INSTRUMENTACIÓN DEL VIADUCTO SOBRE EL RÍO ULLA

José Andrés DEL VALLE PÉREZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Torroja Ingeniería SL
Jefe de Proyectos
javalle@torroja.es

Vicente PUCHOL DE CÉLIS
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Kinesia Ingeniería
Director
kinesia@ciccp.es

César AJA CHAO
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
TECSA
Jefe de Producción
cajac@tecsa.es

Luis PESET GONZÁLEZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Dirección Técnica DRAGADOS SA
Jefe de Departamento
lpesetg@dragados.com

RESUMEN

El control de ejecución del viaducto sobre el río Ulla ha contado con una eficaz monitorización de esfuerzos y deformaciones en sus principales elementos para verificar en tiempo real las magnitudes previstas. También se contó con un seguimiento preciso de la geometría durante la obra. Se elaboró un “Manual de Ejecución” que detallaba el proceso de ejecución y de control. El Sistema de Adquisición de Datos era capaz para leer 180 sensores: células de carga, bandas extensométricas en tirantes, extensómetros de barra, clinómetros, apoyos, anemómetro, veleta y sondas térmicas, algunos útiles además para gestionar la estructura en servicio y otros durante los primeros años de uso del viaducto. Para el control topográfico robotizado se instalaron prismas ópticos en numerosos puntos. La serie histórica de datos obtenidos por ambos sistemas mantuvo en todo momento acceso remoto vía Internet, con visualización gráfica evolutiva de cada dato.

PALABRAS CLAVE: Sensores, monitorización, tirantes, robotizado, extensómetro, célula, prisma óptico, clinómetro, instrumentación dinámica, interacción.

1. Introducción

Para controlar la ejecución de una estructura evolutiva como el viaducto del Ulla, con esquema estático cambiante en las diversas fases de su construcción atirantada, es importante contar con la ayuda de una monitorización suficiente de esfuerzos y deformaciones en sus elementos principales, datos que permiten constatar en tiempo real las magnitudes previstas en la fase de cálculo y anticipar posibles problemas. El seguimiento preciso de la geometría durante la obra es por otra parte fundamental en casos como este en que las leyes de esfuerzos son muy sensibles a variaciones accidentales de la directriz de la estructura. Antes del comienzo de las obras se elaboró un “Manual de Ejecución” para detallar el proceso y los mecanismos de control. Para verificar en cada instante el cumplimiento de las previsiones se monitorizó la estructura y se dispuso un sistema robotizado para el seguimiento topográfico de precisión del tramo principal.

2. Manual de Control

Para el éxito y la eficacia del control ha sido importante disponer, previamente a la ejecución de las obras, de un documento que contuviera, mediante un formato útil, toda la información precisa de la estructura. Esta información fue recopilada tanto del propio proyecto: planos y memoria de

cálculo, como del Plan de Ejecución así como de los manuales y sistemas de uso de los principales Medios Auxiliares previstos en las obras. Para diseñar y establecer los procedimientos de control y para conseguir una eficaz coordinación de los mismos fue fundamental que el proceso de ejecución estuviese suficientemente definido antes del inicio de las obras. De este modo han podido verificarse los las previsiones en cada una de las fases de construcción.

El Manual elaborado para el control del viaducto contenía, para cada etapa, de una forma clara y sucinta, los esfuerzos calculados en cada sección significativa del viaducto: arranques y secciones representativas del arco, bases de pilastras y pilas etc. así como las deformaciones previstas en arco, pilastras, pilas y tablero y por tanto también la posición teórica de todos los frentes de dovela del arco, de cada fase de tablero y de cada trepa de pilas y pilastras. De este modo ha sido cómoda la verificación en cada fase de obra tanto de los esfuerzos como de la geometría conseguida y por tanto la adopción de estrategias adecuadas para contrarrestar las desviaciones constatadas, bien por efectos térmicos imposibles de predecir en el proyecto o bien por diferencias de comportamiento de cualquier tipo.

Como es inevitable asumir modificaciones del Plan de Ejecución durante la realización de las obras, ha sido objeto de especial cuidado el mantener absolutamente actualizado el manual de Ejecución. Para ello se han elaborado sucesivas versiones del mismo, hasta 8 en total, previas a la adopción de cualquier cambio.

3. Monitorización de la estructura

El primer mecanismo de control ha sido la instrumentación mediante sensores de todos aquellos parámetros cuyo conocimiento en tiempo real ha sido considerado útil para los fines perseguidos.

En el Manual de Ejecución de la estructura se establecieron diversas señales de alerta, en función de las lecturas en cada instante de los sensores de la monitorización, de forma que diferencias significativas entre las previsiones efectuadas y las lecturas obtenidas fueran analizadas con la urgencia adecuada al caso.

Se ha contado con un Sistema de Adquisición de Datos (S.A.D.) inicialmente dimensionado para 120 canales diferentes, y después ampliado a 180, para un número igual de sensores de diversos tipos. La lectura de los datos aportados por algunos de estos sensores van a ser importantes también para la gestión de la estructura en servicio. Para el control de la ejecución destacan los siguientes:

3.1. Células de carga en tirantes y bandas extensométricas

La finalidad de estos sensores ha sido verificar en cada instante la carga total en cada uno de los tirantes. Se contrasta en cada fase de tesado con las lecturas de los gatos. Se han instalado siempre en los anclajes pasivos de los tirantes para poder conocer la carga incluso durante las fases que incluyen el tesado o destesado del propio tirante instrumentado. Las células de carga indican directamente la carga total. Siendo este un parámetro cuyo conocimiento se consideraba vital, se decidió obtener información redundante para disponer de confirmación del mismo. De este modo se instalaron bandas extensométricas en algunas de las barras activas que permiten el anclaje de cada tirante en el arco.



Figura 1. Célula de carga en anclaje pasivo.

3.2. Extensómetros de barra embebidos en hormigón

Se han instrumentado varias secciones especialmente representativas del estado de esfuerzos de la estructura, colocando en cada una de ellas seis extensómetros de barra. Cada uno de estos sensores permite como es sabido conocer la deformación acumulada en cada momento desde un instante inicial en el punto en que se encuentra instalado. Es posible por tanto la integración del plano de deformaciones de la sección y, a partir del mismo, conocer aproximadamente los esfuerzos globales axiles y flectores sobre la misma. Han sido objeto de este seguimiento las dos secciones de arranque de arco, las bases de las pilas principales P5 y P11 y las secciones de empotramiento en el arco de todas las pilastras.

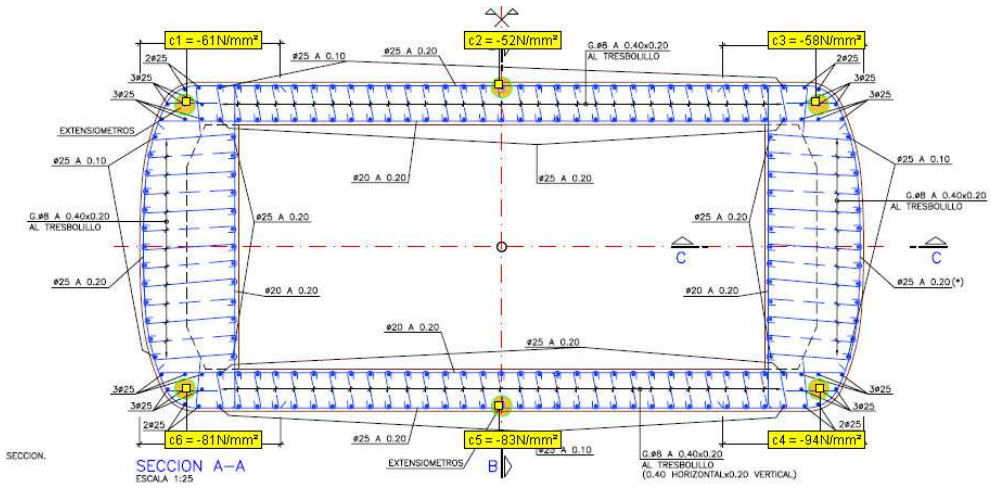


Figura 2. Instrumentación con extensómetros de barra de una de las secciones de arranque del arco.

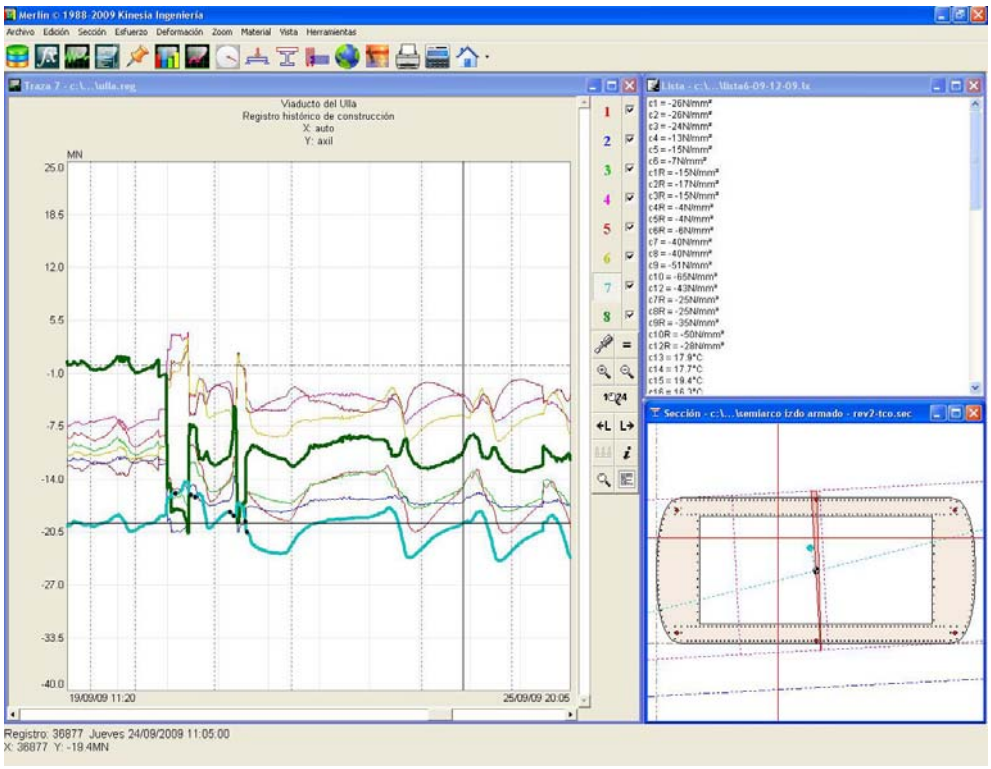


Figura 3. Registro de estados de flexocompresión de una sección instrumentada.

3.3. Clinómetros

Estos elementos son complementarios del control geométrico directo de la estructura. Permiten conocer las pendientes longitudinales en base y coronación de cada una de las pilastras, para comprobar la verticalidad de las mismas durante su ejecución. También se han instalado clinómetros para vigilar el comportamiento de la estructura durante la obra frente a acciones transversales, especialmente las relativas a la acción del viento. Así, en cabeza de las pilas principales y en cinco puntos del arco, se dispusieron clinómetros para conocer posibles desviaciones geométricas fuera del plano de la estructura.

3.4. Topes instrumentados en estribos

Ya se ha mencionado que el propio tablero constituye, durante la construcción de los semiarcos, el tirante principal de los mismos, trasmitiendo a los estribos esta tracción. Para conocer en cada momento su valor, se han instalado dos topes instrumentados entre cada estribo y el tablero, con apoyos tipo POT, de 11.800 KN de capacidad cada uno de los del estribo E1 y de 18.600 KN los del estribo E2. La lectura en cada instante de las presiones ejercidas por el tablero contra los estribos, como diferencia de un tesado de cosido inicial y conocido y la tracción generada por el atirantamiento, constituye una de las principales fuentes de verificación del proceso.



Figura 4. Apoyo POT instrumentado en estribo sur.

3.5. Anemómetros y sondas térmicas

Constituyen las sondas térmicas elementos auxiliares importantes a las medidas de deformaciones en el hormigón, para eliminar sumandos térmicos de los esfuerzos. El anemómetro ha sido útil para confirmar situaciones especiales de viento manifestadas en lecturas de clinómetros transversales, así como para ajustar la toma de decisiones operativas respecto a precauciones a adoptar en operaciones de hormigonado, de avance de carros, de actuaciones con los tirantes, etc.

4. Seguimiento topográfico

El control topográfico de precisión, robotizado, con lectura a intervalos regulares del orden de 60 minutos, ha constituido una ayuda fundamental para el control de la estructura. Permite la comparación de las deformaciones obtenidas en cada instante con las teóricas deducidas del modelo de cálculo. Se ha contado con una precisión mínima de ±10 mm en X o en Z. En los puntos seleccionados para su seguimiento topográfico, se han dispuesto prismas ópticos. Todas las dovelas de los semiarcos, así como varias secciones de las pilas principales y de las pilastras, han sido objeto de este control. La estación total se instaló sobre el cercano viaducto de Gundián.

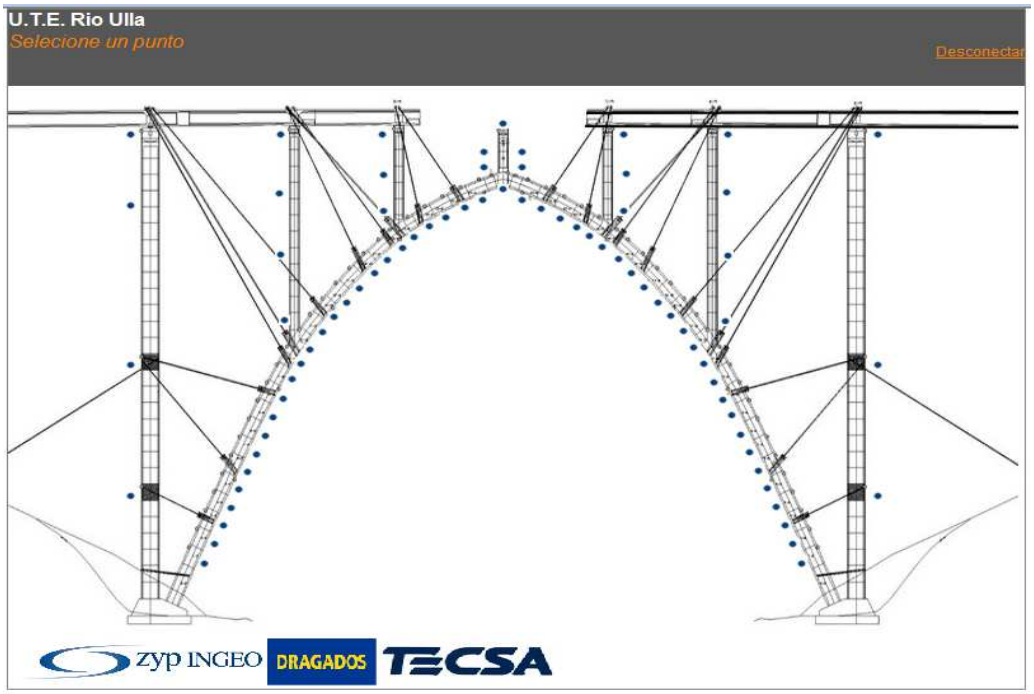


Figura 5. Esquema de control del sistema de seguimiento topográfico robotizado.

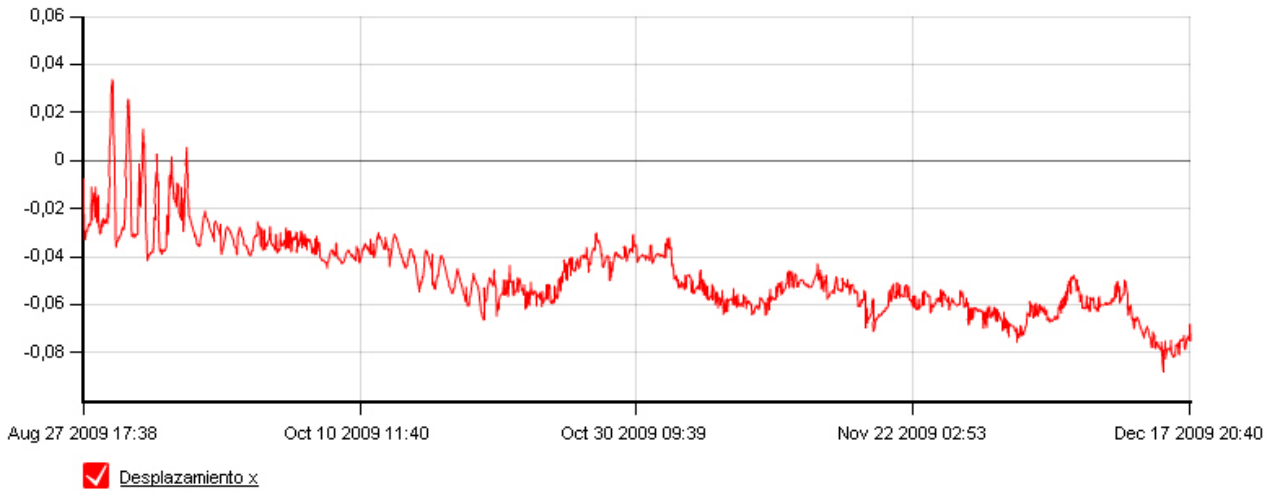


Figura 6. Registro histórico tipo del sistema de seguimiento topográfico robotizado.

El control de los alargamientos producidos en las operaciones de tesado de los tirantes, y su comparación con los alargamientos teóricos deducidos en el cálculo, ha sido complementario al de las deformaciones de la estructura. Como es sabido, al tratarse de tirantes, los alargamientos son la suma de dos valores. Por un lado el propio de la elongación producida por la aplicación de una tensión a un cable o barra, y por otro el producido por las deformaciones de los elementos de la estructura entre los que se establece la tracción del cable. El segundo sumando es precisamente el que gobierna las deformaciones de la estructura en cada fase de ajuste de tensión en los tirantes.

5. Seguimiento de la monitorización en servicio

Habida cuenta de la utilidad de la información obtenida durante la construcción con la monitorización del viaducto, se ha expuesto al ADIF la posibilidad de mantener el seguimiento al menos de parte de los sensores estáticos durante los primeros años de vida de la estructura para continuar el análisis fundamentalmente de los fenómenos térmicos y reológicos, enriqueciendo la instrumentación con sensores dinámicos que permitan estudiar en detalle el comportamiento dinámico del viaducto frente a fenómenos de viento y frente a las sobrecargas ferroviarias –acelerómetros, anemómetros y veletas, extensómetros dinámicos en tablero y lectura dinámica en topes frontales-. El Administrador de Infraestructuras Ferroviarias se ha mostrado muy receptivo a la propuesta, aceptando la instalación de los sensores adicionales propuestos y su seguimiento y explotación al menos durante tres años.

5.1. Objetivos del seguimiento:

Obtener resultados de la respuesta del Viaducto durante los primeros años de su puesta en servicio para garantizar una mejor gestión del Viaducto de cara a su durabilidad y operatividad en circunstancias climatológicas extremas y para acumular datos útiles que permitirán contrastes de cargas y acciones reales y previstas y las consecuentes optimizaciones en futuras revisiones normativas. Dentro de este marco, se citan como objetivos concretos destacados los siguientes:

- Caracterización dinámica durante las pruebas de carga del Viaducto
- Análisis dinámico en paso de trenes y frente a viento.
- Análisis de reología en arco y pilastras
- Control térmico y reológico del tablero
- Seguimiento geométrico arco y pilastras
- Seguimiento del comportamiento del punto fijo del viaducto. Control de frenado y esfuerzos horizontales pilas.
- Caracterización de las acciones de viento durante el servicio de la estructura

5.2. Alcance de la instrumentación propuesta:

La instrumentación en servicio será de dos tipos: estática y dinámica.

La instrumentación estática se basa en el aprovechamiento de sensores ya instalados para la obtención de datos durante la construcción. Esto requiere su reconexión con el nuevo punto de instalación del Sistema de Adquisición de Datos. Se ha propuesto para este capítulo ceñir el volumen de sensores estáticos a los que permite una maleta de 60 canales.

La instrumentación dinámica consiste en la disposición de sensores que medirán ráfagas de viento y variables específicas de aceleración y deformación con frecuencias de 50 a 100Hz. El sistema dinámico funcionará mediante registros por evento, es decir, estará siempre alerta pero sólo comenzaría a registrar cuando una de las magnitudes a medir supere un umbral determinado. Este umbral puede ser reajustado por control remoto. El volumen global de sensores de este tipo será igual o inferior a los que pueden ser conectados a una maleta dinámica de 30 canales. Entre estos sensores destacan los acelerómetros que permitirán comprobar los modos de vibración de la estructura y los anemómetros que caracterizarán las ráfagas de viento dominantes por encima

de los umbrales que se establezcan. Será también muy interesante la lectura con las frecuencias propuestas de galgas extensométricas de armadura dispuestas en tablero para correlacionar tensiones dinámicas reales con las previstas para el paso de los convoyes.

El seguimiento de la instrumentación y la explotación de los datos obtenidos se llevará a cabo durante al menos 3 años desde la puesta en servicio de la línea ferroviaria.

6. Análisis de la interacción vía-tablero

Otro capítulo interesante en estudio para su monitorización durante los primeros años de servicio del viaducto es el tema de la interacción vía-tablero. Se encuentra a nivel de propuesta de I+D+i. Para el análisis de este fenómeno es indispensable la colocación de bandas extensométricas en los carriles en una serie de secciones tanto del viaducto como de su zona externa adyacente, tanto tras el estribo sur, donde se encontrará el aparato de dilatación de vía, como tras el estribo norte, que corresponde al punto fijo del tablero. El objetivo general se refiere al análisis de los esfuerzos producidos por las diferencias térmicas entre el tablero y la vía así como por la reología del tablero. Se pretende la comprobación de los parámetros normativos de la IAPF relativos a la transmisión de cargas horizontales entre los carriles y el tablero, la cuantificación de los esfuerzos transmitidos a través de las traviesas y el balasto para diferencias térmicas conocidas, la verificación de las longitudes desde el aparato de dilatación en que se produce desplazamiento de los carriles respecto al tablero, la investigación de las diferencias térmicas reales entre los carriles y el tablero y, en resumen, el comportamiento del fenómeno de la interacción a lo largo del viaducto y en los accesos al mismo.

7. Participantes

- NOMBRE DE LA OBRA:

  Proyecto Constructivo de Plataforma. Corredor Norte Noroeste de Alta Velocidad. Tramo Lalín-Santiago. Subtramos Silleda (Dornelas)- Vedra y Vedra- Boqueixón.

- PROPIEDAD:

  Ministerio de Fomento. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias ADIF.

- DIRECCIÓN DE OBRA:

  Juan Pablo Villanueva Beltramini (ICCP- Madrid). ADIF

- AUTORES DEL PROYECTO Y ASISTENCIA TÉCNICA A LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

  Torroja Ingeniería SL

  D. José María de Villar Luengo (ICCP- Madrid)

  D. José Andrés del Valle Pérez (ICCP- Madrid)

  D. Ángel Carriazo Lara (ICCP- Madrid)

- EMPRESA CONSTRUCTORA:

  UTE AVE ULLA (Dragados SA-TECSA SA)

- JEFATURA DE OBRA:
  - D. Pedro J. Chico López. (ICCP- Granada). Gerente
  - D. Rafael Molina Trilla (ICCP- Madrid). Gerente hasta abril/2009
  - D. Carlos Rodríguez Fernández (ICCP- La Coruña). Jefe de Obra
  - D. César Aja Chao (ICCP- Santander). Jefe de Producción
- ASISTENCIA TÉCNICA A LA DIRECCIÓN DE OBRA
  - UTE IDOM –Geocontrol con la colaboración de Arenas y Asociados SL
  - D. José María Olaguíbel Álvarez-Valdés. (ICCP- Madrid). Asesor
  - Dña. Berta Ónega Castellano. (ICCP- Alfonso X). Jefa de la AT
- EMPRESA SUBCONTRATISTA DE ESTRUCTURAS:
  - Puentes y Estructuras (Viaductos sobre los ríos Ulla y Saramo)
- TIRANTES, PRETENSADO Y APOYOS :
  - VSL –CTT -Stronghold
- INSTRUMENTACIÓN:
  - Kinesia Ingeniería (Viaducto sobre el río Ulla)
    - D. Vicente Puchol de Célis (ICCP-Madrid)
- SEGUIMIENTO TOPOGRÁFICO ROBOTIZADO:
  - ZyP Ingeniería Geomática SL y Dragados SA
    - Jesús Manuel Sánchez Álvarez (jefe topografía UTE AVE-ULLA)
    - D. Javier Peñafiel de Pedro (ZyP)