



GOBIERNO
DE ESPAÑA

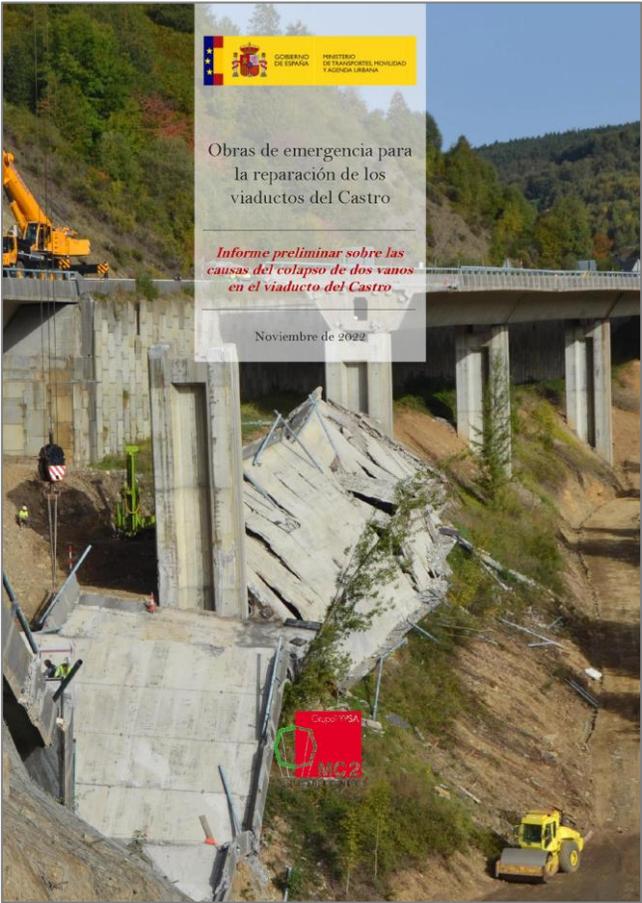
MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VIADUCTO DE EL CASTRO

INFORME

NOVIEMBRE 2022

INFORMES SOBRE LAS CAUSAS DE LOS COLAPSOS



¿Cómo es el viaducto de El Castro?

CARACTERISTICAS GENERALES

Dos viaductos de **gran longitud** con calzadas separadas de **13 vanos** (A Coruña) y **7+2 vanos** (Madrid) de **45m de luz** todos ellos.

Tipología de **vanos isostáticos** con **dovelas prefabricadas** sin armaduras pasivas pasantes, comprimidas **“a hueso”** con postesado exterior.

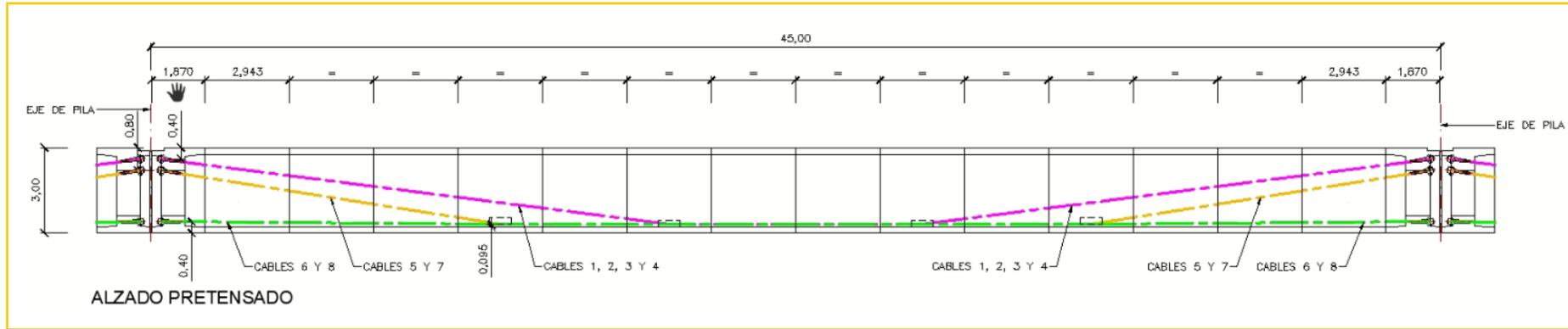
← Madrid

A Coruña →



DATOS PRELIMINARES

El pretensado exterior proyectado consta de **8 cables** en 3 familias diferentes:

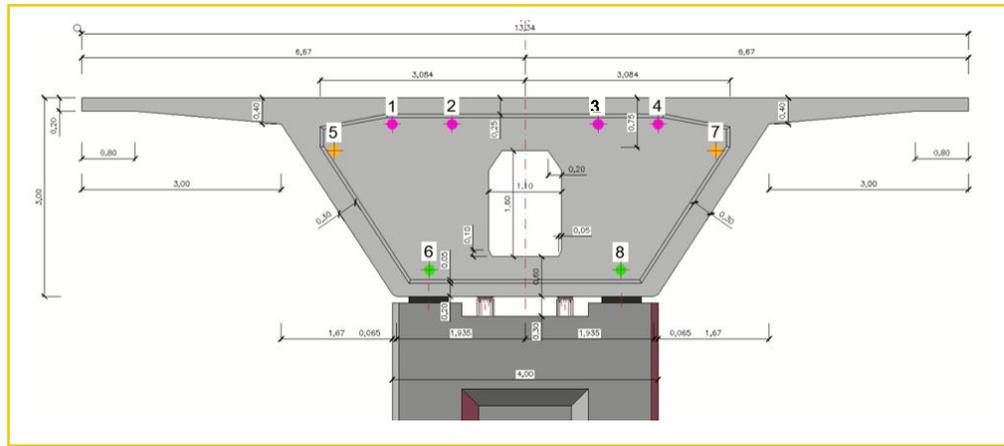


4 cables de **31** unidades de 0,6" anclados bajo la **cara inferior** de losa y con trazado poligonal.

2 cables de **31** unidades de 0,6" anclados en la **esquina superior** de las almas, en su encuentro con la losa y con trazado poligonal.

2 cables de **24** unidades de 0,6" anclados próximos a la **tabla inferior** del cajón y con trazado recto.

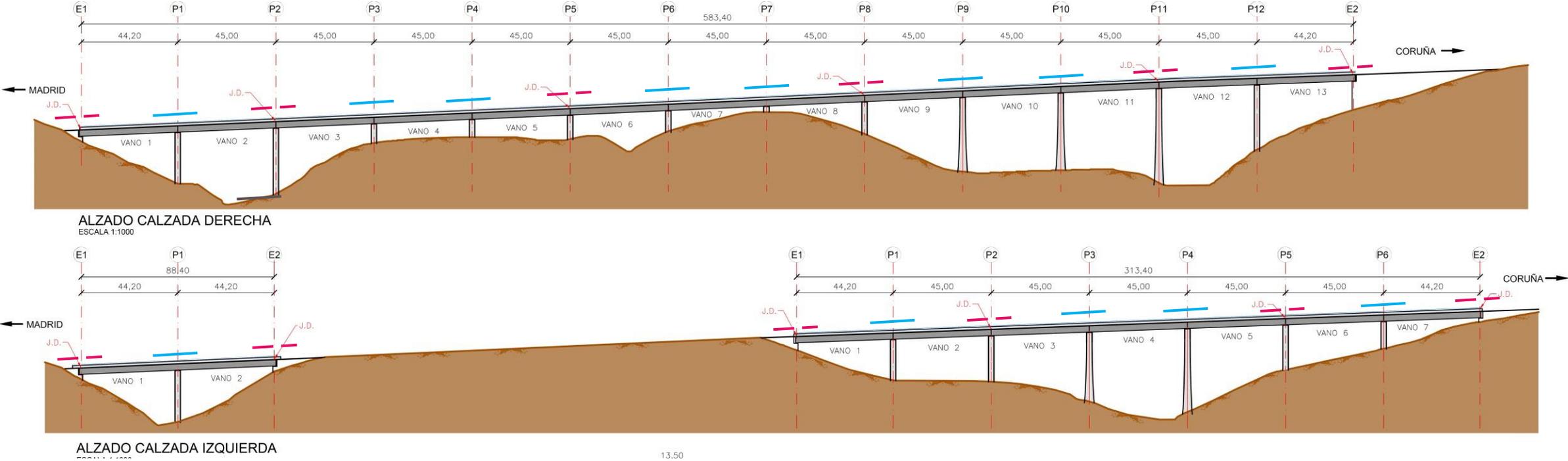
Mamparo



1

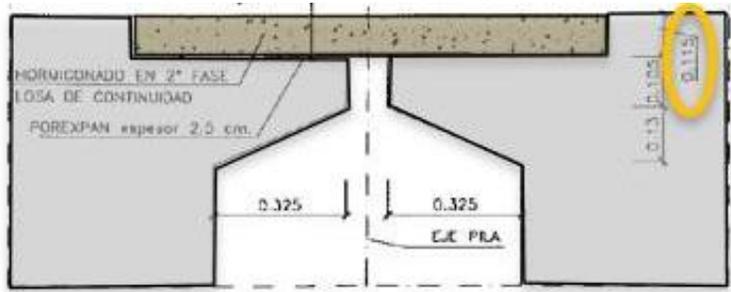
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PUENTE

DISPOSICIÓN DE JUNTAS DE CONTINUIDAD Y DILATACIÓN



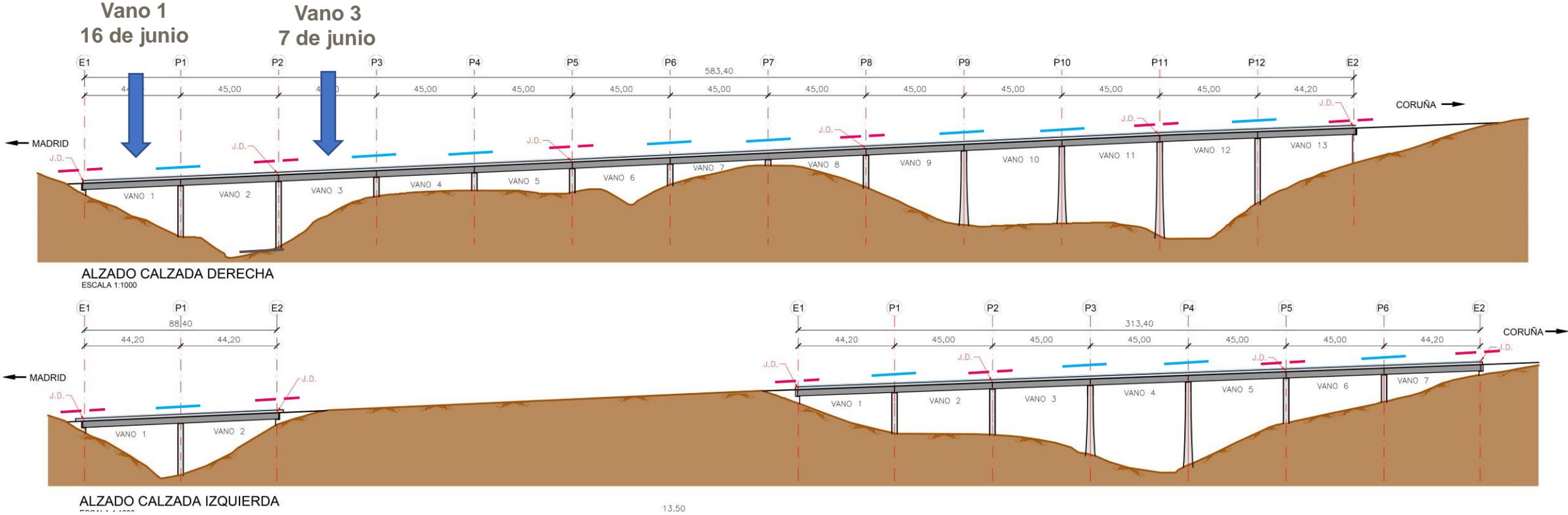
Juntas de dilatación: Permiten las libres dilataciones de la estructura.

Juntas de continuidad: En sustitución de las juntas de dilatación mejorando el confort de la rodadura y permiten el trabajo conjunto de pilas frente a fuerzas horizontales



1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PUENTE

DISPOSICIÓN DE JUNTAS DE CONTINUIDAD Y DILATACIÓN



Tipología desarrollada a nivel **MUNDIAL** a partir de los años 1980, existiendo **realizaciones previas emblemáticas** (Isla de Ré, Francia, Segmental Precast Bridges, USA).

Desarrollada **inicialmente** como **solución de refuerzo de tableros existentes**.

Grandes ventajas constructivas: **calidad**, control de hormigonados, control de plazos, sistema competitivo, etc.



2 ANÁLISIS TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

¿Por qué se estaba actuando?

Se realiza una **inspección especial** a lo largo de los meses de **abril-mayo de 2021** que **puso de manifiesto**:

Fallo del sistema de impermeabilización, con entrada de agua al interior del tablero.
AUSENCIA DE UN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN EFICAZ.

Fallo sistemático de las losas de continuidad, detectándose líneas de **circulación de agua en ambos lados de las losas.**

Daños de carácter durable en paramentos de hormigón interiores y exteriores.

Daños puntuales en algunos aparatos de **apoyo.**

Defectos y claros indicios de intensa y generalizada **corrosión** en el sistema de **pretensado**, incluso **1 cable roto**

El nivel de **deterioro de los cables** suponía un **grave riesgo para la seguridad** de la estructura. El **origen** de esta patología se localizaba en el **fallo de las losas de continuidad** que permitían la **libre entrada y circulación de agua** a las **cabezas de anclaje del pretensado**, justo debajo de ellas.

Viaducto situado en zona de **alta vialidad invernal: uso de sales fundentes**, lo que ha supuesto un **agente multiplicador** de la **degradación de los materiales** (acero y hormigón)

3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE DAÑOS (mayo 2021)

¿Qué se estaba haciendo?

- **Disposición de 2 cables rectos de refuerzo adicionales** para **eliminar incertidumbres** sobre los niveles reales de seguridad durante el tiempo de realización de los trabajos, permitiendo tanto la **explotación transitoria** como la sustitución de los mismos con garantías.
- **Sustitución posterior del 100% de los cables** del pretensado del puente, con la más moderna tecnología de **protección anticorrosión (5 barreras = cable galvanizado + grasa + enfundado individual + lechada + vaina global)**
- **Restitución de losas de continuidad, mejorando el detalle** que había manifestado una reiterada respuesta inadecuada frente a la **entrada de sales**.
- **Nueva impermeabilización** de la plataforma, conforme a estándares actuales y protección de los frentes de mamparos expuestos, especialmente del **sellado de los cajetines de anclaje** del pretensado.
- **Reparación de daños durables** en el **hormigón**, tanto exteriores como interiores.
- **Sustitución de aparatos de apoyo** con patologías.

Calzada Madrid (**abierta** al tráfico con restricciones):

• Instalación de los **2 cables de refuerzo** en **todos los vanos**.

• **Sustitución** únicamente de **cables de autopsia** (7 ud), que se habían llevado completos para su **análisis en Laboratorio** (incluso zonas de anclaje interiores al hormigón de los mamparos).

• Pendiente de **sustituir** los **cables originales**.

• **Sin comenzar** ningún **otro tipo de reparación**.

Calzada Coruña (**cerrada** al tráfico):

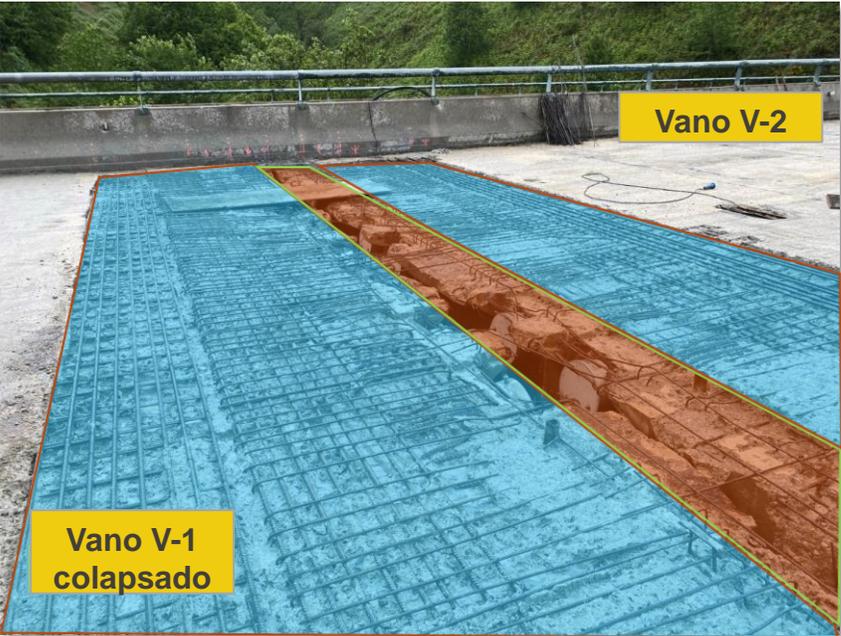
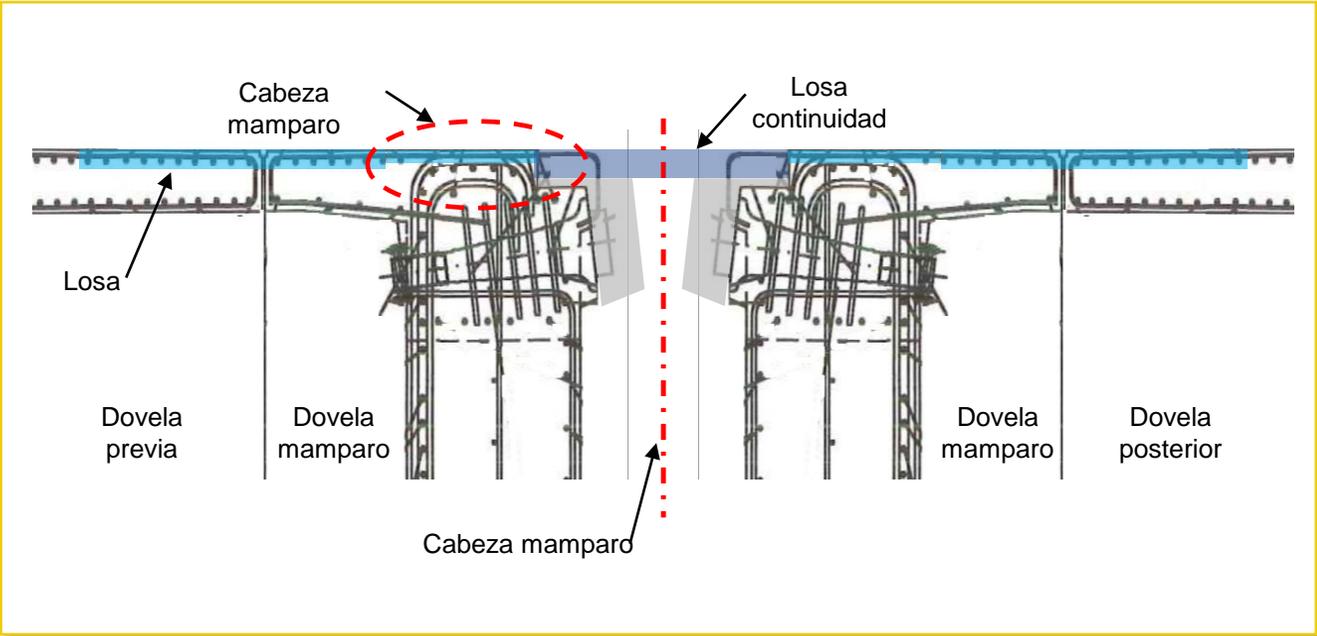
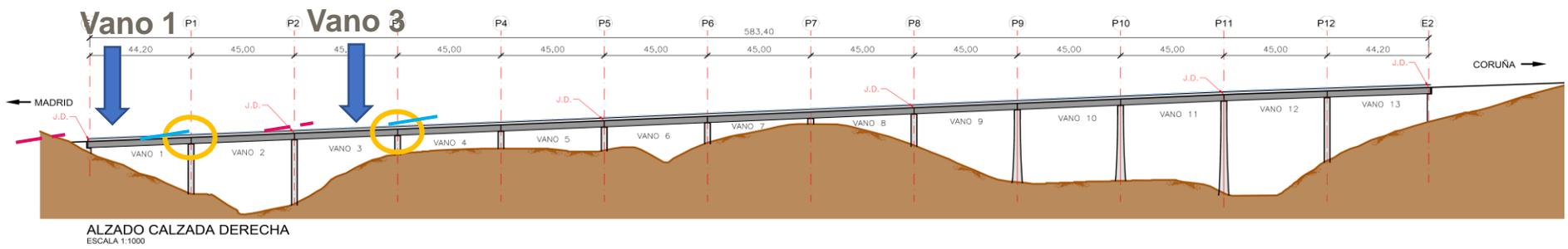
• Instalación de **10 cables nuevos** (8 originales + 2 refuerzo) en **todos los vanos** del viaducto **salvo 4 vanos** pendientes de rematar (7 cables en total), lejos de la zona afectada.

• **Iniciando** reparación y mejora del detalle de **las losas de continuidad**.

• **Hidrodemolición** de losas sobre pilas **P1 y P3**, actuando sobre la pila P3 en el momento del incidente.

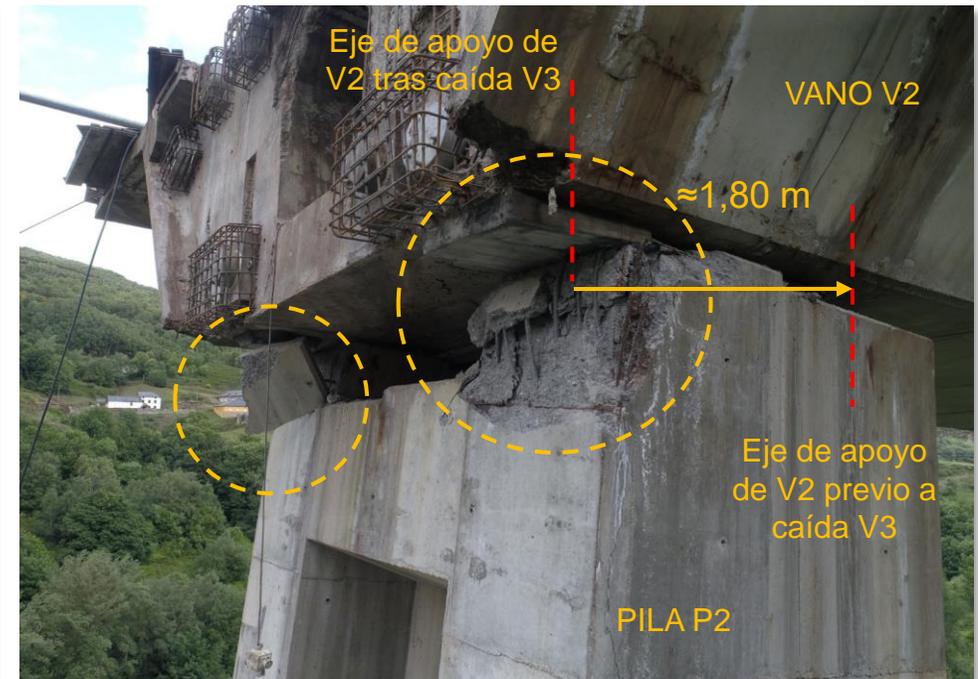
REPARACIÓN DE JUNTAS DE CONTINUIDAD PARA ELIMINAR ENTRADA AGUA

Hidrodemolición de P1 finalizada en vanos V1 y V2; en P3 finalizada en vano V3



¿Qué pasó?

COLAPSO DEL VANO 3. 7 de junio de 2022



- El 7 de junio **colapsa sin previo aviso** el **vano 3** de la calzada dirección **A Coruña**.
- Tablero con caída** aparente a plomo.
- Desplazamiento de **1,80 m** de **cabeza** de **pila P2** como sólido rígido y **sin indicios** o muestras de **golpe/impacto** del tablero sobre la pila, **ni fisuras de flexión** que expliquen el desplome.
- Vano 2** queda **apoyado** donde antes estaba el **V3**.

6 DESCRIPCIÓN DEL INCIDENTE

COLAPSO DEL VANO 3. 7 de junio de 2022



Mamparo A Coruña (P3). Zona superior “estallada”. Paso de hombre y esquina inferior con “aparente” integridad. Penetración de placas de pretensado en mamparo.

Mamparo lado Madrid (P2). Estado de aparente integridad.

6 DESCRIPCIÓN DEL INCIDENTE

COLAPSO DEL VANO 1. 16 de junio de 2022



- Vista general del vano V1 tras su colapso. Nuevamente **sin aviso** o indicios previos.
- **Sin movimientos apreciables** en pila P1. Mamparo 1 **sin daños apreciables** de gran entidad.

6 DESCRIPCIÓN DEL INCIDENTE

COLAPSO DEL VANO 1. 16 de junio de 2022



Mamparo 2 del vano 1 muy dañado, con ciertos indicios de haberse apoyado en el fuste de la pila durante su caída, pero la pila sin apenas desplome.

Bloque de anclaje hundido parcialmente en el interior del mamparo. Rotura de placa de anclaje.

6 DESCRIPCIÓN DEL INCIDENTE

¿Qué se ha hecho hasta la fecha?

LÍNEAS DE ACTUACIÓN

Línea de **trabajos para la investigación** de las causas incidente:

- Inspección **visual**
- Investigación **geotécnica**
- Investigación de **materiales**
- Investigación **analítica**

Línea de **trabajo de retirada de los restos** de los colapsos:

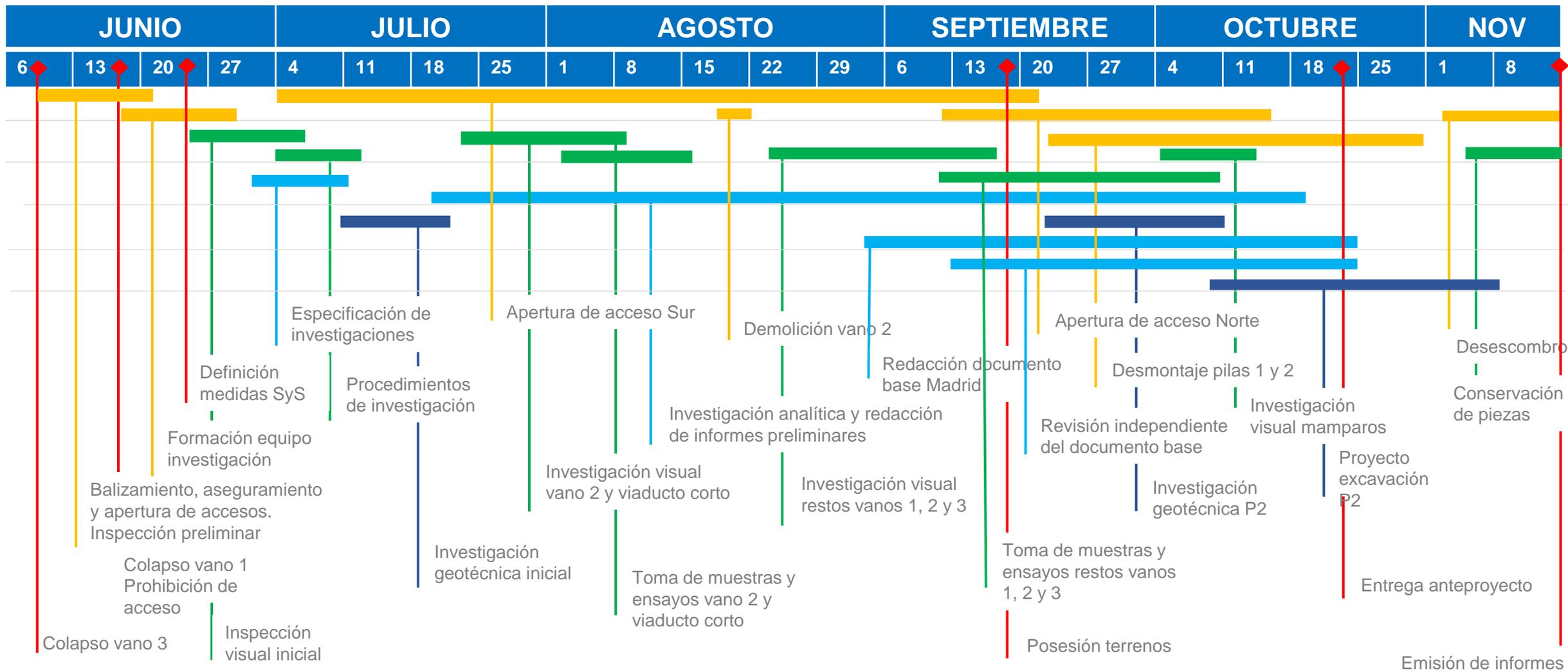
- **Desbroce** de la zona
- Apertura de **caminos de acceso**
- **Demolición controlada** del vano 2
- **Desmontaje** de las **pilas 1 y 2**
- **Desescombro** de los restos de los colapsos
- **Excavación** de la **pila 2** hasta cimentación (pendiente)

Línea de **trabajos de redacción** de un **documento base** para la **reconstrucción**

Tramitación **administrativa** de las **actuaciones de emergencia**.



CRONOGRAMA



Trabajos realizados:

❖ Investigaciones de **materiales**:

- **105** ensayos de **resistencia a compresión** del hormigón
- **10** ensayos de **resistencia a tracción indirecta** del hormigón
- **44** ensayos de **módulo de deformación** del hormigón
- **48** ensayos de **esclerometría**
- **84** ensayos de **contenido en cloruros** del hormigón
- **57** ensayos de **profundidad de carbonatación**
- **6** ensayos de **reactividad árido-álcali**
- **36** ensayos de **absorción de agua y porosidad**
- **23** ensayos de **contenido en cemento** del hormigón
- Ensayos de **caracterización de la macroestructura** del hormigón por **estereomicroscopia**
- Identificación de posibles **zonas de lajación** del hormigón
- Ensayos de **integridad por ultrasonidos** (impacto-eco)

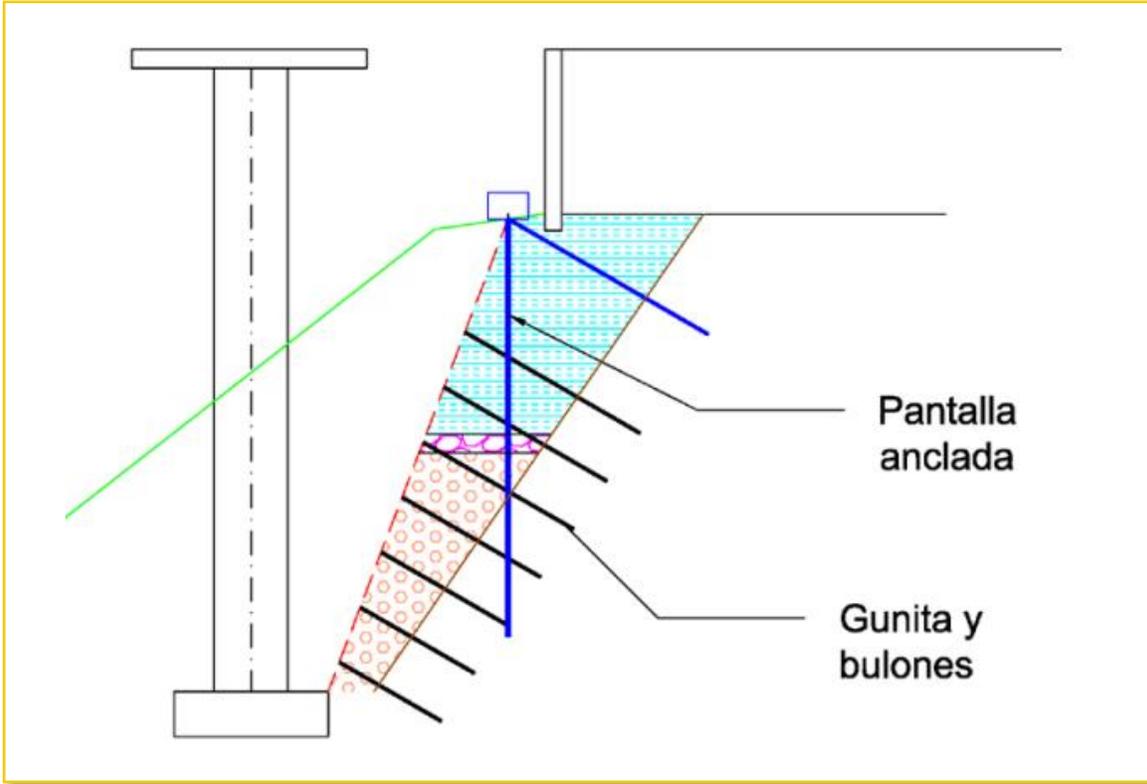
❖ **Testificación** de partes de los **elementos colapsados**

DEMOLICIÓN CONTROLADA DEL VANO 2

- **Demolición controlada** mediante debilitamiento de una sección del tablero.
- **Colapso** con perfecto **ajuste a los modelos** teóricos.
- **Ausencia de indicios** o señales de **daño** en las **zonas de hidrodemolición** y/o **bloques de anclaje adyacentes** tanto durante como después de la demolición.



INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA (Pendiente)

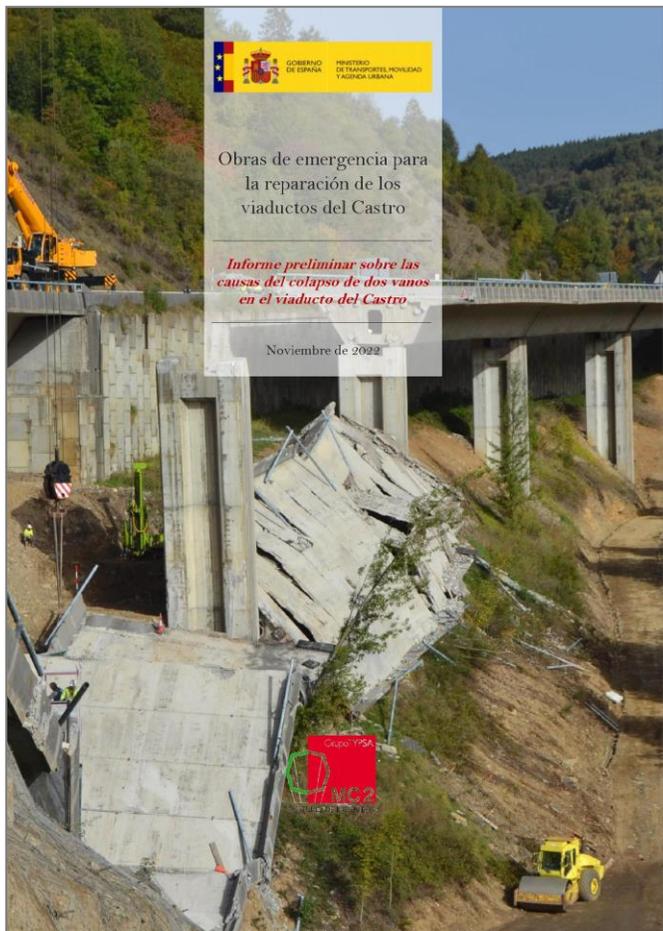


INFORMES SOBRE LAS CAUSAS DE LOS COLAPSOS

- **Recopilación** de todas las **labores de investigación** y realización de la **investigación analítica** en **dos informes** realizados de **forma independiente** por dos equipos de **ingeniería especializada diferentes**.
- **Esencial coincidencia** en el **origen** y las **causas del colapso**, con **diferentes matices** en cada informe.
- **Informes preliminares**: condicionados a los **datos disponibles** en la **actualidad** y **posibles nuevos hallazgos** en el transcurso de la investigación.



INFORMES SOBRE LAS CAUSAS DE LOS COLAPSOS



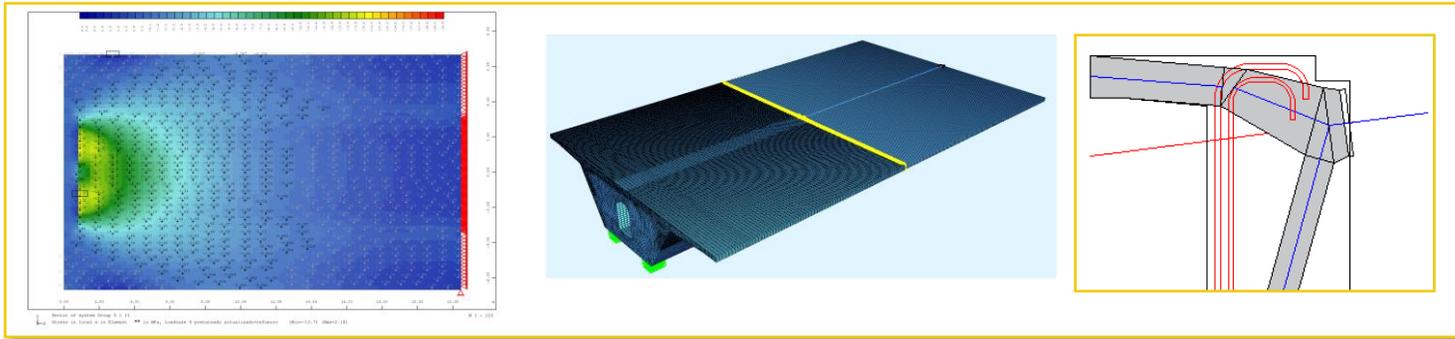
“En la zona correspondiente al **mamparo 2 del vano 1**, se han detectado, de forma muy puntual, **hidrodemoliciones** de espesor **100 mm y hasta 130 mm**, superiores a las previstas de 75 mm.

Por el contrario, existen **dos extremos de vano** que, habiendo estado **afectados por la hidrodemolición**, no han colapsado: **vano 2 y vano 4**. El **vano 2** fue **demolido de forma controlada** y su extremo hidrodemolido tampoco sufrió daños tras su caída.

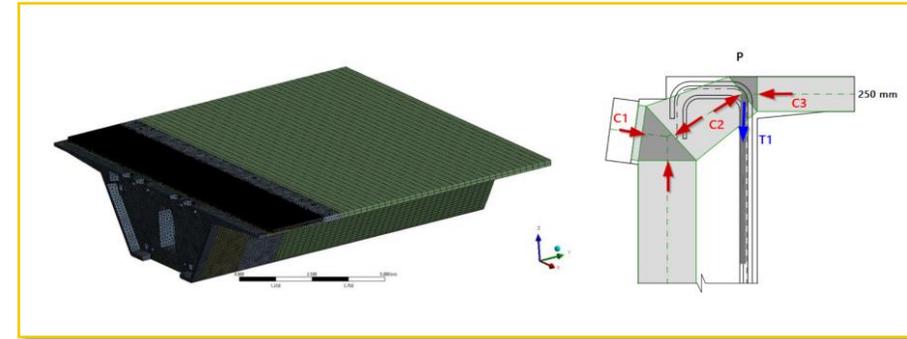
En la zona correspondiente al **mamparo 1 del vano 2**, sometido a **demolición controlada**, también se han observado, puntualmente, **hidrodemoliciones** con espesor de **hasta 95 mm**, superiores a las previstas.”

Análisis realizados por 2 equipos de ingeniería de forma **paralela e independiente**:

IDEAM: Software **Sofistik** -> modelos tipo **placa, volumétricos y B-T**



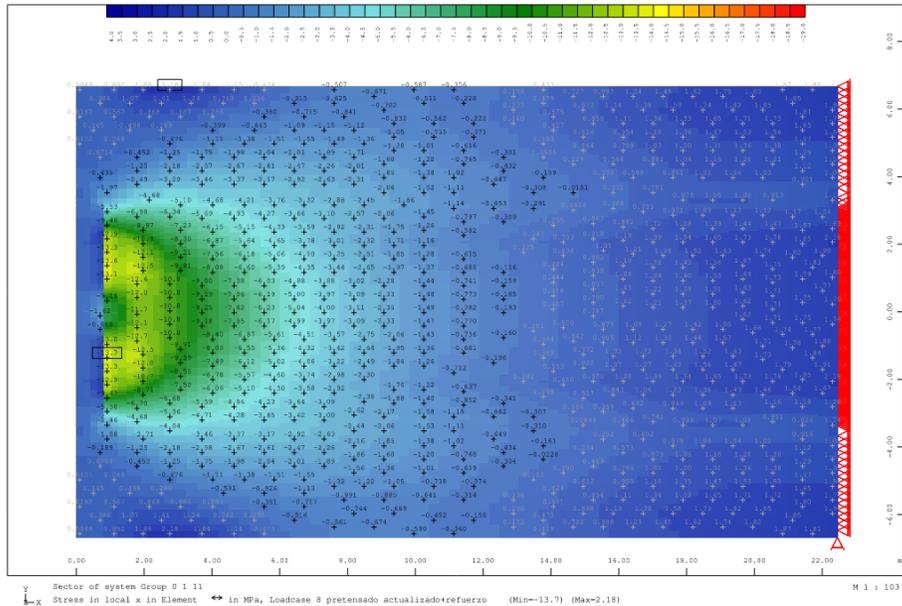
MC2: Software **Ansys** -> modelos **volumétricos y B-T**.



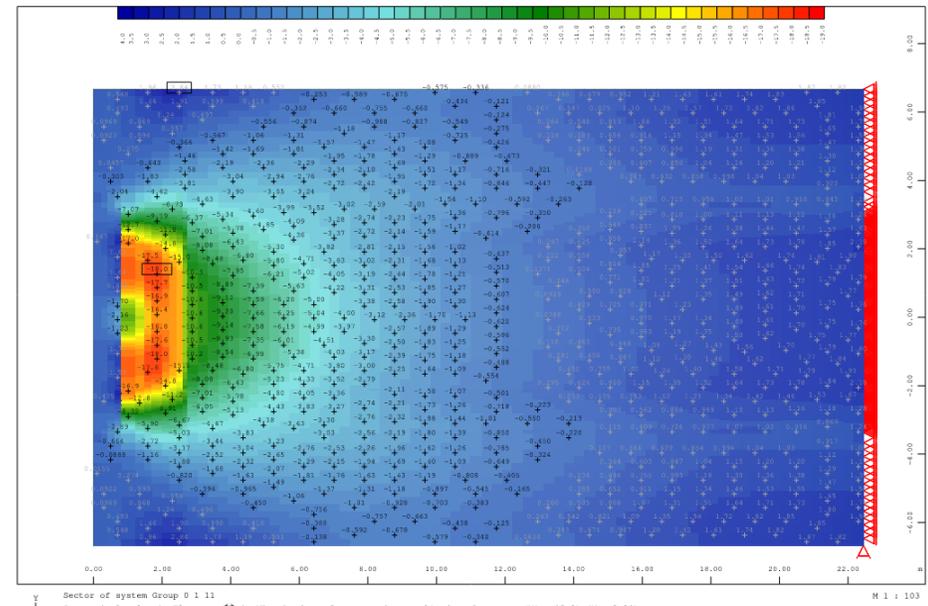
- ❖ **Bases** de cálculo **iguales** (materiales, geometrías base, etc)
- ❖ **Criterios y metodología** de análisis **propia: DIFERENTES.**
- ❖ Resultados **CUALITATIVOS** análogos.
- ❖ Resultados **NUMÉRICOS** convergentes.

MODELOS TIPO SHELL

- Suficiente **precisión y detalle** para sacar el **comportamiento global del mamparo** y la transmisión de la carga a las **almas y losas**.
- Doble modelo**: nominal Proyecto y modelo con el saneo con **hidrodemolición**.
- Zona hidrodemolida en C-C**. **Tracciones perpendiculares** a partir de **2,5m**, no relevantes



Tensiones máximas “x” en plano medio de losa conforme situación teórica de proyecto ($\sigma \approx 14$ mpa)

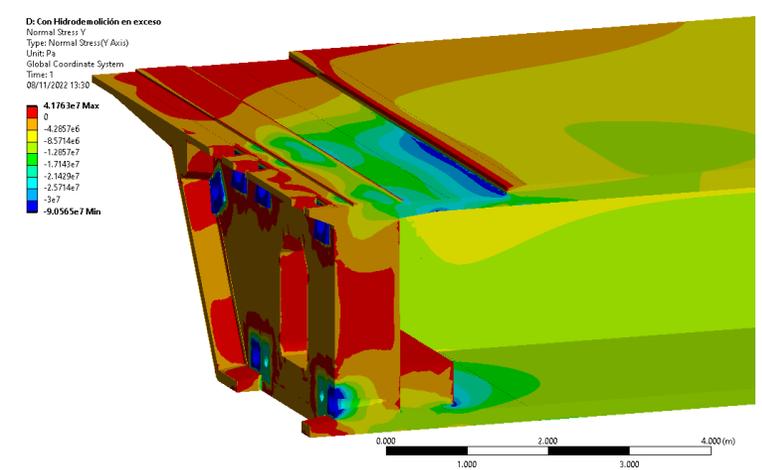
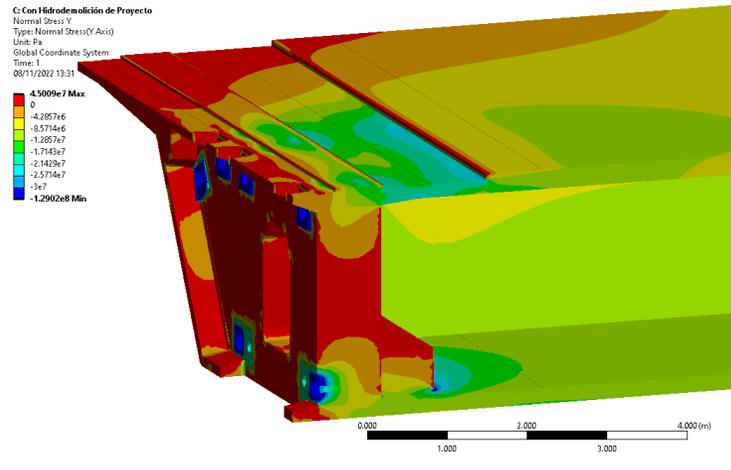
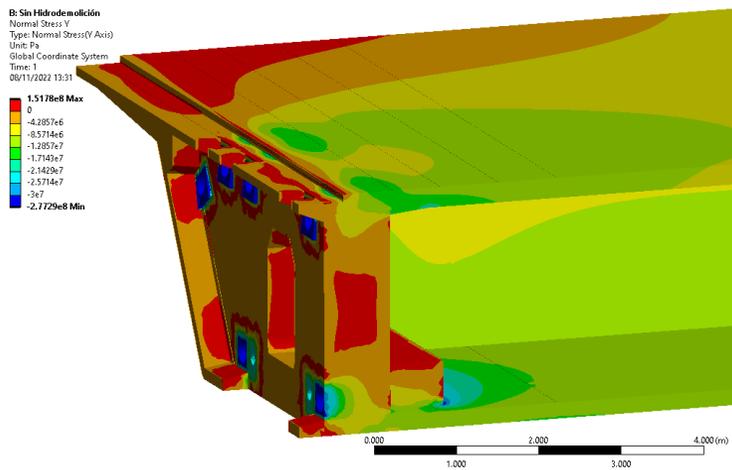


Tensiones máximas “x” en plano medio de losa conforme situación teórica de proyecto tras las hidrodemolición ($\sigma \approx 18$ mpa).

En ambos modelos, los niveles tensionales estaban holgados frente a los requisitos normativos

MODELOS VOLUMÉTRICOS -3D

- Con objeto de conocer con **mayor precisión** la **transmisión del pretensado** en el **bloque superior de anclaje**, desde la placa de anclaje hasta las losas y almas, se **reprodujeron los mismos modelos**, pero con **elementos finitos 3D**.
- Obtención de **resultados muy similares**, y **siempre ACEPTABLES**, a los obtenidos en el modelo 2D, tanto para la **situación de Proyecto** como en la fase de **hidrodemolición**.



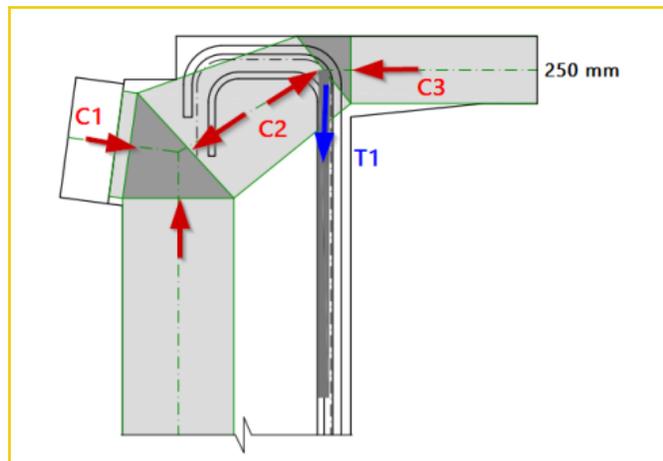
- A **izquierda**, **tensiones longitudinales** conforme a proyecto, en el centro conforme a la **situación teórica** de la hidrodemolición y, **a la derecha**, con un hipotético **exceso de hidrodemolición**.
- En los **tres casos** los resultados que se obtienen son **dentro de los límites normativos admisibles**

MODELOS BIELAS Y TIRANTES

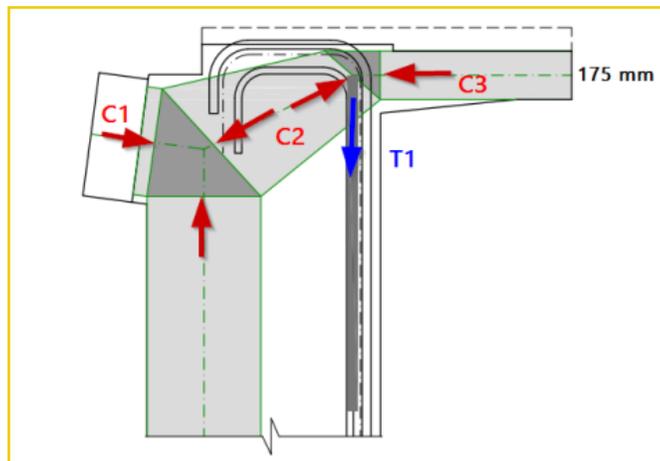
Adicionalmente, se ha realizado un **análisis cualitativo** del comportamiento del nudo (placa-difusión de losa) mediante el **método de Bielas y Tirantes** con objeto de **reproducir efectos** como la **fisuración** del hormigón, la **plasticidad**, la **presencia de las armaduras**, etc. cuyas **conclusiones** son:

- ❖ Cálculo de **sensibilidad** frente a posibles **incrementos de hidrodemolición** (+25mm), con **valores tensionales inferiores** a los normativos.
- ❖ **Equilibrio de nudo** fundamental para **equilibrio de entrada** de carga del pretensado en el tablero **SIN capacidad de redistribución** ante su **eventual fallo** o del **propio apoyo** en la losa superior del cajón.

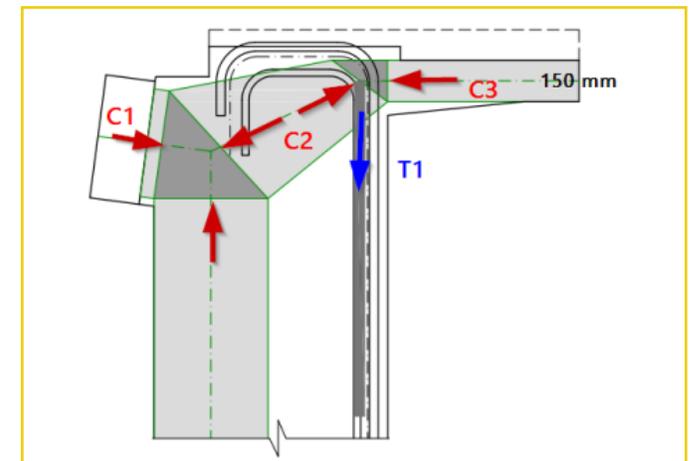
Situación **Proyecto**



Situación **Proyecto Reparación**

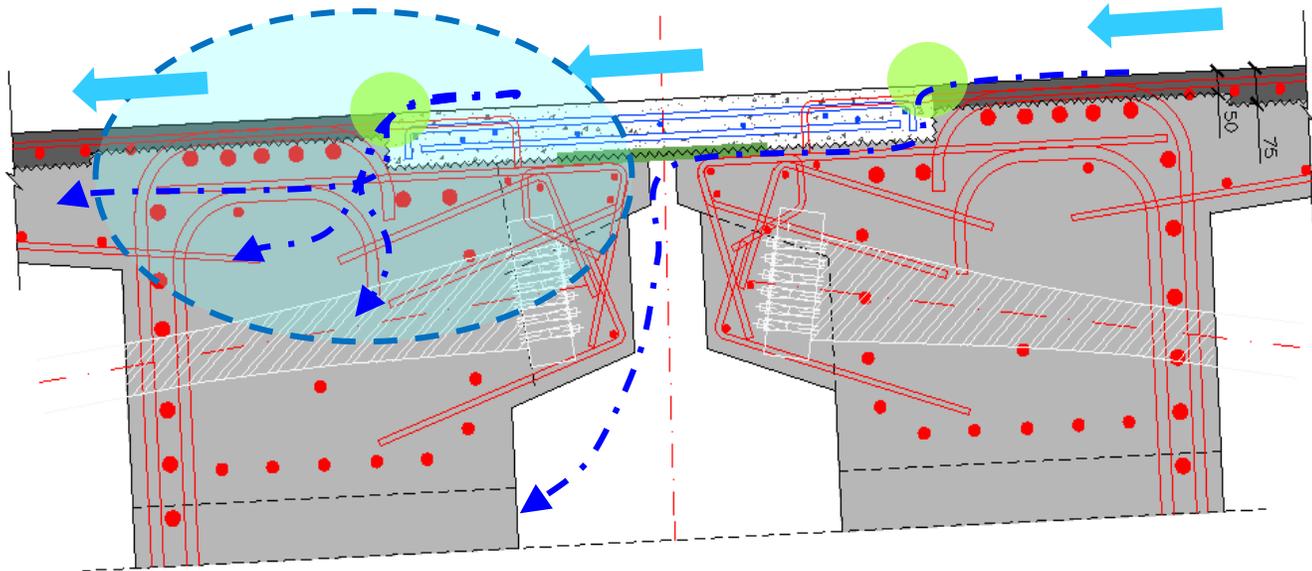
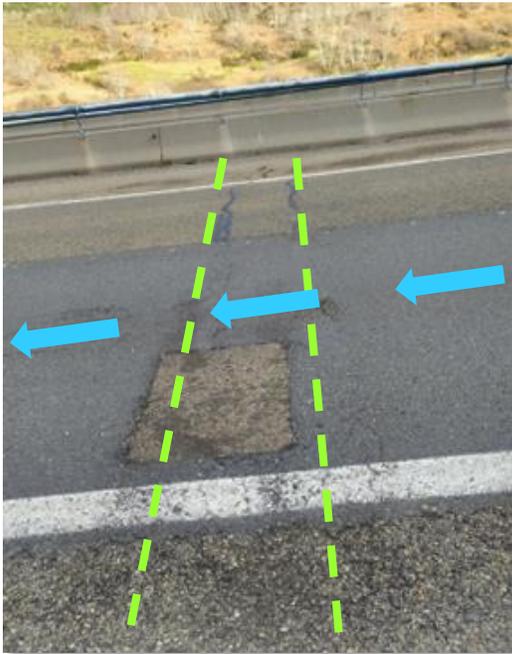


Situación **Reparación + ¿posible exceso?**



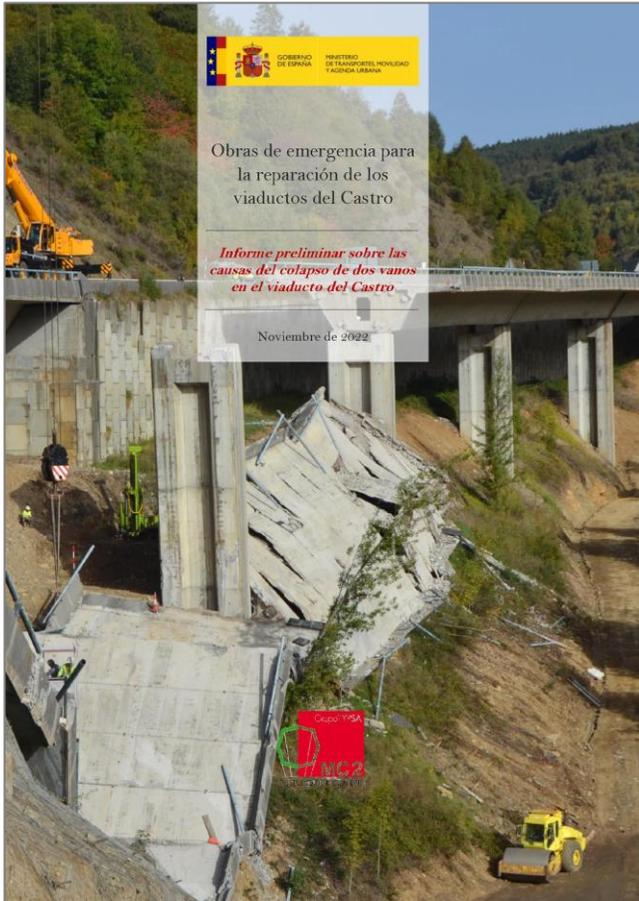
DETALLE DE LA JUNTA

Detalle **muy sensible** y expuesto a las condiciones de contorno, consecuencia de la **probable degradación** de las **características mecánicas y resistentes del hormigón y armaduras**, en un **entorno contaminado** por la inmediata entrada de **agua con sales fundentes** a través de las **losas de continuidad**.



**¿A qué se debieron
los colapsos?**

INFORMES SOBRE LAS CAUSAS DE LOS COLAPSOS



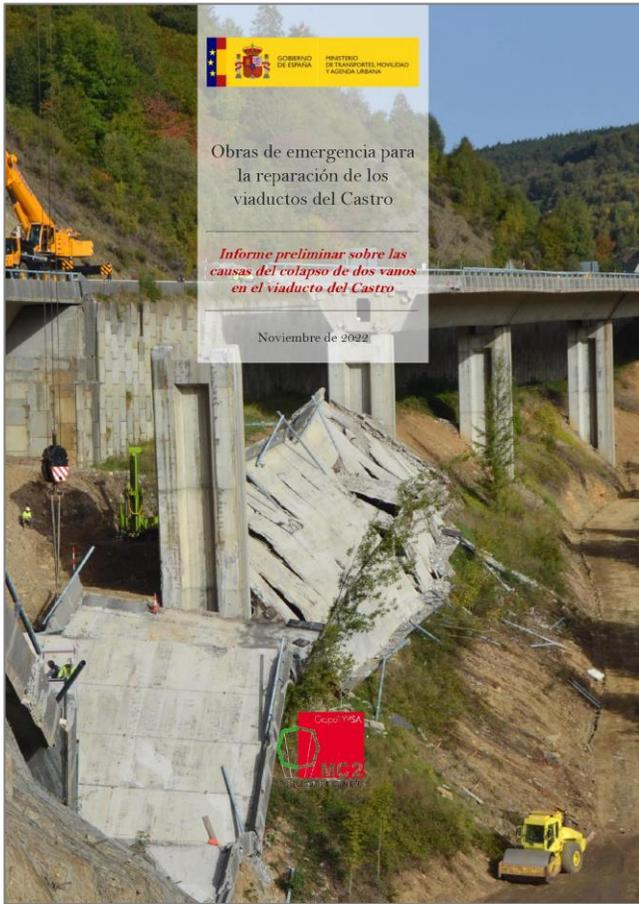
“De acuerdo con todas las evidencias anteriores, se puede establecer que el hecho de que **un vano** tenga alguno de sus extremos **afectado por la actuación de hidrodemolición** resulta una **condición necesaria**, pero **no es suficiente para su colapso**, puesto que el **vano 2**, sobre el que se ejecutó la hidrodemolición de forma simultánea con el vano 1, **no ha colapsado, ni ha mostrado la menor tendencia al fallo** durante su proceso de **demolición controlada**, mientras que este último sí.

Independientemente de lo anterior, el **origen más probable** de los **colapsos** de los **vanos 3 y 1** es el **fallo por agotamiento a compresión o flexocompresión** de la **losa superior de la dovela inicial** en la **zona acartelada adyacente al mamparo**, pues esta muestra síntomas compatibles con este modo de fallo.”

INFORMES SOBRE LAS CAUSAS DE LOS COLAPSOS

“ No se puede establecer una causa única, ni principal, que haya dado origen a los colapsos, que sólo pueden ser explicados por la **concomitancia de varios efectos** que, **aplicados de forma independiente**, en ningún caso hubieran dado lugar a un fallo de la estructura, pero que, **actuando de forma simultánea**, habrían podido conducir a una **situación compatible con el colapso**; estos efectos son:

- El **estado de deterioro durable** de las dovelas del **mamparo**
- La **disminución de la capacidad resistente** de la zona superior de las dovelas de mamparo debido a las **actuaciones de hidrodemolición**.
- El **efecto del cansancio del hormigón** en la zona superior de **las dovelas de mamparo** con la consecuente reducción de resistencia a compresión del hormigón e incremento de su deformabilidad. “



INFORMES SOBRE LAS CAUSAS DE LOS COLAPSOS



Informe Inicial

Memoria Técnica de los trabajos realizados en el marco de la emergencia y estado de avance de las conclusiones de los mismos

Fecha 14/11/2022 — 2126C-CASTRO_COLAP-016.0
MITMA. Demarcación de Carreteras del Estado en Galicia



“Los posibles **fallos de anclaje** que puedan estar en el origen de las caídas súbitas y sin preaviso (sobre las que no consta la identificación de ningún daño o indicio de patología previos) **parecen focalizados** en los **mamparos M2** (aguas abajo de las losas de continuidad en relación a las escorrentías de agua sobre la plataforma) de los **vanos colapsados V1 y V3** de la calzada dirección Coruña.”

Su origen parece poder explicarse por **la confluencia**, como suele ocurrir siempre en este tipo de incidentes, de:

- Problemas derivados de un **diseño muy estricto** y poco perfilado de los **nudos de esquina** (...)
- Problemas de **degradación de las condiciones de durabilidad**, por fallos en la **impermeabilización y filtraciones** a través de las **juntas de continuidad** (...)
- **Interacción** entre los citados **mecanismos de transmisión** de las fuerzas de las tromplacas de anclajes hacia las **zonas adyacentes hidrodemolidas** de la losa superior (...)



COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Dada la **importancia y trascendencia** de los informes que se han elaborado, desde el ministerio se ha considerado importante que el Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos avalase la metodología y los resultados de los mismos.

Por ello se ha **compartido con él**, el **contenido de estos informes** durante su elaboración y se ha buscado su apoyo en la definición de los trabajos a realizar y en la valoración de los resultados.

El Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos por tanto es **concedor de ambos informes**, **comparte la idoneidad** de las empresas escogidas así como **avala la metodología y la coherencia** de los resultados y la **credibilidad de las conclusiones** a las que se llegan.

**¿Qué queda pendiente
a partir de ahora?**

CAMPAÑA DE INVESTIGACIÓN

- **Completar** las tareas de **desescombro en curso**, salvo **piezas a custodiar** para estudios y ensayos de detalle, principalmente de los **mamparos de anclaje**.
- **Completar la toma de datos y ensayos pendientes** hasta ahora por **falta de acceso y problemas de seguridad**: completar estudio de hormigones; análisis de los despieces y estado de corrosión de la ferralla; estudio de bloques de anclaje en mamparos; etc.
- **Completar estudio relativo al comportamiento de la pila P2**, que permita explicar la causa del **fuerte desplome** en cabeza y la desconocida, e inexplicable hasta ahora, cinemática de la caída: excavación hasta base de pila. Previamente se intentará **realizar ensayos y reconocimientos** que permitan obtener **informaciones concluyentes** al respecto.
- **Estudio y ensayos** sobre las **dovelas de mamparos de calzada Madrid**, una vez **desmontados los tableros** actuales.
- Redacción del **informe con conclusiones finales** del incidente.
- **Lecciones aprendidas: Redacción de documento técnico** que permita **mejorar y optimizar la conservación** del parque de estructuras de la red, especialmente de las de análoga tipología: **viaductos en zonas de alta montaña expuestas a sales y “condiciones ambientales agresivas”**

RECONSTRUCCIÓN Y SUSTITUCIÓN DEL VIADUCTO

En la **calzada A Coruña** queda pendiente de **completar investigaciones**, tanto en las zonas colapsadas como en las dovelas de los mamparos de los restantes tableros una vez desmontados, lo que llevará algún tiempo todavía. Igualmente, la **solución requerirá** no solo actuar en el tablero sino que **también la reconstrucción de las pilas dañadas** y que se han demolido.

Una vez concluido, se llevará a cabo la **reconstrucción de los vanos caídos**, de las **pilas que se han demolido** y la **sustitución del resto de tablero**.

En la **concepción del nuevo tablero** se aplicaran unos **nuevos criterios de diseño** adecuados a las **condiciones ambientales** y al **estado del arte** actual.

Calzada Madrid:

- ❖ **Cables** sin cambiar.
- ❖ Daños previos análogos en **losas de continuidad**.
- ❖ **Incertidumbres** sobre el **comportamiento a futuro** de la estructura a la vista de lo acontecido.
- ❖ Por tanto, se ha **previsto LA SUSTITUCIÓN DEL TABLERO EXISTENTE ACTUAL POR UNO NUEVO QUE PERMITA ASEGURAR SU DURABILIDAD FUTURA** y para ello:
 - **Desmontaje** técnico del **resto de tableros** conforme a sistema análogo al montaje: cimbra superior, cuelgue de dovelas, corte de cables y retirada de dovelas:
 - **Acopio y custodia de dovelas** de mamparos **para estudio y análisis**.
 - **Machaqueo y separación** de materiales para su correspondiente **tratamiento y reciclaje**.
 - **Análisis de sondeos y estudios pendientes** (por restricción de acceso por seguridad) para **validar/reforzar las cimentaciones** actuales frente a los nuevos tableros y acciones de su puesta en servicio.

Por último **cerrar las conclusiones pendientes** con vistas a su extrapolación en relación con futuras inspecciones de **otros viaductos de análogas o similares tipologías y/o condiciones ambientales**.

RECONSTRUCCIÓN Y SUSTITUCIÓN DEL VIADUCTO

El nuevo tablero, obligatoriamente, habrá de recoger los **avances técnicos y normativos** desarrollados en los **últimos 25 años**, así como tomar en consideración las **conclusiones y enseñanzas extraídas de lo acaecido**. **Se aprovecharán íntegramente las pilas existentes**.

Especial **atención** requieren los **aspectos relacionados con la durabilidad y de mantenimiento** de la futura estructura: requisitos de protección del pretensado; impermeabilización; reducción de juntas; materiales conforme especificaciones actuales (Código Estructural; Eurocódigos) para ambientes con uso frecuente de sales fundentes; etc.

Pretensado de máximas garantías conforme a **estándares actuales** con **5 capas** de protección: cables galvanizados, engrasados, con vaina individual y vaina global inyectada con lechada.

Tablero de cajón “in situ” ejecutado mediante **autocimbra con postesado interior** totalmente **inspeccionable y sustituible**. Retranqueo de bloques de anclaje alejándolos de juntas y zonas de posible entrada de agua.

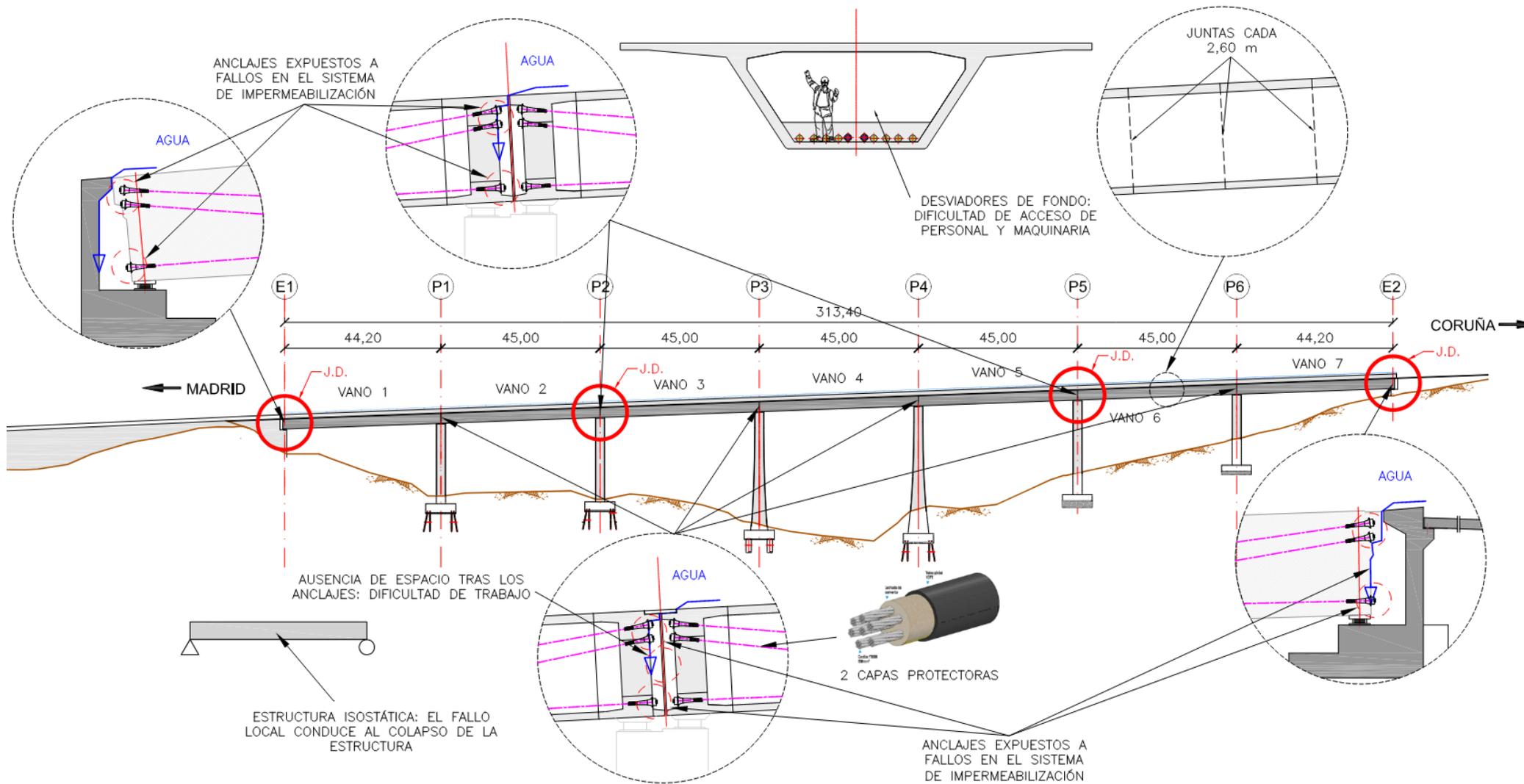
Minimizar el número de juntas recurriendo a **soluciones hiperestáticas**, dotadas adicionalmente de una mayor redundancia.

Las **mejoras** que se introducen con el **nuevo diseño** serían:

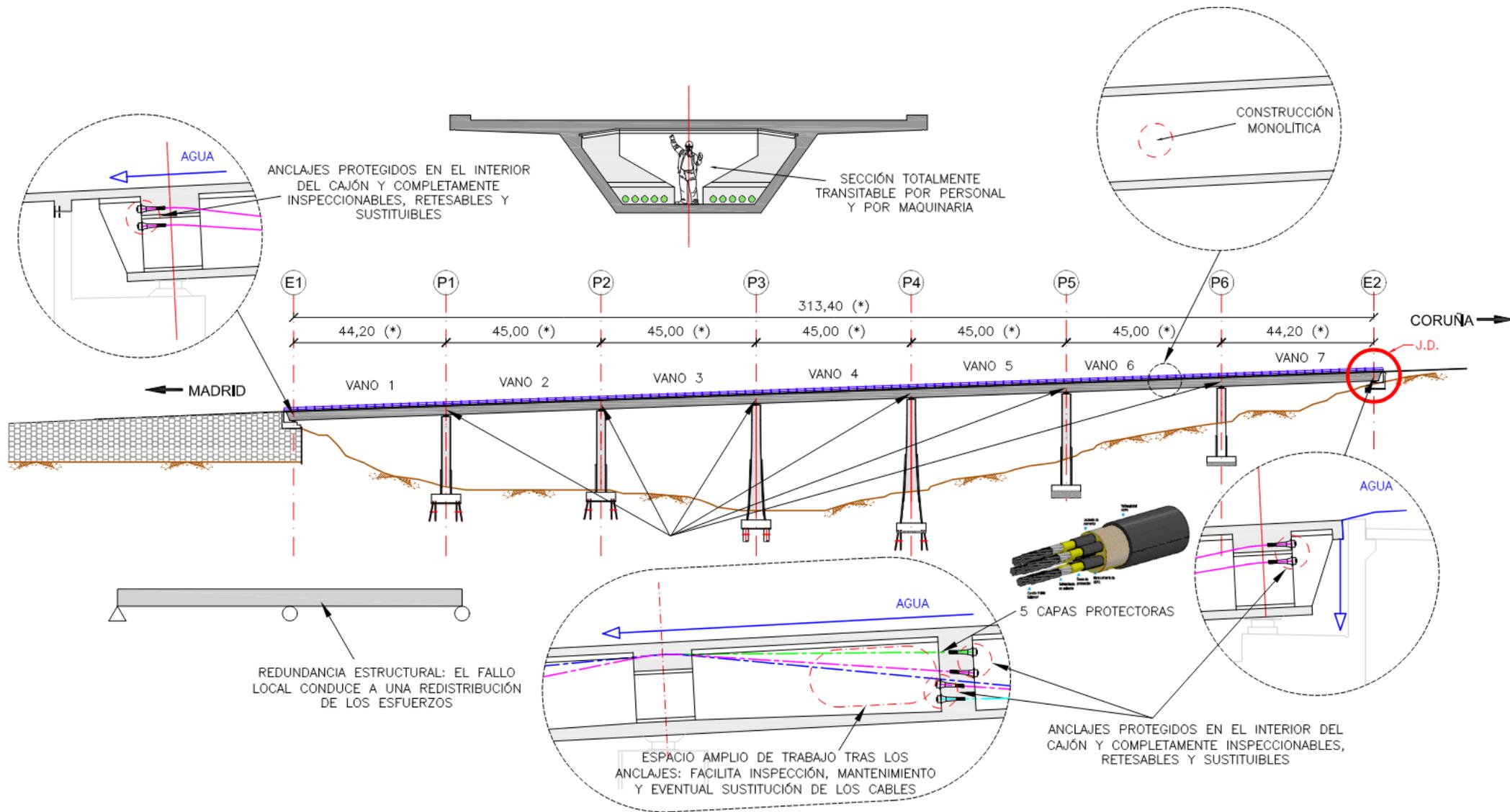
- ❖ Paso de **estructura isostática** a **hiperestática**, cosa que significa disponer de una **redundancia estructural**. El fallo local conduce a una **redistribución de esfuerzos**.
- ❖ **Sección totalmente transitable** por el personal y maquinaria.
- ❖ Construcción **monolítica sin juntas** cada 2,80 m.
- ❖ **Anclajes protegidos** en el interior del cajón y completamente **inspeccionables, reseteables y sustituibles**.



NUEVOS CRITERIOS DE DISEÑO DE LOS NUEVOS TABLEROS



NUEVOS CRITERIOS DE DISEÑO DE LOS NUEVOS TABLEROS



**Gracias por vuestra
atención**