

# ENSAYOS Y PUESTA EN OBRA DE LA LIMPIEZA, RESTITUCIÓN, CONSOLIDACIÓN E HIDROFUGACIÓN DE LOS MATERIALES PÉTREOS

Ana Navarro Bosch<sup>1</sup>, Luis Bosch Roig<sup>1</sup>, Pilar Roig Picazo<sup>2</sup> e Ignacio Bosch Reig<sup>1</sup>

Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de València

<sup>1</sup> Análisis e intervención en la arquitectura monumental e histórica

<sup>2</sup> Taller de pintura mural

AUTOR DE CONTACTO: Ana Navarro Bosch, ananavarro@pra.upv.es

**RESUMEN:** *TEn el presente artículo, se describen las diferentes pruebas y ensayos que se han realizado en los Puentes de La Trinidad y Serranos de Valencia, para, en primera instancia, determinar las técnicas más adecuadas a utilizar para la conservación y restauración de sus materiales pétreos y, en segunda instancia, para reconocer su proceso de puesta en obra, con la mínima afección posible al monumento. Igualmente, se explican las técnicas y los procesos que finalmente se han ejecutado en los ámbitos de: la limpieza general y la limpieza específica, las restituciones, tanto de juntas de mortero, como de faltantes pétreos, así como las técnicas y productos de consolidación e hidrofugación aplicados, con reconocimiento de los resultados.*

**PALABRAS CLAVE:** conservación, restauración, ensayos, técnicas, procesos, limpieza, restitución, consolidación, hidrofugación, materiales pétreos, mínima afección

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Valencia no puede entenderse al margen del territorio en el que se asienta, de forma que el meandro del río Turia que inicialmente sirvió de emplazamiento para su fundación como ubicación estratégica, ha condicionado tanto su evolución como el desarrollo de accesos y conexiones con el territorio circundante. Para ello, se hizo necesaria la construcción de puentes que salvando el río Turia, pudieran servir de conexión de la ciudad con los caminos y sectores septentrionales. (Moreno, E. et. al, 2006: 1919-1932)

La construcción de puentes de piedra era una de las grandes empresas edilicias que se acometieron en la Europa medieval, de forma que en Valencia fue la Ilustre Fabrica Vella de Murs y Valls la encargada de llevarla a cabo, mediante la realización de puentes sobre el cauce del Turia de, entre otros, el Puente de la Trinidad en 1407 y el de Serranos en 1518. Ambos se ejecutaron en sus pilas, alzados y bóvedas con piedra tosca de la cantera de las pedanías de Valencia de Rocafort, utilizando como relleno, el hormigón de cal y canto. (Fernández, M., et al, 2006: 1897-1917)

En el año 2005, derivado del avanzado estado de degradación y deterioro aparente de los mismos, y mediante convenio de investigación entre la Universidad Politécnica de Valencia y el Excmo. Ayuntamiento de Valencia, se procedió a realizar los necesarios estudios previos, y consecuentemente con sus conclusiones, se redactó los Proyectos técnicos necesarios para proceder a la Conservación y Restauración de los citados puentes históricos de la Trinidad y Serranos, cuyas obras se han estado realizando durante los años 2007 y 2008.

La investigación previa realizada, desarrollada en los campos histórico, urbano-territorial, gráfico, y tecnológico, ha procedido, en esta última área, a reconocer y catalogar los deterioros y materiales

existentes, estableciendo su caracterización físico-química, los procesos y causas de la degradación, y su comportamiento ante las diferentes condiciones climáticas, acontecimientos históricos, y actuaciones humanas.

De estas últimas, cabe señalar las actuaciones derivadas de los avances y evolución de la tecnología, encontrándose expuestos a situaciones para las que no fueron concebidos, como son, el paso de canalizaciones de agua, gas, electricidad, iluminación y señalización, bajo las aceras, o el continuo tránsito de vehículos pesados como el tranvía (desde el último tercio del siglo XIX a mediados del siglo XX), y autobuses, camiones y vehículos de todo tipo, durante los siglos XX y XXI. (Boquera, A.M. et. al, 2007: 495-505)

El objeto de este artículo, es exponer los diferentes análisis y ensayos realizados para, una vez caracterizados los materiales pétreos, sus deterioros, causas y procesos de degradación, reconocer las técnicas más adecuadas a utilizar para su conservación y restauración, determinando su proceso de puesta en obra, con la mínima afección al monumento. Explicitando así mismo, las técnicas, materiales y procesos que finalmente se han ejecutado en los ámbitos de la limpieza, general y específica; las restituciones de juntas de mortero y de faltantes pétreos; así como en la consolidación e hidrofugación final.

## CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO

El reconocimiento de la piedra Tosca de Rocafort, como material constitutivo de ambos puentes, se estableció mediante la realización de los análisis y ensayos físico-químico-mecánicos, indicados a continuación, necesarios para obtener su caracterización mineralógica y físico-mecánica.

### Ensayos para la caracterización mineralógica de la piedra Tosca de Rocafort

- Para el reconocimiento de las características minerales del material pétreo, se estableció el método de la combinación de varias técnicas de análisis, realizando ensayos con: Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica, Difracción de Rayos X, y análisis químicos. (Roig, P., 2005: 137-158)
- La Microscopía óptica, tanto de bajo poder de magnificación (lupa binocular y microscopio estereoscópico, intervalo de X2-X80), como de alto poder de magnificación, intervalo de X80-X600, con luz transmitida (método petrográfico), o con luz reflejada (método metalográfico), permite conocer la caracterización mineralógica, y la estratigrafía de las diferentes capas del material.
- La Microscopía Electrónica de Barrido MEB-EDX, permite profundizar en las características Texturales y Morfológicas del material, como: porosidad, formaciones cristalinas, desagregación,
- La Difracción de Rayos X, permite confirmar los resultados observados mediante la microscopía óptica, en la composición mineralógica.
- El análisis químico de sales solubles, se considera muy relevante, ya que permite determinar el contenido en sales del material analizado, y por consiguiente conocer su estructura interna de comportamiento ante las mismas.

### Ensayos físico-mecánicos realizados sobre la piedra Tosca de Rocafort

- La concreción de las propiedades físico-mecánicas de la piedra Tosca de Rocafort, para con ello reconocer su comportamiento estructural, y su resistencia a la degradación, se obtuvo mediante los siguientes ensayos:
- Absorción de agua y peso específico aparente, según la Norma UNE 22182, que aporta datos de la densidad, la porosidad, el grado de alteración, ...
- Determinación del coeficiente de saturación y porosidad, según la Norma americana BRE 141<sup>1</sup>, que aporta datos sobre la porosidad
- Resistencia a compresión, según la Norma UNE 22185, que permite conocer su resistencia mecánica, y por tanto hacer una hipótesis rigurosa de su comportamiento estructural.
- Variación dimensional por cambios térmicos y expansión por humedad.
- Resistencia a la cristalización de sales, según la Norma americana BRE 141, que aporta datos de la resistencia a la disgregación interna.
- Resistencia a los ciclos de humedad y secado, según la Norma americana BRE 141, que igualmente aporta datos sobre la resistencia a la alteración interna, como la pérdida de material.

### Resultados de la caracterización de la piedra Tosca de Rocafort

Los resultados de los citados análisis y ensayos, nos muestran un material pétreo travertínico de alta porosidad (26% de porosidad y 12% de absorción de agua), baja densidad (1.747 kg/m<sup>3</sup>), y muy baja resistencia a compresión (5,75-7,91 N/mm<sup>2</sup>). De forma que al compararlos con valores de cantera del mismo material: 10,1% de porosidad; 2,5% de absorción de agua; 2,346 kg/m<sup>3</sup> de densidad,



Figura 1 Retirada elementos metálicos

y 45,9 N/mm<sup>2</sup> de resistencia a compresión, se nos muestran muy inferiores a estos, determinando con ello, el alto grado de degradación en el que se encuentra en la actualidad el material pétreo de los puentes. (Bosch, I., 2006: 192-196)

### RECONOCIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS DETERIOROS Y SUS CAUSAS

Del estudio inicial de la degradación existente sobre el material pétreo, se reconocieron dos tipos de deterioros: de origen físico-químico-ambiental y de origen humano.

Los de origen físico-químico-ambiental reconocidos fueron: la erosión superficial y profunda, la pérdida de sección, la suciedad generalizada, la suciedad intensa, las manchas y costras negras, la afloración de sales, las humedades, la aparición de líquenes y vegetales.

Los de origen humano, han sido los derivados tanto de intervenciones poco apropiadas, como pueden ser el rejuntado con mortero de cemento, o la disposición de anclajes metálicos, como actuaciones vandálicas reconocidas con grafitos o manchas de humos producidas por el fuego.

### Ensayos sobre los deterioros.

El objetivo era determinar los componentes inorgánicos extraños existentes, verificando las diferencias entre el material del monumento y el de cantera, y reconociendo con ello los procesos de alteración.

Para ello, se realizó por una parte el análisis de las costras-manchas negras, con el objeto de conocer su composición interna, y su estructura estratigráfica, lo que nos aporta datos de las causas y procesos de su formación.



Figura 2 Retirada vegetales

Y por otra, el análisis medioambiental con la determinación de los niveles y componentes de la contaminación atmosférica (niveles, tipo y tamaño de partículas en suspensión), junto al control y seguimiento de las condiciones termo-higrométricas y régimen de vientos.

#### **Resultados: causas de la degradación**

De los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones como posibles causas de la alteración:

- Procesos de meteorización (alveolización) por agentes físicos, especialmente el viento.
- Aparición de formaciones cristalinas de  $\text{CaSO}_4$ , a causa de la presencia de un elevado índice de compuestos de azufre en la atmósfera.
- Presencia de cloruros (también de la atmósfera), que, a causa de su gran movilidad, han penetrado a gran profundidad por la red porosa.
- Presencia de nitratos en la superficie, originados por agentes de contaminación atmosférica.
- Incremento de la porosidad y pérdida de la matriz y cemento calcítico de la superficie externa a causa de la acción química. (Bosch, I., 2006: 197)

#### **METODOLOGIA Y RESULTADOS**

Una vez caracterizados el material y los deterioros, y reconocidos sus procesos de degradación, y tras su documentación gráfica y fotográfica, se proyectaron los procesos de intervención adecuados

para paralizar la degradación y evitar el avance de las patologías encontradas. Estos procesos se dividieron en tres grandes apartados: procesos de limpieza, procesos de restitución de materiales pétreos y procesos de tratamiento de consolidación-protección.

La técnica de ejecución de cada uno de estos procesos se ha ajustado y definido a través de los ensayos de puesta en obra realizados previamente a la definición del proyecto de ejecución.

#### **LIMPIEZA DE MATERIALES PETREOS**

Los procesos de limpieza determinados, se dividen en tres grupos que son: limpieza previa manual, limpieza general e intensa y limpieza específica.

#### **Retirada de elementos metálicos, de vegetales y vaciado de mechinales**

La limpieza previa manual, incluye la retirada de elementos añadidos, la retirada de vegetales con aplicación de tratamiento biocida, y, la apertura, limpieza y vaciado de los mechinales.

Los elementos metálicos añadidos se han retirado con medios manuales y/o mecánicos, en función tanto del tamaño del objeto a extraer como de la profundidad a la que éste estuviese anclado. De este modo, se han retirado clavos, ganchos, antiguos anclajes de iluminación en desuso, y todos aquellos elementos que no siendo originales del puente no estén desempeñando ninguna función y por el contrario puedan ocasionar daños sobre el material pétreo. Así mismo, se han retirado los restos de óxido existentes en el interior-exterior del material pétreo.

Los vegetales se han eliminado desde su raíz manualmente con herramientas específicas y, posteriormente, se ha aplicado sobre



Figura 3 Interior galería en pila 4

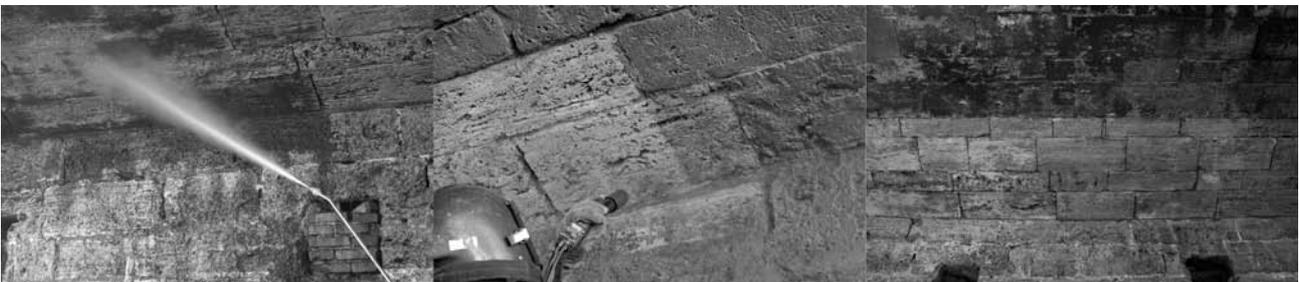


Figura 4 Limpieza general e intensa

el soporte pétreo el tratamiento biocida de la casa comercial BPS, para eliminar de la superficie algas, moho y hongos, en general a la vez que como protección para prevenir la aparición de hongos en la superficie de la piedra.

El método de aplicación del mismo puede ser, bien pulverizado o bien inyectado directamente en función de la superficie de los vegetales existentes y de la profundidad de alcance de las raíces de los mismos.

En ambos puentes, tanto en el de la Trinidad como en el de Serranos los mechinales utilizados como apoyo de las cimbras durante su construcción, son pasantes en todo el espesor de las pilas, y también en ambos casos se encontraban cerrados, al menos superficialmente con ladrillo cerámico macizo.

Durante el proceso de limpieza se ha realizado el vaciado de los mismos, tanto con medios manuales como con medios mecánicos, ejecutando la apertura desde el interior hacia el exterior con objeto de no dañar los sillares de piedra que conforman el perímetro de los mismos.

## DESCUBRIMIENTOS

Un tema de especial interés fue la localización en el Puente de Serranos, durante la apertura de los mechinales, de una galería interior excavada en la parte central de la pila nº 4, que conectaba internamente dos de los mechinales. Sobre la misma se ha realizado tanto un informe histórico como un informe arqueológico y, ambos concluyen con la afirmación, de que dicha galería fue construida durante la guerra de la independencia, en 1808, con la finalidad de poder acumular en ella dinamita suficiente para poder cortar el puente, y frenar con ello el avance de las tropas napoleónicas en su asedio a la ciudad de Valencia.

Sobre cómo impedir el paso de enemigos dinamitando puentes y viaductos De Sojo comenta como colocar las cargas en una pila “... entrando en el ramal por el lado mayor y en el punto medio de cada dos hornillos y, retornando en los dos sentidos en ángulo recto para llegar al emplazamiento de la carga...” (De Sojo, 1909: 233).

Esta metodología de voladura es de iguales características a la que encontramos en la pila 4 del Puente de Serranos.



Figura 5 Limpieza específica de las costras



Figura 6 Limpieza específica de grafitis

La datación, además de por lo anteriormente comentado, ha venido reforzada por los restos de escritura con grafito, encontrados en las paredes del interior de la galería, en los que se puede leer con claridad: "... Reinado Fernando VII ... AÑ... 1810"

#### Limpieza general con agua y con proyección en seco

El apartado de limpieza general e intensa incluye: la limpieza general con agua, y la limpieza intensa con aplicación de productos abrasivos.

Actuando siempre desde el criterio de mínima intervención y utilización de medios de menor a mayor agresividad, en una primera instancia se decidió realizar una primera limpieza general con agua en toda la superficie de los puentes. (Bosch, et al, 2006: 199-210)

Se realizaron ensayos de diferentes métodos de impulsión de agua con el fin de determinar su ejecución concreta de puesta en obra, estos métodos incluían agua nebulizada, cortina continua de agua y agua a presión.

Tras estudiar, tanto los resultados de los ensayos como las necesidades de puesta en obra de los mismos, se consideró como el método más adecuado el de limpieza con agua a presión mediante pistola de alta presión (70-150 BAR), con ángulo de incidencia de 90 grados aproximadamente. Durante su ejecución, tras el primer enjuague de la superficie pétreo, se ha realizado un cepillado de la misma con cepillo de cerdas suave y tras el mismo, un segundo enjuague.

Tras la ejecución de la limpieza general, en aquellas zonas en las que continuaba existiendo un elevado grado de suciedad más intensa, se ha realizado una limpieza intensa con sistemas de proyección de abrasivos. Para determinar los parámetros de la técnica concreta a utilizar, se realizaron ensayos con diferentes boquillas, tipo y diámetro de abrasivos, distancia y presión a aplicar, ...tanto con proyección en seco (micropulling), como en húmedo (torbo). En ambas se ensayaron diferentes partículas como microesferas de vidrio o silicato de alúmina ambas en diferentes diámetros y proyectada a diferentes presiones.

Finalmente la técnica reconocida como la mas adecuada para el caso que nos ocupa, y que fue puesta en obra ha sido la limpieza mediante micropulling con silicato de alúmina de  $\varnothing = 0.02$  a  $0.08$  micras, aplicado con boquilla de  $\varnothing = 5$ mm, con una presión de 1,5 a 2 kg y a una distancia aproximada de 30 cm de la superficie, y con un ángulo de incidencia de  $90^\circ$ .

#### Eliminación de costras-manchas negras

La limpieza específica incluye: limpieza de costras-manchas negras, limpieza de eflorescencias salinas, limpieza de grafitis y limpieza de manchas de óxido.

Para la eliminación de las costras y manchas negras se realizaron ensayos con diferentes productos comerciales específicos en áreas de  $1\text{m}^2$  de superficie pétreo, evaluando para la adecuación del mismo, además del nivel de limpieza alcanzado, la permanencia del tono cromático de la superficie pétreo y de los restos de veladuras de



Figura 7 Restitucion morteros impropios

color almagra originales existentes en la misma.

El producto reconocido como más adecuado para la eliminación de las manchas negras ha sido el “Limpia Fachadas 5” de la casa comercial BPS, cuya composición está formada básicamente por hidróxido sódico.

Su aplicación se ha realizado con brocha de cerda sintética, hasta saturación de la superficie, dejándolo actuar entre 15 minutos y 2 horas, para a continuación realizar las operaciones de frotado con cepillo de cerda fuerte y aclarado con agua a presión (70-150 BAR). En aquellos casos en los que una sola aplicación no ha sido suficiente para eliminar las manchas y costras negras, se ha repetido la operación hasta un máximo de 5 veces.

#### Eliminación de las sales

El elevado y permanente contenido de humedad de la superficie pétreo de ambos puentes, debido a filtraciones de agua, tanto de las fugas provocadas por las instalaciones que pasan bajo sus aceras, como de filtraciones de agua de lluvia a través de zonas sin sellar de la calzada y aceras de hormigón asfáltico actuales, ha sido el causante de la afloración permanente de sales en la gran mayoría de su superficie, en especial de las bóvedas.

La retirada y eliminación de dichas sales ha sido uno de los temas más complejos a determinar.

Para evaluar el adecuado proceso de intervención se han ejecutado ensayos de diferentes composiciones sobre áreas de aproximadamente 1m<sup>2</sup> de superficie con distintos niveles de acumulación de sales.

El proceso seguido ha consistido primero en la eliminación de las sales insolubles, mediante medios mecánicos, para a continuación eliminar con medios químicos las sales solubles. Los medios mecánicos utilizados para la eliminación de la capa de sales insolubles han sido, en primer lugar la proyección en seco (micropulping), realizada previamente en la limpieza general, para a continuación aplicar medios manuales y/o mecánicos de mayor precisión como cincel, microrotores....

En aquellas zonas donde solo existía una fina capa de sales solubles que acababan de aflorar y aparecían como una veladura blanquecina, se han eliminado en seco, mediante aspiración.

Una vez eliminadas las sales insolubles y las sales recién afloradas a la superficie, se ha procedido a la eliminación de las sales profundas, mediante su reblandecimiento con empacos con las siguientes características, dosificación y tiempos de aplicación:

- Composición: sepiolita + arbolcel al 50%, añadiendo hasta saturación la formulación conocida como AB-57.

- El periodo de aplicación ésta en función de la dureza de las sales y tipo de las sales a eliminar, por ello, se han tomado muestras y medido la composición de las mismas, tanto antes como después de la aplicación de los empacos. En todo caso, la aplicación está siendo variable, desde 2 a 24 h de duración.

#### Eliminación de grafitis:

Por último, los grafitis existentes sobre la superficie pétreo del puente fruto de actos vandálicos se han eliminado con un producto específico para ello. Como con el resto de los productos utilizados, se han realizado ensayos con diferentes productos sobre una superficie afectada con este deterioro y se ha valorado tanto la eficacia en su eliminación, como el respeto con la superficie pétreo existente y los restos cromáticos originales que en la misma permanecen en algunas zonas concretas de las juntas, consistente en una trama de color almagra, realizada en el siglo XVIII, con lechada de yeso y pigmento natural.

Como resultado de los ensayos, se estableció como productos comerciales mas adecuados el “Gel anti grafiti 200” reforzado en una segunda limpieza con el producto “Quita sombras 60 gel”. El primero está compuesto por disolventes y agentes espesantes, mientras que el segundo dispone además de hidróxido potásico.

El método seguido para su aplicación ha sido el siguiente: tras aplicar el *gel anti grafiti* con brocha y dejar actuar entre 20 y 60 minutos, se retira con agua a alta presión (150 BAR), y si quedan sombras se aplica el *quita sombras gel* sobre la superficie húmeda con brocha y tras dejar actuar entre 10 y 30 minutos, por último, se retira con agua a alta presión (70-150 BAR).

#### RESTITUCIÓN DE MATERIALES PÉTREOS

La restitución de materiales pétreos incluye tres procesos: sustitución de las juntas de morteros inadecuados; restitución de sillares o elementos pétreos faltantes, como gárgolas; y la reconstrucción-terminación de elementos arquitectónicos recuperados, como lo son las escaleras de conexión con el cauce en ambos puentes, los arriaderos originales del puente de Serranos y el remate de la bajada de carruajes del mismo puente. La eliminación de juntas impropias de morteros de cemento, yeso o mixtos, y su sustitución por mortero de cal, se ha ejecutado según el siguiente proceso: retirado manual del mortero, mediante brochas de cerda, cepillos de raíces espátulas, gradinas y escofinas (nunca con instrumentos de percusión o palanca que puedan romper las aristas de los sillares sobre los que se forman las juntas), para a continuación aplicar soplado con aire a presión controlada para la eliminación de los detritus y material disgregado.



Figura 8 Restituciones pétreas



Figura 9 Recuperación de los arrimaderos-aptaderos

### Rejuntado con morteros de cal:

En una primera instancia, se realizaron ensayos “in situ”, sobre las propias juntas a restituir, distribuyéndolas en distintas zonas del puente donde la luz incide de forma diferente, para así poder verificar su adecuada tonalidad.

El objetivo era determinar tanto la composición mas adecuada para mantener su estabilidad, como la determinación del cromatismo mas adecuado del mortero de cal de restitución en su relación con el tono del material pétreo.

Tras analizar los resultados de los ensayos, y dadas las dimensiones de las juntas, con una profundidad media de 6 cm, se decidió la realización de la restitución de las juntas en dos fases, temporalmente distanciadas, utilizando dos morteros de cal: el primero, como mortero de base y el segundo como acabado superficial.

El mortero de base está compuesto por cal hidráulica y arena en proporción (1:3) y, a su vez el mortero de acabado final está compuesto por cal grasa y cal hidráulica en partes iguales y arena en proporción (1:3).

El proceso de puesta en obra de los mismos ha sido el siguiente: en primer lugar humedecer la superficie con agua desionizada; sobre ella, aplicar el mortero base con espátula, pasando una esponja al empezar su fraguado para conseguir una superficie mas rugosa y de mejor adherencia a la capa de mortero de acabado y, posteriormente, tras humedecer de nuevo la superficie con agua desionizada, ejecutar

el mortero de acabado final y, cuando éste inicia su fraguado, y se presenta “tirante”, pasar un cepillo de cerdas con el fin de sacar el grano y conseguir la textura adecuada.

### Ensayos realizados:

No obstante lo anterior, y al presentarse en las zonas mas expuestas a la humedad, un claro incremento del volumen de la capa de mortero de terminación, con un proceso de expansión de dentro a fuera, se procedió de inmediato a la realización de nuevos ensayos y análisis de laboratorio, con el fin de determinar las causas de este incremento volumétrico, y reconocer el proceso a seguir para evitar su aparición.

El objetivo era determinar la composición mas adecuada para mantener su estabilidad, en un medio adverso, caracterizado por la alta concentración de humedad interna y por la afloración continua de sales solubles.

Para ello, se han ensayado seis composiciones diferenciadas de mortero de cal, cuya composición y nomenclatura se detalla a continuación:

M1\_cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:1) y arena en proporción (1:3)  
 M2\_cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:2) y arena en proporción (1:4,5)  
 M3\_cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:1) y arena en proporción (1:4,5)

ML1\_cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:1) y arena en proporción (1:3) y el aditivo Primal al 0,25%

ML2\_cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:2) y arena en proporción (1:4,5) y el aditivo Primal al 0,25%

ML3\_cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:1) y arena en proporción (1:4,5) y el aditivo Primal al 0,25%

Para la observación del comportamiento en obra de los anteriores morteros, y con el fin de seleccionar el más adecuado, se seleccionaron dos zonas diferentes localizadas en los Vanos 1 y 2 del Puente de la Trinidad, donde el mortero de juntas presentaba un mayor grado de deterioro, apreciándose su hinchamiento, falta de cohesión, presencia de sales tanto en el mortero como en el material pétreo y elevada humedad.

Tras la aplicación de los diferentes morteros se ha llevado a cabo el seguimiento de los mismos, con el propósito de evaluar su diferente comportamiento en obra, poniendo especial hincapié en aspectos como la consistencia, aparición de grietas, hinchamiento, presencia de sales, etc..., con el fin de seleccionar aquel que presente unas propiedades óptimas.

A los 15 días de la aplicación de los morteros en obra, los que presentan una óptima consistencia son: ML1, ML2 y ML3, como era de esperar ya que son los morteros que llevan aditivos, mientras que en lo que respecta a la aparición de depósitos salinos, los morteros M1, M2 y M3 han presentado un comportamiento mejor en ambas zonas, aunque en la zona en la que el soporte pétreo se encuentra permanentemente en un estado muy elevado de humedad, también han presentado un buen comportamiento ML1, ML2 y ML3.

A partir de los morteros preparados en obra, se prepararon probetas en el laboratorio sobre las que se han realizado ensayos para comparar el comportamiento hídrico de los mismos y su durabilidad frente a contrastes termohídricos y la presencia de sales.

Se realizaron 6 probetas (dimensiones: 5 cm x 2,5 cm x 1 cm) de cada uno de los morteros ensayados y estas probetas se han estado sometiendo a diferentes ensayos de laboratorio como: Absorción de agua por capilaridad, Absorción de agua por inmersión total o Absorción libre, Ciclos de cristalización de sales por inmersión parcial, ensayos de envejecimiento artificial acelerado y Ciclos de heladicidad o de hielo-deshielo. Antes y después de cada ensayo se han tomado datos del peso de cada una de las probetas, así como antes, durante y después de cada uno se han evaluado la consistencia, aparición de grietas, hinchamiento, presencia de sales, etc...

En una primera instancia, los morteros que han presentado una mayor estabilidad tras los ensayos realizados, han sido el M2 y el ML2, mientras que el resto de probetas han sufrido mayores alteraciones.

Tras 21 días de puesta en obra de los morteros, se han tomado muestras de los mismos y estas se están sometiendo a ensayos de laboratorio de los que aun no se dispone de resultados, por ello, las conclusiones con relación al tipo de mortero a utilizar aun no son definitivas, aunque todo apunta a que el mortero tipo ML2 compuesto por cal aérea + cal hidráulica en proporción (1:2) y arena en proporción (1:4,5) y el aditivo Primal al 0,25% podría ser el que reuna las mejores características para ser utilizado en obra.

Todos estos ensayos, han sido realizados en el laboratorio físico-químico del IRP, Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV. (Roig, P., 2008: 146-154)

#### **Restituciones pétreas:**

Para la ejecución de las restituciones pétreas vinculadas con reposiciones de faltantes, como sillares, gárgolas, o terminación de los copetes base de los originales casalicios del puente de Serranos, se han empleado los sillares de piedra de la cantera de Godella, recuperados del propio puente de Serranos, bien derivado del desmontaje de los copetes de los tajamares o bien de los tramos del

propio pretil desmontados para la reconstrucción de los apartaderos-arrimaderos, o recuperados del puente de la Trinidad, al realizar la apertura en el pretil para el paso a las escaleras de conexión con el cauce del río Turia.

Esta piedra de la cantera de Godella, muy próxima a la de Rocafort y estando ésta agotada, se utilizó a finales del año 1808 para la reposición de los pretils que unos meses antes se habían retirado para evitar que fueran utilizados como elementos de protección para el avance de las tropas napoleónicas. (AMV, Libros de Fábrica Nueva del Río, II.II-80,1808-1811)

Las restituciones de reparación y/o reposición de faltantes se han ejecutado mediante cajeados de entre 10 y 15 cm de profundidad, colocados "a hueso" en el punto de contacto con el sillar que completaban y respetando la trama de juntas entre sillares existente. Su terminación textural, en las caras de nueva factura, se ha realizado con abujardado de media intensidad.

Por otra parte, todas las piezas colocadas de nuevo, han sido marcadas con el número 2008, en referencia al año de la intervención, con el fin de que puedan ser fácilmente identificadas en el futuro.

Dado que en la intervención se ha recuperado el sentido lógico y original de la evacuación de aguas del tablero de los puentes, a través de sus gárgolas, es por lo que se han restituido aquellas gárgolas que con el paso del tiempo habían desaparecido, total o parcialmente.

Las nuevas gárgolas se han tallado manualmente, utilizando la piedra de Godella, recuperada del pretil, según lo comentado anteriormente, con una definición gráfica según un dibujo esencializado de las gárgolas originales. Como terminación textural se les ha dado un acabado superficial abujardado.

#### **Arrimaderos-apartaderos de Serranos y escaleras de Trinidad:**

La reconstrucción-recuperación de los arrimaderos del puente de Serranos, así como la terminación de la bajada de carruajes en su conexión con el río, al igual que la terminación de las escaleras de conexión del puente de la Trinidad con el lecho del cauce, y ante la imposibilidad de utilizar piedra de las canteras de Rocafort o de Godella, por estar cerradas y agotadas desde hace muchos años, se han ejecutado utilizando la piedra de la Cantera de la Sierra Valenciana de Montesa, que es una piedra amable, con coqueras, y con una tonalidad ocre pálido, muy próxima a la de la piedra original con la que se construyeron ambos Puentes.

Esta proximidad entre ambas tonalidades de la piedra, se obtiene con toda su intensidad, al recibir en su superficie los rayos de la luz solar, una vez que la misma se ha tratado con el acabado correspondiente, bien sea bujarda, cancel, gradina o scoda.

La recuperación-reconstrucción de los apartaderos-arrimaderos originales del Puente de Serranos, que ya aparecían grafiados en la vista de Valencia realizada por Wijngaerde en 1563, así como la reconstrucción-terminación de las escaleras del puente de la Trinidad, se ha realizado siguiendo en la intervención criterios de analogía y mecanismos de transición, de forma que se busca aunar dos planteamientos tradicionalmente encontrados: la necesaria armonía entre lo nuevo y lo preexistente y la diferenciación consciente entre ellos. (Capitel, 1988: 53-85)

El reconocimiento de la diferenciación consciente, se ha planteado en base al tipo, despiece y acabado de la piedra, de forma que en la reconstrucción másica, se han utilizado piezas de grandes dimensiones que se apoyan sobre los tajamares (en el caso de los arrimaderos), o completando la geometría de las escaleras (en el caso de Trinidad), formando en su unión un oscuro perimetral de 5cm de espesor y profundidad, lo que permite una lectura clara del dialogo sutil desde la autonomía de ambas actuaciones: la nueva y la preexistente.



Figura 10 Reconstrucción de las escaleras Puente de la Trinidad

### Bajada de carruajes del puente de Serranos

En el remate de la bajada de carruajes con el cauce del río Turia, dado que todos los indicios gráfico-documentales, desde el plano de Valencia del Padre Tosca de 1704, pasando por el plano de Tosca actualizado por Fortea en 1738, hasta el grabado de Teodoro Llorente de 1887 y las fotografías de J. Laurent de 1870, apuntaban a que la citada bajada de carruajes se nos presenta en la actualidad con su dimensión original, tanto en anchura como en longitud, y que ha sido la topografía del cauce la que ha variado, descendiendo 2 metros respecto de su nivel original, el Proyecto planteaba la recuperación del concepto original, con reconstrucción de la topografía del cauce, mediante su esencialización geométrica, de forma que la actual bajada de carruajes se posara suavemente sobre el lecho del cauce, sin crear tensión alguna, a través de un plano-rampa circular del 6% de pendiente. (Navarro, A. et. al, 2006: 1867-1884)

Al no obtener la autorización de la Dirección General de Patrimonio de la Generalitat Valenciana, a lo propuesto en el Proyecto, se ha ejecutado la solución indicada por la citada Dirección General, consistente en su prolongación geométrica, planteada con continuidad morfológica y material, con igual pendiente y anchura.

Su materialización, al igual que los apartaderos y las escaleras, se ha realizado con piedra de la cantera de Montesa, buscando la diferenciación consciente en el despiece de grandes dimensiones, que a su vez, se plantea como una simplificación y abstracción de las trazas geométricas transversales de los resaltes existentes en el tramo original.

Como en el caso de los apartaderos y de las escaleras, se produce el diálogo sutil entre lo nuevo y lo preexistente, tanto a través del

tipo, dimensión y tratamiento de la piedra, como en la disposición de elementos intermedios en las zonas de contacto, en este caso elementos lineales de acero inoxidable, a modo de oscuro en su unión con el muro-pretil del río, y como imbornal lineal de recogida de aguas pluviales, en su unión con la bajada original.

### PROTECCION DE LOS MATERIALES PÉTREOS

Como acabado final tras ejecutar todos los procesos de limpieza y restitución ya explicados, se plantea la aplicación de una protección superficial, con el fin de conseguir que la intervención realizada perdure en el tiempo. Esta protección consiste en la aplicación de un producto consolidante y un producto hidrofugante.

### Ensayos realizados

Dado el elevado grado de humedad existente en el soporte pétreo de ambos puentes los posibles productos comerciales a utilizar han sido ensayados primero en el laboratorio del IRP, y con posterioridad en la propia obra, para poder reconocer el más adecuado.

De este modo se han ensayado los consolidantes FK26-1 de la casa comercial FAKOLITH compuesto por silicato de potasio; KSE300 de la casa comercial Remmers compuesto por éster del ácido silícico; y Sikacolor 501W de la casa comercial Sika compuesto por dispersión acrílica. Igualmente se han ensayado los hidrofugantes FAKOLITH FK-7 de la casa comercial FAKOLITH compuesto por alquilsiloxanos en emulsión; Funcosil IC de la casa comercial Remmers compuesto por alquilsiloxanos en crema; Aqueux de la casa comercial Kalon compuesto por polisiloxanos en dispersión; y Sikaguard 703W de la casa comercial SIKA compuesto por alquilsiloxanos en dispersión.

Para la realización de los ensayos, se ha elegido una zona del puente de la Trinidad, con un alto nivel de humedad interna, que aflora al exterior con claridad, de forma que las condiciones sean las mas adversas posibles.

Una vez transcurridos 15 días desde la aplicación de los productos sobre la superficie pétreo, se ha procedido a la extracción de tres testigos de 2 cm de diámetro y 2cm de profundidad, de cada una de las superficies pétreas tratadas con los materiales a ensayar, para a continuación realizar en el laboratorio, los análisis físico-químicos, mediante microscopía electrónica de barrido SEM, para poder determinar el poder de ligazón del consolidante en la estructura interna de la piedra, el poder de penetración de ambos, consolidante e hidrofugante, así como la adecuada formación de la malla protectora del hidrofugante, de forma que no permita la entrada de humedad de fuera a dentro, en la piedra, a la vez que si le permite transpirar de dentro a fuera.

Los resultados han permitido identificar como el consolidante mas adecuado el FAKOLITH Multil-lite FK-7, y como hidrofugante el FAKOLITH FK-7. Ambos productos deben ser aplicados un mínimo de tres pasadas, con brocha o rodillo hasta saturación superficial aparente, en cada una de las aplicaciones.

## AGRADECIMIENTOS

El presente artículo se desarrolla en el marco de las investigaciones derivadas de la concesión, por el Ministerio de Educación y Ciencia, del Proyecto de Investigación del Plan Nacional, referencia: BIA 2005-09377-C03-01.

Los autores del presente artículo, desean dejar constancia de su agradecimiento a las personas y empresas que con su colaboración han ayudado al buen fin del trabajo expuesto.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros

AMV (1808-1811): *Libros de Fábrica Nueva del Río*, II.II-80. Valencia.

Bosch Reig, I. (2006): *Intervención en el patrimonio: Análisis tipológico y constructivo. El caso de la Real Capilla de la Virgen de los Desamparados de Valencia*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Capitel, A. (1988): *Metamorfosis de los monumentos y teorías de la restauración*, Alianza. Madrid.

De Sojo, F. (1909): *Minas militares terrestres. Lecciones explicadas en la Academia de Ingenieros*, Tomo II.

García Gallego, J. (1994): *Técnicas aplicadas de limpieza, consolidación y restitución, en Tratamientos y Conservación de la piedra en los monumentos*, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid, Madrid, 65-82.

Gómez González M. L. y Gómez Espinosa T. (2001): *Composición y características técnicas de adhesivos aplicados a la Conservación y Restauración. Aplicación de adhesivos en el tratamiento de obras de patrimonio pictórico, documental, arqueológico y etnográfico*, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Sevilla.

Lazzarini, L. y Laurenzi Tabasso, M. (1986): *Il Restauro della Pietra*, CEDAM, Padova.

Martinez Boquera A., Alonso Durá A. y Bosch Reig I. (2007): 'Structural analysis for the diagnosis of cracking in the Gothic masonry structures of the vaults of Serranos Bridge in Valencia, Spain', en *5ª International Conference on Arch Bridges*, Madeira.

Mas i Barberá, X. (2006): *Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Navarro Lizandra, J. L. (2002): *Maquetas, modelos y moldes. Materiales y técnicas para dar forma a las ideas*, Publicacions de la Universitat Jaume I. Serveis de Comunicació i Publicacions, Castellón.

Roig Picazo, P. (2005): *Estudio técnico, analítico y estilístico de obras de arte*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

### Capítulos de libro

Bosch Reig, I. (2008): 'La transformación y la innovación claves en la permanencia de la arquitectura', en *Il pensiero di Cesare Brandi dalla teoria alla pratica*, Lurano, Italia, 137-158.

Roig Picazo, P. (2008): 'La ricezione della teoria e della prassi del restauro di Cesare Brandi in Spagna. L'esempio dell'Università Politecnica di Valencia', en *A 100 anni dalla nascita di Cesare Brandi. Cesari Brandi Oggi Prime ricognizioni*, Il Prato, Saonara (Pd), 146-154.

### Artículos en actas de congresos

Fernández, M., Carmona, P. y Bosch, I. (2006): 'Lectura histórica-cultural de los puentes históricos de Serranos y Trinidad' en *Preprints 16th International Meeting on Heritage Conservation*, 2-4 Noviembre 2006, Valencia, 1897-1918.

Moreno, E., Navarro, A., Alapont, J.L. y Bosch, I. (2006): 'Lectura urbana de los puentes históricos del río Turia de la ciudad de Valencia' en *Preprints 16th International Meeting on Heritage Conservation*, 2-4 Noviembre 2006, Valencia, 1919-1932.

Navarro Bosch, A., Bosch Roig, L., Roig Salóm, J.L., Doménech Carbó, Mª T. y Bosch Reig, I. (2006): 'Lectura constructivo-tecnológica de los puentes de Trinidad y Serranos de la ciudad de Valencia: materiales pétreos, daños y causas' en *Preprints 16th International Meeting on Heritage Conservation*, 2-4 Noviembre 2006, Valencia, 1867-1884.

### Artículo de revista

Alcalde Moreno, M. y Villegas Sánchez, R. (2003): 'Indicadores de alteración de los materiales pétreos', en *Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Cuadernos Técnicos nº 8*, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Junta de Andalucía Consejería de cultura, Granada.

English version

**TITLE:** *Tests and the cleaning, restitution, consolidation and hidrofugation work done on the stonework.*

**ABSTRACT:** *This article describes different tests and assays that have been carried out on the Trinidad and Serrano bridges of Valencia to firstly determine the most appropriate techniques used to conserve and restore their stonework and, secondly, to understand the execution techniques that affect these monuments as little as possible. Likewise, this work explains the techniques and processes performed in the areas of general and specific cleaning, restoration work to replace missing mortar and masonry, as well as the consolidation and waterproofing techniques and products applied with acknowledged results.*

**KEYWORDS:** *Conservation, restoration, assays, techniques, processes, cleaning, replacement work, consolidation, waterproofing, minimum effects*