

TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN DEL PUENTE ROMANO DE CÓRDOBA.

D. JOSÉ SANTOS SÁNCHEZ.
INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
SONDEOS, INYECCIONES Y TRABAJOS ESPECIALES. SITE S.A.

1. Antecedentes históricos.

El Puente Romano de Córdoba fue construido sobre el río Guadalquivir, probablemente sustituyendo a uno más primitivo de madera. Puede que la construcción del puente fuera alrededor del 167 a.C., durante la época de dominación romana, (Imagen 1). Fue un importante medio de entrada a la ciudad desde la zona sur de la península Ibérica por ser el único punto para cruzar el río sin utilizar ningún tipo de embarcación. Probablemente la Vía Augusta que iba desde Roma hasta Cádiz pasaba por él.



Imagen 1

A lo largo de su historia ha sufrido numerosas reconstrucciones, con frecuentes caídas de pilas y arrastre de parte de la cimentación por riadas. Estas reconstrucciones se realizaron principalmente en la época de dominación árabe, aunque también en la época de la España Cristiana, la Edad Media, la Edad Moderna y otras posteriores debido al deterioro del mismo. Dichas reconstrucciones se realizan utilizando las técnicas existentes. Como curiosidad cabe destacar la cimentación con pilotes como la del año 1684 por José Granados: “se profundice hasta llegar a suelo firme, y cuando no lo fuere, se hincan estacas verdes de pino tostadas las puntas, equidistantes un pie, sobre cuyas cabezas, recortadas a medio pie por encima del terreno, se echará un derretido de mezcla y ripio a partes iguales de cal y arena de monte cuatro dedos por encima de las dichas”.

Igualmente, en el año 1776 se prepara un informe para nuevas reparaciones donde se recurre de nuevo a pilotes: “sostenida por pilotes de un pie de diámetro provistos de sus correspondientes azuches con peso

de media arroba cada uno y distantes entre sí media tercia, que debía entrar 14 pies en el terreno, valiéndose de una maza de 24 arrobas disparada de una machina que levante 26 pies”.

Ya en época reciente, en 1975 se realiza la última reparación, consistente en:

- a. Relleno de socavaciones existentes inmediatamente “aguas abajo” y “aguas arriba” del referido Puente Romano.
- b. Reparación del zapata de cimentación e inyecciones de las gravas subyacentes bajo la misma.
- c. Anclaje de la cimentación ya reparada a las margas subyacentes bajo la cimentación y las gravas inyectadas.

En todas estas reconstrucciones se han ido rehaciendo arcos, reforzando pilas, repasando zonas de dovelas y protegiendo la erosión de la piedra con enfoscados diversos. Por este motivo, el puente presenta una gran heterogeneidad en los su conjunto, fruto de las diferentes técnicas utilizadas en cada reparación realizada (Imagen 2).

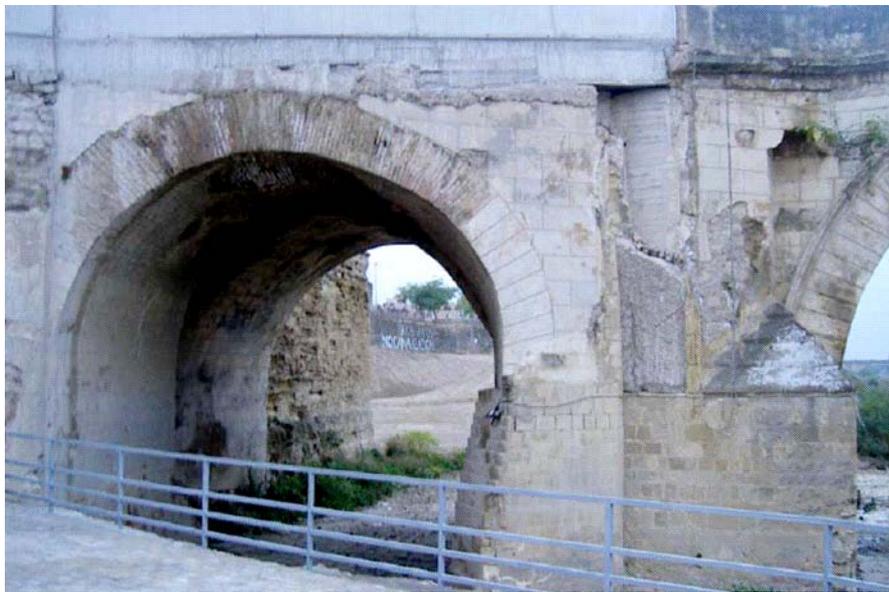


Imagen 2

2. Modelo de la estructura del puente.

La estructura del Puente Romano de Córdoba es de fábrica de piedra que está constituida por tres hojas: 2 exteriores de fábrica de piedra, que se puede considerar que actúan como “encofrado” de una tercera hoja interior de relleno diverso en cada pila.

De los sondeos realizados se observa como en algunas pilas aparecen en su punto medio rellenos con restos de sillares de arenisca de pequeño tamaño con algún conglomerante. En otras, los rellenos parecen ser material de río sin clasificar.

El Puente tiene una longitud de unos 225 metros y está compuesto por 16 arcos resistentes, que abarcan toda la anchura del tablero (aproximadamente 8,50 metros) (Imagen 3).

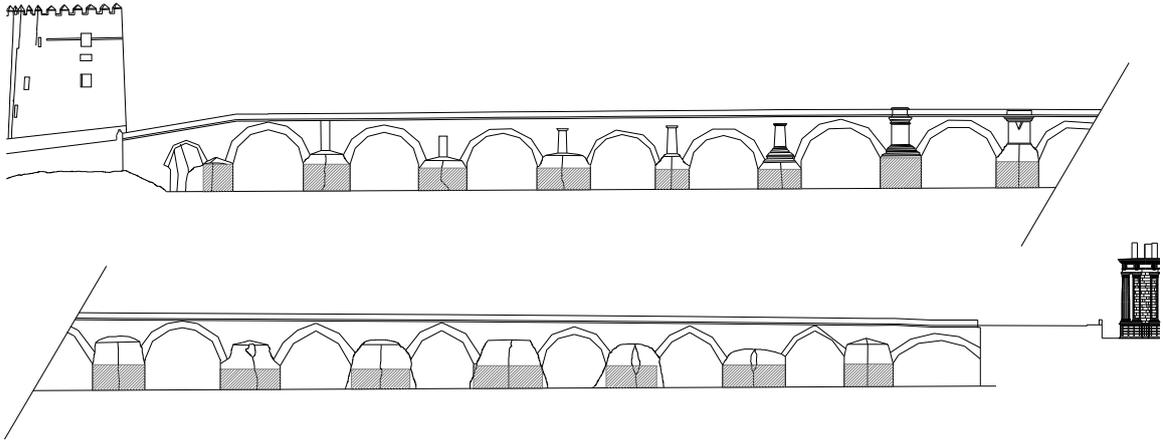


Imagen 3

Consta de 15 pilas y 2 estribos resistentes, que recogen los esfuerzos que descargan los arcos y los transmite a la cimentación. Cada una de estas pilas está conformada por la estructura de tres hojas que se ha mencionado anteriormente (hoja de fábrica de piedra, relleno y hoja de fábrica de piedra.).

Los arcos se pueden encuadrar formalmente en dos grupos: arcos de medio punto (enteros o rebajados) y arcos apuntados, con una diversidad de luces que varía entre los 9,8 y los 12 metros (Imagen 4).



Imagen 4

Esta heterogeneidad en los arcos y las pilas provoca que las componentes horizontales de los empujes en cada arco no se encuentren compensadas (Imagen 5).



Imagen 5

En planta presenta una ligera curvatura, aunque con un radio de curvatura muy amplio.

La cimentación del puente está realizada mediante sillares de arenisca y cajones rellenos de mortero de distinta composición y geometría resultando una cimentación heterogénea fruto de las sucesivas restauraciones realizadas a través de más de 2000 años de existencia.

Se han realizado diversos sondeos a lo largo del puente, que nos permiten identificar tanto el perfil geológico como la disposición de la cimentación. Se trata de un cimiento continuo a lo largo de todo el cauce, con una anchura equivalente al zampeado actual (entre 23 y 36 m) y espesor variable entre 2 y 5,5 m. (Imagen 6)

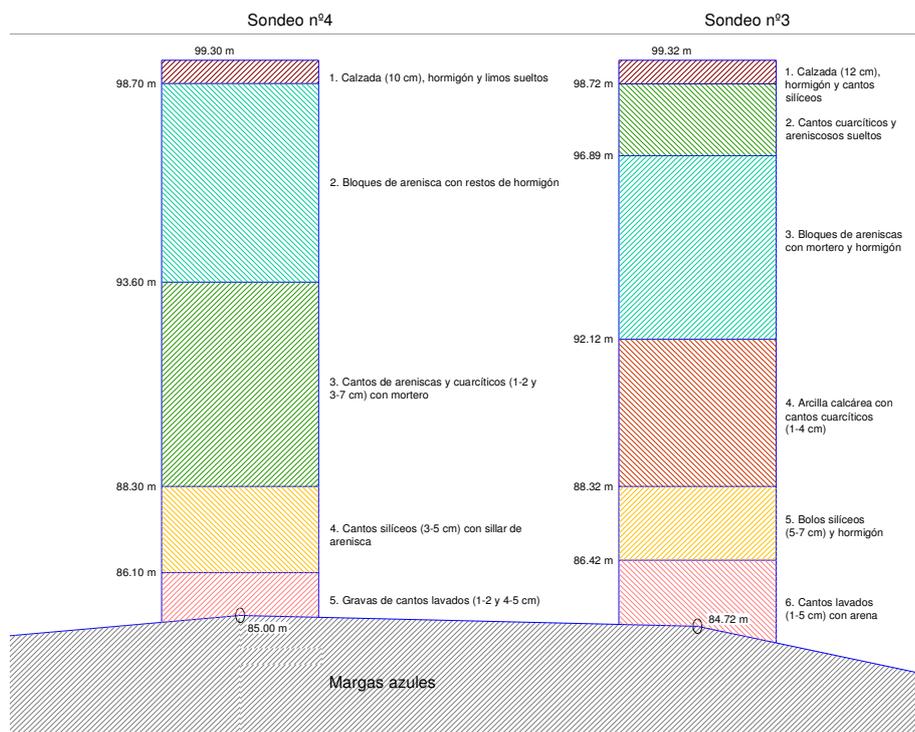


Imagen 6

El cimiento se asienta sobre las margas azules del Mioceno superior que constituyen un apoyo de adecuadas características geotécnicas para garantizar su estabilidad tanto en lo referente a la capacidad portante como a la magnitud de los asentamientos. No obstante, no podemos descartar la existencia de capas discontinuas de gravas y bolos en matriz limo – arenosa sobre el nivel de margas azules.

Las causas de los derrumbamientos que ha sufrido el puente a lo largo de su dilatada existencia están en relación con procesos de socavación del cimiento y arrastre de materiales por la acción de la corriente, sobre todo en grandes avenidas. También se han producido procesos de erosión y meteorización de la piedra que se traducen en importantes disminuciones de su capacidad resistente.

3. Planteamiento previo del método de trabajo y diagnóstico de la estructura.

Para establecer unas actuaciones adecuadas es necesario realizar una investigación de la estructura del puente sobre tres elementos básicos: Estabilidad de las bóvedas (arcos), estabilidad de los muros de las pilas sobre los que descansan las bóvedas y la cimentación.

En el estudio de las estructuras de fábrica, la resistencia y la rigidez no son parámetros prioritarios, sino que es la estabilidad el criterio principal a la hora de estudiar las estructuras de fábrica, al menos hasta cierto nivel de carga. De este modo, un arco semicircular soportará una carga con tal de que tenga cierto espesor mínimo; el cálculo del arco consiste en determinar este espesor para una luz y una carga dadas, es decir, dar al arco una geometría adecuada. En el caso de arcos de medio punto, la regla geométrica obliga a que el espesor de dovelas nunca debe ser inferior a $1/10$ del radio.

La mayoría de los arcos del puente tienen una geometría correcta de modo que las líneas de esfuerzos quedan dentro del trazado de los mampuestos del arco. No obstante, hay arcos en los que se obliga a trabajar al relleno. Como ya hemos explicado, en algunas pilas existen rellenos con restos de sillares de arenisca de pequeño tamaño con algún conglomerante, y en otras los rellenos parecen ser material de río sin clasificar.

La asimetría en las luces y recubrimientos de los arcos provoca que las componentes horizontales de los empujes no se encuentren compensadas (por contraposición a otras construcciones en piedra donde se cuidaba en extremo esta compensación). De este modo, estas componentes horizontales no compensadas por los arcos contiguos son transmitidas por medio de las pilas a la cimentación, provocando unos empujes horizontales en el terreno.

Por otro lado, bajo el cimiento es previsible la existencia de socavaciones producidas por filtraciones y por erosión remontante, que reducen notablemente la capacidad portante de éste.

4. Solución propuesta.

La consolidación del Puente Romano tiene como objetivo la reparación de los daños de la cimentación y estructurales del puente, especialmente los de los elementos arquitectónicos en contacto con la lámina de agua.

La solución adoptada incluye las siguientes actividades:

1º) Inyección de la estructura aérea del mismo mediante inyecciones de cal para refuerzo del relleno de las pilas y los arcos ejecutadas desde la parte superior del puente (Imagen 7).

2º) Pantalla de tablestacas en el borde del zampeado aguas abajo (Imagen 7).

3º) Consolidación y refuerzo de la cimentación del mismo, mediante inyecciones de lechada de cemento a baja presión desde las zapatas de las pilas, es decir desde el lecho del río; tiene por finalidad rellenar los posibles huecos del cimiento y aumentar su capacidad resistente (Imagen 7).

4º) Reparación del zampeado (Imagen 7).

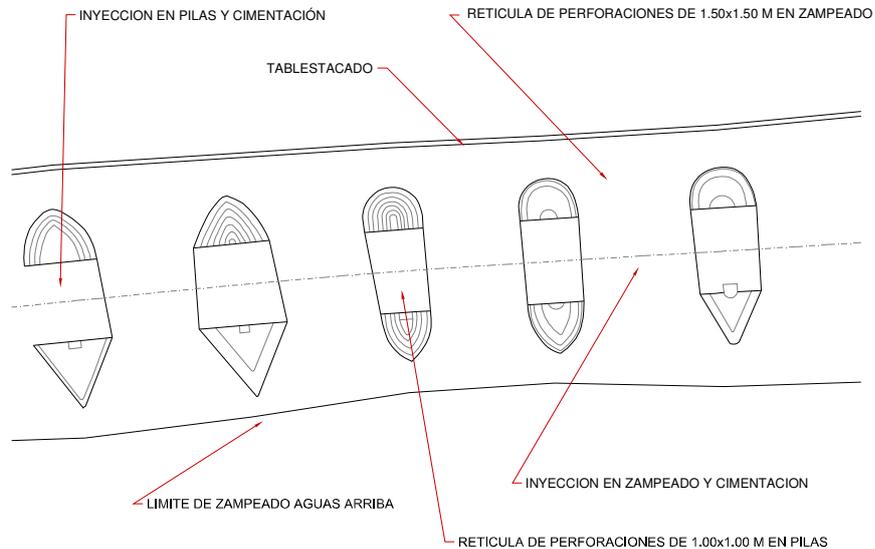


Imagen 7

Inyecciones desde el tablero.

Para reforzar el relleno de las pilas y los arcos del puente, se realizan unas inyecciones de cal desde la parte superior del mismo (Imagen 8).



Imagen 8

Se realiza una cuadrícula de perforaciones separadas un metro, de profundidad variable hasta aproximadamente un metro por encima de la estructura del puente en cada punto. Posteriormente se efectúa la inyección mediante lechada de cal o mortero de cal (Imagen 9).

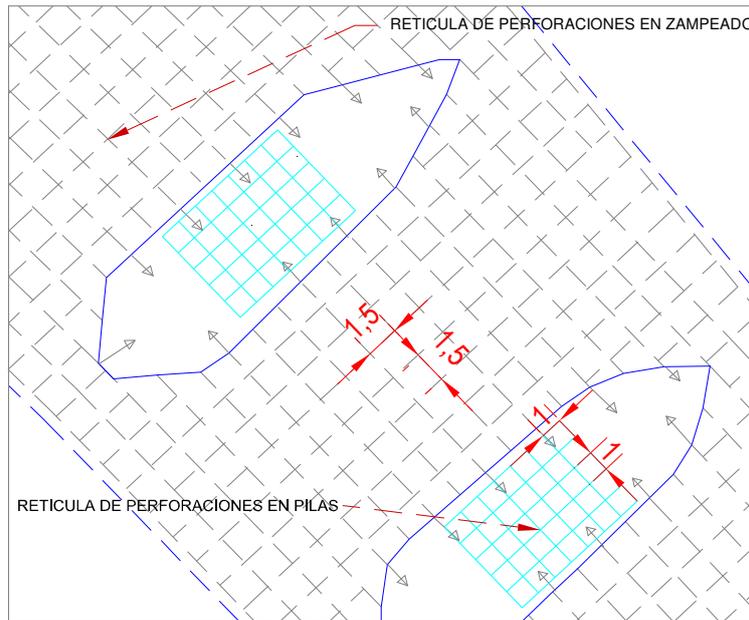


Imagen 9: Detalle de replanteo de perforaciones desde las pilas y desde el lecho del río.

Se siguen los mismos procedimientos de inyección para el caso de las inyecciones en la cimentación. La única variedad es que estas inyecciones se realizan con cal, mientras que en la cimentación, las inyecciones eran con cemento.

Entre los motivos que inducen a la utilización de cal en lugar de cemento están los siguientes:

1. Es probable que en algunos arcos esté trabajando el relleno de modo que las líneas de esfuerzos quedan fuera del trazado de los mampuestos del arco, con lo que las inyecciones con cal proporcionan un terreno mejorado capaz de transmitir estas cargas, un terreno mejorado que no sea excesivamente rígido, que se logra a largo plazo (meses/años).
2. No se utiliza cemento porque puede rigidizar demasiado la estructura, por poder producir efluorescencias, y además porque se pretende reproducir los medios de construcción originales.

En las inyecciones se utilizan presiones pequeñas del orden de 2 kg/cm², con objeto de producir las mínimas alteraciones al relleno del puente, y simplemente producir una mejora del terreno. Las admisiones de lechada han sido también bajas, salvo en zonas puntuales, debido a la existencia de posibles huecos en el relleno de la tercera hoja de la estructura del puente.

Se emplea una mezcla con dosificación en peso de cal-agua 1,2:1 en lechada de cal, y de 1 cal / 1,4 arcilla / 0,5 agua en morteros de cal.

Tablestacado.

Se realiza una pantalla de tablestacas en el borde del zampeado aguas abajo. El objetivo de esta pantalla es triple:

1. El confinamiento (aunque sea parcial) del recinto para conseguir una máxima eficacia en la inyección.
2. La seguridad de que no fluirán lechadas inyectadas en la zona de aguas abajo del río.
3. Evitar socavaciones y procesos de erosión remontante.

Se emplean tablestacas no recuperables de acero al carbono, de 450 mm de anchura útil y 6 mm de grosor con profundidades variables entre 3 y 8 metros.

Inyecciones en la cimentación.

Con los trabajos de inyección de la cimentación se consolida el terreno mediante mejora de sus condiciones mecánicas. Estos trabajos se realizan desde las zapatas de las pilas, en el lecho del río.

Se ejecuta una cuadrícula de perforaciones separadas 1,5 metros penetrando un metro en el nivel de margas azules con taladros de 100 mm de diámetro (Imagen 9). Se han realizado perforaciones tanto verticales como inclinadas a 45° (Imagen 10).



Imagen 10

La inyección se realiza por impregnación, que consiste en la sustitución del agua y/o gas intersticial en un medio poroso, por una lechada inyectada a una presión suficientemente baja, que asegure no producir desplazamientos significativos del terreno.

Durante todas las operaciones de inyección se lleva un control topográfico de los elementos estructurales del Puente Romano, de modo que hay información continua del comportamiento de la estructura frente a inyecciones, evitando movimientos y asentos de la misma.

Estas inyecciones, además de consolidar el terreno, rellenarán huecos en determinados puntos donde aparezcan las capas discontinuas de gravas y bolos, reforzando además la unión con el zampeado.

Se han obtenido admisiones bajas, salvo en lugares puntuales donde existían huecos, en lugares donde aparecían las capas discontinuas de gravas y bolos.

En cuanto a la dosificación, se han empleado mezclas en las que se iniciaba con una relación agua-cemento 1:1, y se aumentaba si había admisiones hasta una dosificación 2:1.

Reparación del zampeado.

Una vez terminadas las obras se procede a la reparación de las losas del zampeado (Imagen 11).

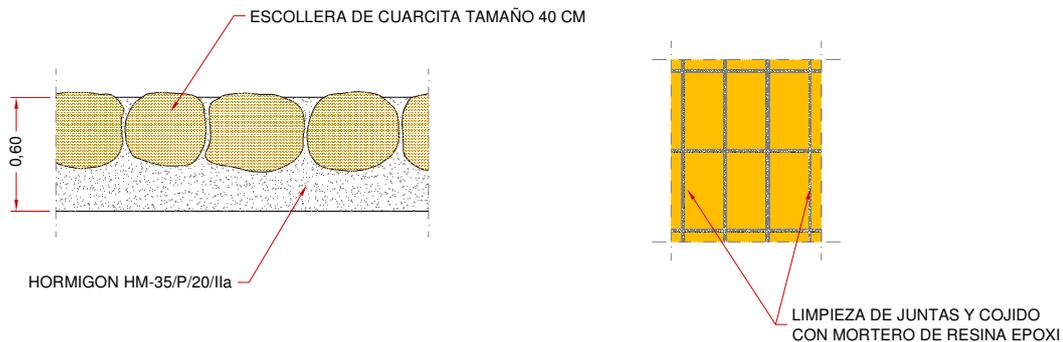
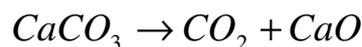


Imagen 11 Reparación del zampeado.

5. Inyecciones de cal.

La cal se consigue mediante calcinación de piedra caliza a unos 1000° C, operación durante la cual pierde su gas carbónico. La ecuación química de la calcinación de la caliza pura se expresa de la siguiente forma:



Mediante la hidratación del producto restante, un óxido de calcio, que se llama cal viva; se obtiene una pasta aglomerante, que es la cal apagada.

La presencia de otros cuerpos de reacción química sensible puede modificar los fenómenos provocados por el apagado y diversificar la composición del producto acabado; la arcilla es el más importante de estos cuerpos. Las cales pueden dividirse en dos tipos en función de la proporción de arcilla:

- Las cales aéreas: Son cales que se componen principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio. Así llamadas porque el proceso de cristalización no puede darse más que en presencia de aire (de ahí la lentitud del fraguado y la posibilidad de conservación de grandes cantidades de cal apagada). No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua. Se obtienen a partir de rocas calizas que no contienen otros elementos.

- Las cales hidráulicas: Deben su nombre al hecho de que el fraguado puede efectuarse en entorno acuoso; es decir, un mortero fresco aún aglomerado con cales de este tipo, puede sumergirse tras haberle dado forma, sin que su endurecimiento se vea interrumpido. Obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas en una proporción superior al 8 % (sílice y alúmina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos de propiedades hidráulicas.

No obstante, calizas con más del 20 % de arcilla no son utilizables para obtener cal.

Los fabricantes españoles sólo fabrican cales aéreas. Las cales hidráulicas que se comercializan no tienen sello CE y de acuerdo a las gestiones realizadas suelen ser mezclas de cal con una pequeña adición de cemento blanco, dado el poco consumo que existe en España de este producto. Por este motivo se decidió la utilización de cal aérea CL-90-S. Además, la utilización de cales hidráulicas en relleno de sillares o trabajos de rejunteo puede llegar a provocar expansiones debido a un fraguado hidráulico más rápido, alcanzando resistencias mecánicas iniciales más altas que el propio soporte, situación que puede originar daños en los paramentos.

La adición de cal aérea a un suelo con una fracción de partículas finas (presencia de tamaños menores 0,063 mm en un porcentaje mínimo superior al 15%) modifica su comportamiento por una conjunción de sus propiedades basadas en la reacción de la cal con la sílice y alúmina presente en la fracción fina.

Al elevar la cal el PH del suelo estabilizado hasta valores de 12,4, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánico es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo o material tratado.

Gracias a los sondeos que se realizaron en la estructura del puente, se pudo apreciar la presencia de finos en el relleno. Las inyecciones en las zonas donde las admisiones eran bajas se hicieron con lechada de cal sin añadir otros elementos, ya que la cal reacciona con los propios finos del relleno.

En los puntos donde se detectó una mayor admisión, debido probablemente a la existencia de oquedades, se inyectó un mortero de cal con adición de arcilla y sílice que provoquen la reacción de la cal.

Los morteros y lechadas de cal no se caracterizan por su gran resistencia, sino por su plasticidad, color, y porque se trabajan con facilidad.

La estabilización propiamente dicha consiste en una mejora a largo plazo (meses/años) por cementación, en función de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla (fracción fina), aumentando la capacidad portante y la resistencia mecánica de material tratado con cal.

En la obtención del mortero de cal, se pueden obtener mezclas con diferentes propiedades variando las dosificaciones de la mezcla. Para seleccionar la dosificación más adecuada a las características de nuestra obra se ensayaron diferentes mezclas en laboratorio. Se emplearon mezclas con arena silicea, tejoleta (arcilla) o ambas.

Los resultados de estos ensayos pueden observarse en los gráficos siguientes (Imagen 12) (Imagen 13).

DOSIFICACIONES ENSAYADAS	MATERIALES UTILIZADOS	CANTIDAD
DOSIFICACIÓN 1	CAL	900
	ARENA SILICEA	2700
	AGUA	25% en peso
DOSIFICACIÓN 2	CAL	1000
	TEJOLETA (ARCILLA)	1400
	AGUA	50% en peso
DOSIFICACIÓN 3	CAL	2160
	TEJOLETA (ARCILLA)	366
	ARENA SILICEA	1080
	AGUA	50% en peso



Imagen 12

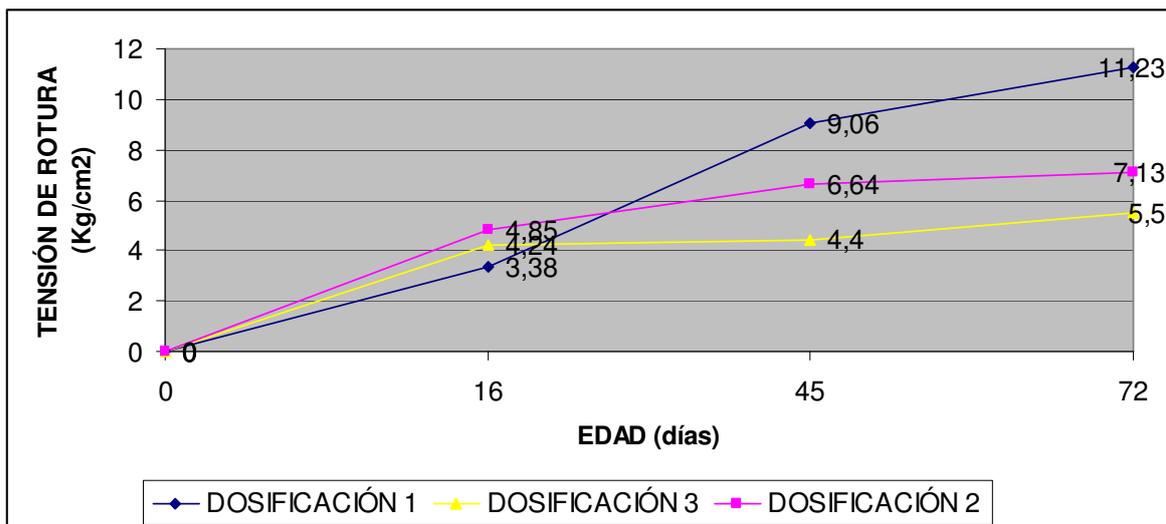


Imagen 13: Evolución de la tensión de rotura.

Se puede observar en el gráfico como el aumento de resistencia se sigue produciendo a largo plazo en las diferentes dosificaciones ensayadas.

6. Agradecimientos:

A Don Gonzalo Moreno, ingeniero proyectista y director de las obra, y probablemente el mayor experto en inyecciones con cal.