos, disponibles en internet). En la Ec. [1] se representa el sistema de ecuaciones que define el movimiento para las dos variables angulares θ_1 y θ_2 que describen completamente la posición:

$$\begin{cases} \underbrace{\hat{I}_1 \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2}}_{\text{Término inercial}} + \underbrace{m_B g l_0 \sin(\alpha_1)}_{\text{Par asociado a la gravedad}} + \underbrace{c_B l_0^2 \frac{d\alpha_1}{dt}}_{\text{Rozamiento viscoso con el aire}} + \underbrace{f_1\left(\alpha_1, \alpha_2, \frac{d\alpha_1}{dt}, \frac{d\alpha_2}{dt}, \frac{d^2 \alpha_2}{dt^2}\right)}_{\text{Influencia de la góndola sobre el brazo}} = 0 \\ \underbrace{\hat{I}_2 \frac{d^2 \alpha_2}{dt^2}}_{\text{Influencia del brazo sobre la góndola}} + \underbrace{m_G g l_2 \sin(\alpha_2)}_{\text{Par asociado a la gravedad}} + \underbrace{c_G l_2^2 \frac{d\alpha_2}{dt}}_{\text{Rozamiento viscoso con el aire}} + \underbrace{f_2\left(\alpha_1, \alpha_2, \frac{d\alpha_1}{dt}, \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2}\right)}_{\text{Influencia del brazo sobre la góndola}} = \underbrace{M_v \left(\frac{d\alpha_2}{dt}, |\alpha_1 - \alpha_2|\right)}_{\text{Acoplamiento mecánico forzado}} \end{cases} \quad (1)$$

Donde los parámetros usados son:

- α_1, α_2 : Ángulos del brazo respecto a la vertical y del montante de la góndola respecto a la vertical.
- m_B, m_G : Masa del brazo y la góndola respectivamente [kg].

Las inercias efectivas se calculan como:

$$\hat{I}_1 = I_{B0} + m_G l_1^2, \quad \hat{I}_2 = I_{GzCG} + m_G l_2^2$$

- I_{B0}, I_{GzCG} : Momento de inercia de masas del brazo con respecto al eje de giro y momento de inercia de masas de la góndola en el centro de gravedad respecto al eje Z [kg·m²]. Véase el sistema de coordenadas considerado en la Fig. (5).
- l_0, l_1, l_2 : Distancia desde el eje de giro hasta el centro de gravedad del brazo, distancia desde el eje de giro hasta el extremo articulado que une el brazo con la góndola y distancia desde este extremo articulado hasta el centro de gravedad de la góndola respectivamente [m].
- c_B, c_G : Coeficiente de rozamiento viscoso con el aire del brazo y la góndola respectivamente [N·s/m].
- M_v : Par viscoso restaurador que modeliza el acoplamiento mecánico existente entre el brazo y góndola [N·m].

Finalmente las funciones de influencia y el acoplamiento mecánico forzado vienen dados por:

$$\begin{aligned} f_1\left(\alpha_1, \alpha_2, \frac{d\alpha_1}{dt}, \frac{d\alpha_2}{dt}, \frac{d^2 \alpha_2}{dt^2}\right) &= m_G l_1 l_2 \left[\frac{d^2 \alpha_2}{dt^2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \left(\frac{d\alpha_2}{dt}\right)^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \right] + \dots \\ &\dots + m_G g l_1 \sin(\alpha_1) + c_G \left(l_1^2 \frac{d\alpha_1}{dt} + l_1 l_2 \frac{d\alpha_2}{dt} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \right) \\ f_2\left(\alpha_1, \alpha_2, \frac{d\alpha_1}{dt}, \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2}\right) &= m_G l_1 l_2 \left[\frac{d^2 \alpha_1}{dt^2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \left(\frac{d\alpha_1}{dt}\right)^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \right] + \dots \\ &\dots + c_G l_1 l_2 \frac{d\alpha_1}{dt} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \\ M_v \left(\frac{d\alpha_2}{dt}, \alpha_2 - \alpha_1 \right) &= \begin{cases} +3500 \frac{d\alpha_2}{dt}, & \alpha_2 - \alpha_1 \leq -\frac{\pi}{12} \\ 0, & |\alpha_2 - \alpha_1| < \frac{\pi}{12} \\ -3500 \frac{d\alpha_2}{dt}, & \alpha_2 - \alpha_1 \geq +\frac{\pi}{12} \end{cases} \end{aligned}$$

Este sistema ha sido resuelto por métodos numéricos debido a que no existe solución analítica (no es expresable en términos de funciones predefinidas) [1]. Concretamente se ha hecho uso del método de Runge-Kutta como integración numérica [2]. La variación de posición con el tiempo se muestra en la Fig. (4).

Tal como puede observarse en la Fig. 4, inicialmente aparece un efecto transitorio debido a que se produce un acople de la góndola con el brazo entre 0 y 3 segundos, por lo que se

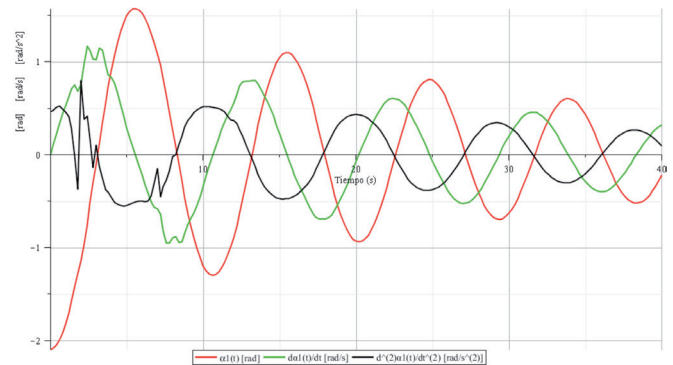


Fig. 4: Comportamiento cinemático del sistema brazo-góndola durante los primeros 40 segundos. Rojo: Ángulo respecto a la posición de reposo [rad]. Verde: velocidad angular [s⁻¹]. Negro: Aceleración angular [s⁻²].

pasa de dos grados de libertad a un grado de libertad. Es decir, el sistema brazo-góndola parte desde su posición inicial antes de iniciar el movimiento por los efectos de la gravedad como un sistema con dos grados de libertad, no obstante, cuando pasa por el punto más bajo, se produce un acoplamiento mecánico entre ambos elementos el cual se representa tal y como se observa en la Fig. (4) introduciendo un par viscoso para modelizar este acoplamiento. Este acoplamiento tiene el efecto de llevar a un sistema controlado, ya que en principio el sistema de dos grados de libertad propuesto es de hecho un "péndulo doble" que es un sistema caótico que tiene una dependencia sensible de las condiciones iniciales y por tanto impredecibilidad [3].

A partir del estudio cinemático se ha hecho un análisis dinámico que permite calcular las fuerzas en la base de sujeción para cada instante de tiempo. Sabiendo que la base del Péndulo está unida al suelo mediante una zapata, a partir de las fuerzas en la base, la ecuación de Navier para distribución de axiles en grupos de pilotes verticales, véase la Ec. (2), permite determinar los esfuerzos que absorben cada uno de los pernos distribuidos en la base en contacto con el suelo tal y como se observa en la Fig. (5).

$$P_i = \frac{N_T}{n} - \frac{M_x z_i}{\hat{I}_x} + \frac{M_z x_i}{\hat{I}_z} = \frac{N_T}{n} - M_x \frac{z_i}{\sum_{i=1}^n z_i^2} + M_z \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

Donde:

- N_T : Esfuerzo axial total [kN].
- M_x, M_z : Momento alrededor de los ejes X y Z respectivamente [kN·m]. Véase el sistema de coordenadas adoptado en la Fig. (5).
- $\hat{I}_x, \hat{I}_z$: Segundo momento de área asociado a los pernos según los ejes X y Z respectivamente [m²].
- x_i y z_i : Coordenadas del centro de cada uno de los pernos respecto al centro de gravedad [m].
- P_i : Esfuerzo axial que absorbe cada perno [kN].
- n : Número total de pernos.

Una vez determinados todos los esfuerzos que recibe cada uno de los pernos debido a las fuerzas que actúan sobre

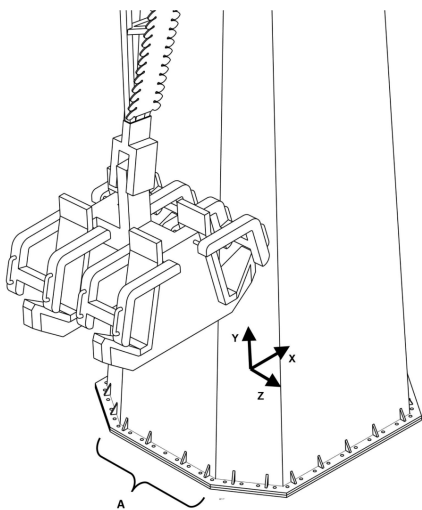


Fig. 5: Distribución de los pernos alrededor de la base en contacto con el suelo. Toda la hilera A, hace referencia a los pernos que habrían fallado a los 3,70 años, aproximadamente sobre el mes de Abril de 2010.

la atracción (fuerzas de inercia y peso propio de la estructura), se tiene en cuenta la rigidez de los elementos en la unión de los pernos, es decir, se hace uso de un ángulo de 30 grados para el tronco de cono que propone Mischke [4], que es una generalización del método del cono de presión de Rotscher con la finalidad de obtener el esfuerzo que absorben los pernos. Haciendo uso de este método, se determina que los per-

nos absorben un 15% de la fuerza exterior. Con este esfuerzo determinado, se realiza un análisis de fatiga de los mismos haciendo uso del criterio de fallo de Gerber [5]. La duración de vida a fatiga obtenida con ese método es determinante ya que se trata de un caso de comprobación y no de diseño (donde pueden ser aplicados otros métodos más simplificados sin que importe que el grado de ajuste sea tan importante). En este análisis de fatiga, aparte del criterio de fallo citado, se ha hecho uso del *diagrama de Wöhler* así como la *regla de Palmgren-Miner* en la cual se contempla el daño por fatiga acumulado debido a que las tensiones que reciben cada uno de los pernos son variantes con el tiempo.

Con este análisis de fatiga, se determina finalmente, la duración en ciclos de todos y cada uno de los pernos. A partir del número de ciclos por cada puesta en marcha y el tiempo de uso diario se ha calculado que el número de ciclos por año es de 237 mil. Para ello se consultó el promedio de uso por año que del propio parque de atracciones se declaraba durante los cuatro años en que la atracción estuvo en uso [9].

Para el siguiente análisis se han usado pernos de métrica M30 (determinados de la reconstrucción geométrica), una calidad del acero ISO 8.8 que es la mínima recomendada para uniones pretensadas y una rosca laminada por ser la elección de diseño más probable. Además, se ha supuesto una precarga del 90% de la fuerza de prueba (F_p) ya que es la recomendada [6] para uniones fijas y una segunda hipótesis, con precarga del 110 % del límite elástico que se recomienda en algunas prácticas con la finalidad de que el sistema tuerca-perno plastifique ligeramente para obtener un

Casos de tipo S. Supervivencia del anclaje. Caso sin la presencia de un excesivo par de apriete ni presencia de corrosión					
	σ_{precarga} (MPa)	σ_f (MPa)	$\sigma_{\text{precarga}}/\sigma_u \cdot 100$	Par de apriete (N·m)	Duración (años)
S1. Supervivencia con una precarga del 90% del límite de proporcionalidad, es decir la recomendada	540	129	65	1818	Infinita
S2. Supervivencia con una precarga del 90% del límite elástico	594	129	72	1999	Infinita
S3. Supervivencia con una precarga del 110% del límite elástico	726	129	87	2444	Infinita
Casos de tipo F. Falla del anclaje por par apriete excesivo y/o corrosión					
	σ_{precarga} (MPa)	σ_f (MPa)	$\sigma_{\text{precarga}}/\sigma_u \cdot 100$	Par de apriete (N·m)	Duración (años)
F1. Falla producida únicamente por un exceso en la precarga de un 129 % del límite de proporcionalidad o lo que es lo mismo 117% del límite elástico	780	129	94	2598	4
F2. Falla producida únicamente por la presencia de corrosión con $k_g=0,077$ y una precarga del 90% del límite de proporcionalidad	540	10	65	1818	4
F3. Falla producida por la combinación de una precarga del 110% del límite elástico y la presencia de corrosión con $k_g=0,36$	726	46	87	2444	4

Tabla 1: Tabla resumen en la que se indican las hipótesis que pudieran dar lugar al colapso de la atracción para la consideración de la base totalmente perpendicular al suelo

mayor abrazamiento entre ambos evitando que con el tiempo se afloje la unión. En el análisis de fatiga realizado se ha tenido en cuenta también la influencia de la corrosión sobre su duración de vida tal y como posteriormente se discutirá su influencia o no sobre el sistema analizado. Se asume que los pernos empleados siguen la normativa DIN 976.

3. RESULTADOS

Con la reconstrucción geométrica y el modelo cinemático anterior se han considerado diversas hipótesis de cálculo en función de cómo afectan a los pernos de sujeción de la base. Las hipótesis de tipo S como se verá posteriormente, conducen a la supervivencia indefinida de la estructura, mientras que las hipótesis de tipo F conducen a un fallo mecánico o colapso estructural:

- **S1.** Precarga teórica recomendada (90% del límite de proporcionalidad de los pernos) y sin corrosión.
- **S2.** Precarga ligeramente superior a la teórica recomendada (90% del límite elástico) y sin corrosión.
- **S3.** Precarga recomendada en la práctica (110% del límite elástico de los pernos) y sin corrosión.
- **F1.** Precarga superior a la recomendada (117% del límite elástico) sin presencia de corrosión.
- **F2.** Precarga teórica recomendada y presencia de corrosión importante.
- **F3.** Precarga recomendada en la práctica (110% del límite elástico) y corrosión moderada.

Los resultados para cada una de las seis hipótesis se indican en la Tabla 1. Para los casos S1 a S3 los resultados indican que:

- Si los pernos se hubiesen precargado con una precarga perteneciente a un 90% del límite de proporcionalidad, es decir, la precarga teórica recomendada, no se hubiera producido jamás el colapso de la atracción.
- Si los pernos, en lugar de haber sido precargados un poco por encima de lo recomendado teóricamente con un 90% del límite de proporcionalidad, hubiesen sido precargados con un 110% del límite elástico (esto último de hecho es lo recomendado en la práctica), el anclaje tampoco hubiese fallado.

Dado que en ninguno de los dos casos anteriores habría habido colapso, se hace necesario considerar otras hipótesis adicionales (casos F1a F3) que tengan en cuenta factores como un par de apriete aún mayor o la

presencia de corrosión. Ya que en los anclajes presentaban síntomas de corrosión y, además, en la práctica los pernos se precargan aproximadamente un 110% del límite elástico (con la finalidad de obtener una plastificación de los mismos y de esta forma obtener un mayor abrazamiento entre la rosca de los pernos y las tuercas).

A continuación se presentan otras hipótesis (F1 y F2) adicionales:

- En el caso en que únicamente se hubiese presentado un exceso en la precarga de los pernos, esta debía de ser de un 129% del límite de proporcionalidad o lo que es lo mismo el 117% del límite elástico para que el anclaje tuviera una duración de 4 años.
- Si el fallo únicamente hubiese sido debido a la presencia de corrosión, habiéndose precargado los pernos tal y como se recomienda teóricamente, es decir, al 90% del límite de proporcionalidad y sabiendo que el anclaje no tuvo una duración de vida infinita sino de 4 años, el límite de resistencia a fatiga se redujo de 129 MPa a 10 MPa por efectos de la corrosión. Es decir, se produjo un factor de reducción de efectos varios en el límite de resistencia a fatiga de $k_f=0,077$ estando la atracción en pie durante un periodo de 4 años.

Como en las hipótesis precedentes la presencia de corrosión y un exceso en la precarga se han considerado por separado, es natural considerar ambos factores simultáneamente. Además tanto F1 como F2 llevan alguno de los dos factores posibles (exceso de precarga, corrosión) a valores anormalmente grandes. La hipótesis (F3) considerada más probable y también más realista involucra la presencia simultáneamente de la precarga recomendada en la práctica, es decir, la que se pudo dar y la presencia de corrosión moderada, para esta hipótesis se tiene:

- El fallo del anclaje se habría producido debido a una combinación de un par de apriete superior al recomendado teóricamente, es decir de un 110% del límite elástico en lugar del 90% del límite de proporcionali-

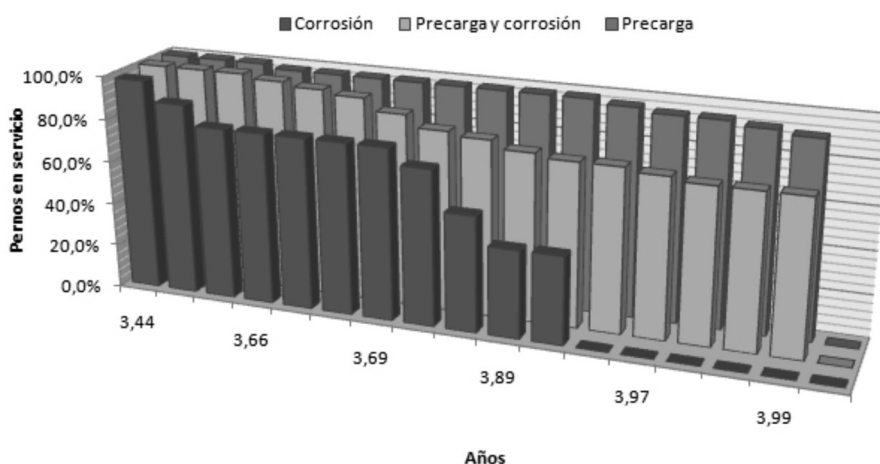


Fig. 6: La figura muestra cómo decrece el número de pernos no dañados a lo largo del tiempo, para cada una de las hipótesis de fallo consideradas. En el último escalón se produce siempre una caída abrupta, porque al fallar un número suficiente de pernos los que quedan superan el límite de fluencia estática y no es posible mantener el equilibrio.

dad junto con la presencia de corrosión. En este caso, sabiendo que el anclaje no tiene una duración de vida infinita sino de 4 años, el límite de resistencia a fatiga se redujo de 129 MPa a 46 MPa por lo que se obtiene un factor de reducción de efectos varios en el límite de resistencia a fatiga debido a la corrosión de $k_g = 0,36$ estando la atracción en pie durante un periodo de 4 años.

Aquí únicamente se exponen en detalle las consideraciones para la hipótesis de que la base se encuentra totalmente perpendicular al suelo, dado que los resultados son muy similares a los de la hipótesis de la base inclinada un grado con respecto al suelo. La revisión de la empresa certificadora se realizó a los 3,90 años (el colapso se produjo a los 4 años), además, en el análisis de fatiga realizado, se observa que en la hipótesis más probable (F3), es decir, aquella en la que se produce la combinación de una precarga del 110% del límite elástico y la presencia de corrosión, toda una hilera de pernos la hilera A, véase la Fig. (5), habría fallado a los 3,70 años, por tanto, bajo las hipótesis expuestas en el momento de la última revisión, todos estos pernos ya habrían fallado. Al parecer no se detectaron posibles anomalías en al menos 9 pernos.

Todas las consideraciones que se han realizado en relación a los efectos de fatiga en combinación con la corrosión se basan en la conjetura que los pernos que se utilizaron en El Péndulo, no tenían un recubrimiento adecuado que los protegiera de manera efectiva contra la corrosión.

4. DISCUSIÓN

Todos los parámetros son fruto de la geometría reconstruida de *El Péndulo* y el modelo cinemático detallado. Los resultados obtenidos están sujetos a las hipótesis tomadas en consideración, véase la Fig. 3. La adecuación entre la reconstrucción y la atracción real se refleja en el período calculado y medido, resumidos en la Tabla 2: según el catálogo de la empresa fabricante, el sistema brazo-góndola alcanza su velocidad máxima de 100 km/h a los 2,8 segundos. En los modelos reconstruidos, el tiempo calculado es de 3,1 segundos obteniendo un error de tan sólo 3 décimas de segundo. Este error se debe a que las distribuciones de masas e inercias de la geometría reconstruida no serían exactamente idénticas a

las reales, sin embargo, esta pequeña discrepancia no parece ser crítica para el cálculo de los pernos. Otro dato adicional es que según el catálogo del modelo *Air Diver*, este tiene una masa total de 40 toneladas, las cuales se corresponden con el modelo realizado.

En todos los casos o hipótesis con presencia de corrosión, se conjetura que los pernos carecían de un galvanizado adecuado. Esta conjetura se fundamenta en el gráfico de la Fig. 7, propuesto por la *American Galvanizers Association*, que da una aproximación general del comportamiento de un recubrimiento de galvanizado [7]. Utilizando un diagrama general como el mostrado en la figura y sabiendo que el espesor del galvanizado debería de haber sido como mínimo localmente de al menos 45 μm según la normativa ISO 1461 [8]. A partir de ese espesor, se estima una duración de 47 años para el recubrimiento galvanizado, notablemente más elevada que la del El Péndulo del Parque de Atracciones Tibidabo (4 años), que presentaba oxidación en los pernos. Esto apoya que los pernos carecían de un recubrimiento de galvanizado adecuado, cosa que junto con la fatiga de materiales fue la causa del colapso. El gráfico de la Fig. 7 muestra estimaciones estadísticas, y podrían existir algunas desviaciones menores debido a la aleatoriedad que presenta el efecto de la corrosión en diferentes localizaciones (pero no es razonable asumir que esas desviaciones pudieran reducir los 47 años a sólo 4).

Los resultados obtenidos para los tiempos de fallo sugeridos por la Fig. 7 son incompatibles con la posibilidad de que se hubieran usado pernos con un recubrimiento anticorrosivo adecuado. Si los pernos hubieran sido adecuadamente definidos y especificados, y la precarga que se les aplicó hubiera sido correcta no se habría producido el colapso de la atracción y ésta probablemente todavía estaría en servicio tal y como se infiere en la Tabla 1 en forma de resumen (hipótesis S1, S2 y S3).

En dos de las hipótesis examinadas (F2 y F3), se tiene que en el momento de la inspección alrededor de un mes antes del colapso ya habrían fallado algunos pernos por fatiga. La duración a fatiga de la primera hilera de pernos que falló se sitúa en torno a 3,70 años, es decir, aproximadamente sobre el mes de Abril de 2010, dos meses antes de la revisión y tres meses antes del colapso. Tal vez una inspección más exhaustiva podría haber revelado que toda una hilera de pernos ya había fallado evitando el colapso de la atracción.

Modelo de cálculo	Grados de libertad		Rozamiento con el aire		Hipótesis		t (s)	$\frac{t_{\text{calculado}}}{t_{\text{Fabric}}}$
	1 GDL	2 GDL	Con rozamiento	Sin rozamiento	Base perpendicular al suelo	Base inclinada		
Grandes oscilaciones							3,1	1,11
							3,1	1,11
Datos del fabricante							2,8	

Tabla 2: Tiempos en los cuales el sistema brazo-góndola alcanza la máxima velocidad.

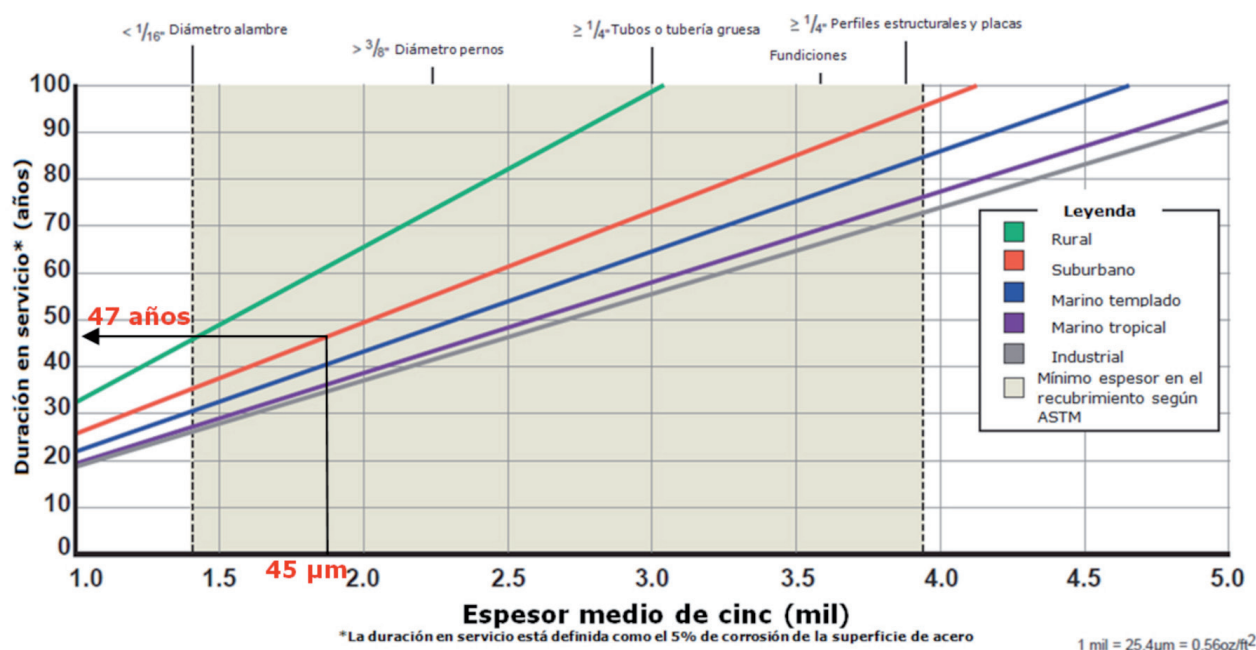


Fig. 7: Duración en servicio del galvanizado según la agresividad del ambiente [7]

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha evidenciado la peligrosidad que se presenta cuando se combina la fatiga con la corrosión. El accidente se habría producido por una secuencia de errores (como había apuntado el informe del *Ayuntamiento de Barcelona*): los cálculos inicialmente se referían a una base móvil. Tras esta modificación y sabiendo que el fabricante no dio información específica sobre los pernos, el instalador escogería colocar unos que no tenían la protección galvánica adecuada y/ o proporcionando un par de apriete no admisible ocasionando un fallo a fatiga imprevisto teniendo en cuenta que el diseño inicial del anclaje resulta ser adecuado (ver hipótesis S1, S2 y S3). Por ello, toda empresa comercializadora o instaladora de este tipo de atracciones debería de asegurarse que las mismas están debidamente protegidas contra medios corrosivos y que las uniones o fijaciones se han hecho correctamente. En la atracción examinada, el par de apriete y la protección galvánica de los pernos han tenido un efecto determinante en la duración de los pernos frente a fatiga. Los cálculos también sugieren que muy probablemente cuando se realizó la última inspección ya existirían pernos que habían fallado a fatiga (aunque no en el supuesto F1).

El análisis realizado aporta elementos de juicio basados en los resultados numéricos que confirman que la corrosión fue clave, y apoyan lo sugerido por el informe del COEIC sobre un fallo por fatiga en la base posiblemente debido a una falta de definición de la calidad y características de los pernos. Los cálculos numéricos sugieren descartar la posible inclinación del fuste (por sí misma no lleva al colapso) y corrobora las conclusiones preliminares del COEIC.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martins DAM, Silveira-Neto A, Steffen Jr V. A pendulum-based model for fluid structure. Interaction analyses. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*. 2007 Vol. 6, nº 02, p. 76-83.
- [2] Press WH, Flannery BP, Teukolsky SA, et al. "Section 17.1 Runge-Kutta Method", *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing* (3ª ed.), Cambridge University Press: 2007. ISBN 978-0-521-88068-8.
- [3] Moauro V, Negrini P: "Chaotic trajectories of a double mathematical pendulum", *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1998:62(5) p. 827-830. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8928\(98\)00106-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8928(98)00106-3)
- [4] Lehnhoff TF, Kwang IK, McKay ML: "Member stiffness and contact pressure distribution of bolted joints". *Journal of Mechanical Design*. 1994 Vol 116, p.550-557. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2919413>
- [5] Budynas RG, Keith NJ. *Diseño en ingeniería mecánica* de Shigley. Miguel Ángel Ríos Sánchez (revisión técnica). 8ª edición. Mexico: McGraw-Hill, 2008. 1059p. ISBN: 978-970-10-6404-7
- [6] DIN. Systematic calculation of high duty bolted joints with one cylindrical bolt. VDI2230. 2003.
- [7] American Galvanizers Association. "Service Life Chart for Hot-Dip Galvanized Coatings".
- [8] British Business Group Dubai & Northern Emirates Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles. Specification and test methods. ISO 1461. Dubai, United Arab Emirates, 1999.
- [9] Horaris. Parc d'Atraccions Tibidabo. <http://www.tibidabo.cat/ca/horaris>, último acceso Julio 30, 2012.