

Estudio petrológico sobre la restauración del Circo Romano de Toledo



Octubre 2011

DIRECCIÓN

Jose M^a García de Miguel

EQUIPO

Javier Angel Ramírez Masferrer
Miriam Esteban Benito



uniTwin



UNESCO Chair in
Mining and Industrial
Heritage



INDICE

1	Introducción	4
2	Objetivos	4
3	Estudios realizados	4
4	Materiales.....	5
5	Metodología, muestras e instrumentación.....	8
	5.1 Metodología empleada.....	8
	5.2 Muestras.....	8
	5.3 Instrumentación.....	8
	5.3.1 Microscopio electrónico de barrido	8
	5.3.2 Microscopía óptica	9
	5.3.3 Lupa Binocular	9
	5.3.4 Difracción de rayos X.....	10
	5.3.5 Fluorescencia de rayos X.....	10
	5.3.6 Porosimetría	11
6	Resultados.....	12
	6.1 Mortero.....	12
	6.1.1 Caracterización de la muestra mediante DFRX	12
	6.1.2 Caracterización de la muestra mediante FRX.....	12
	6.1.3 Caracterización de la muestra mediante microscopía óptica.....	18



6.1.4	Caracterización del mortero mediante lupa binocular.....	18
6.1.5	Caracterización del mortero mediante porosimetría.....	19
6.2	Costra negra	21
6.2.1	Caracterización de la composición de la costra negra mediante MEB	21
6.2.2	Análisis MEB de la extracción salinas	24
7	Cartografía de sales y humedades.....	27
8	Tratamientos y MEB.....	36
8.1	Tratamientos empleados.....	36
8.2	Muestras.....	38
8.3	Conclusiones sobre la observación de los tratamientos.....	44
9	Diagnóstico y actuaciones recomendadas	45
9.1	Introducción	45
9.2	Disolución kárstica del mortero.....	45
9.3	Contraste térmico.....	47
9.4	Ataque por sales y heladas	48
9.5	Formación de costra negra.....	50
9.6	Biocolonias.....	51
9.7	Otras actuaciones.....	51
10	Técnicas	52
10.1	Relleno de oquedades y morteros de reintegración.....	52
10.2	Apeos, cosidos y anclajes	54
10.3	Extracción de sales.....	57
10.4	Tratamientos biocidas	58



10.5	Consolidación con ésteres silícicos.	59
10.6	Hidrofugación.	61



1 Introducción

Por KERKIDE S.L. se encargó a la cátedra de petrología de la ETSI Minas los estudios destinados a conocer los materiales, diagnosticar los procesos de degradación y establecer las medidas correctoras para apoyar las labores de intervención en el Circo Romano de Toledo.

Para la ejecución de ensayos y análisis así como de la cartografía de sales y humedades se contó con el equipo propio de la Cátedra y sus laboratorios así como con el Laboratorio de Microscopia Electrónica del Centro de Ciencias Ambientales del CSIC.

2 Objetivos

El objetivo de este estudio es obtener un conocimiento de las características petrológicas, de los procesos de degradación y de las posibles vías de prevención y conservación de los materiales. Así como aportar datos técnicos para el conocimiento histórico de los eventos que han podido afectar al monumento, para finalmente establecer las bases para apoyar la intervención destinada a su conservación.

3 Estudios realizados

Para alcanzar los objetivos expuestos anteriormente se han realizado los siguientes trabajos:

- Visita al monumento y obtención de muestras
- Caracterización de los procesos de alteración, mediante cartografía de humedades y sales.
- Análisis químico de los productos de alteración.
- Estudio petrofísico de los materiales.
- Estudio de los posibles tratamientos superficiales.
- Interpretación y discusión de los resultados y redacción de informe.

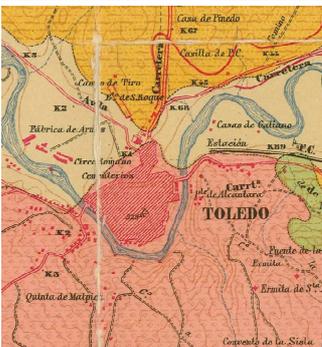
4 Materiales

Se conserva el opus caementicium, habiéndose perdido el recubrimiento. En las bases de las pilas entre los arcos aparecen señales del encofrado, seguramente original, quizá por haber permanecido enterrados largo tiempo, siendo descubiertos por recientes excavaciones.

El hormigón romano del circo aparece constituido por un mortero de cal que cementa piezas homométricas, decimétricas, angulosas, de piedra local.



Los revestimientos se han perdido. El opus caementicium está formado por fragmentos homométricos angulosos de piedra local. Las tongadas de cal constituyen vías preferentes de infiltración del agua.



Geología del entorno. En salmón el estrato cristalino del que procede la piedra del circo.

Dicha piedra está constituida por materiales para los que la cartografía del Instituto Geológico Minero, a escala 1:200.000, utiliza la denominación ya obsoleta como "Estrato Cristalino". Estos materiales han sido bien estudiados en Toledo por Barbero Gonzales, Luis c., en su tesis doctoral (1992) que lo denomina como Complejo Anatéctico de Toledo (CAT) y se encuentran formados por diversos granitoides y migmatitas. Por consiguiente, desde el punto de vista arqueológico, la piedra utilizada es local

perteneciente a afloramientos próximos o eluviones detríticos del talud que forma la falla del borde sur de la fosa del Tajo, a corta distancia del Circo Romano.



Los fragmentos de roca local pertenecen a granitoides y migmatitas del complejo anatéctico de Toledo.

El aglomerante de cal aparece como un mortero cuyo árido es heterométrico



Marcas de encofrado en las basas de las pilas de los arcos

y poligénico, presentando un índice moderado de redondeamiento, más evidente en los clastos de mayor tamaño que llegan a alcanzar tamaño decimétrico. Aparentemente se trata de elementos aluviales, quizá lavados y aportados por el propio río Tajo que discurre en las proximidades. Predominan en él los granos de cuarzo blanco aunque también aparecen fragmentos

melanocráticos mucho más escasos, así como otros materiales. Los fragmentos de mayor tamaño llegan a estar constituidos por gujarros de roca.



El mortero de cal contiene árido heterométrico poligénico de probable arena de río, donde predominan los clastos de cuarzo blanco, aunque también se presentan minerales melanocráticos. Esporádicamente aparecen guijarros redondeados así como caliches.

El cemento romano se solía realizar con cal hidráulica, lo que permitía su fraguado aún en la parte interna de las estructuras, donde la insuficiente aireación hubiera impedido la carbonatación de cal aérea. Para incrementar la hidráulica de la cal, era usual utilizar fragmentos de ladrillo. Estos fragmentos, sin embargo, no los hemos observado en el mortero del Circo Romano de Toledo. Las características composicionales de este mortero serán investigadas analíticamente. La presencia de silicatos y aluminatos cálcicos serán indicativos de la presencia de morteros hidráulicos, pero estos componentes no siempre son fáciles de detectar.



5 Metodología, muestras e instrumentación

5.1 Metodología empleada

En este apartado se expone, en primer lugar, la toma de muestras realizada y se enumeran los ensayos y análisis efectuados a cada una de ellas. A continuación se relacionan los protocolos de los ensayos realizados en laboratorio y se exponen los fundamentos teóricos de las técnicas empleadas.

5.2 Muestras

A continuación se expone una tabla de la relación de ensayos y análisis realizados.

Muestra	Ensayo_ Análisis
Mortero	Lámina transparente
Costra	Microscopio electrónico
Extracción salina	Microscopio electrónico
Mortero	Fluorescencia RX
Mortero	Difracción RX
Mortero	Porosimetría de mercurio
Mortero	Lupa binocular
Tratamientos de protección	Microscopio electrónico

5.3 Instrumentación

5.3.1 Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido empleado, tanto para el análisis de las pátinas como para las sales, se encuentra en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC. Se trata de un Microscopio Electrónico de Barrido ZEISS DSM 960, que opera a alto vacío, con detectores de electrones secundarios y retrodispersados. El microscopio dispone de un sistema de análisis integrado OXFORD INSTRUMENTS ANALYTICAL-INCA con un detector de Rayos X de tipo EDX (energía dispersiva).

El método de análisis está basado en la generación de un espectro de emisión por parte de la muestra al ser irradiada por un haz de enfoque fino de



electrones. Los rayos X generados proporcionan un espectro característico; este espectro define la composición cualitativa de los elementos químicos en el lugar de incidencia del haz de electrones en la muestra.

La observación de la muestra mediante MEB se puede realizar con radiación retrodispersada o bien con radiación secundaria. En la radiación retrodispersada se observan los distintos componentes texturales, mediante la radiación retrodifundida emitida por la muestra al ser barrida por un haz electrónico, lo que permite diferenciar fases minerales a partir de su diferente densidad. En la radiación secundaria, se observa la radiación electrónica emitida por la muestra al ser barrida por un haz electrónico lo que permite distinguir la morfología de los granos y/o cristales y sus relaciones texturales.

5.3.2 Microscopía óptica

La microscopía óptica de luz transmitida se fundamenta en la observación, mediante un microscopio óptico polarizante – el microscopio empleado ha sido un CARL ZEISS JENAPOL), de una lámina delgada de 30 micrómetros de espesor montada sobre un porta. La técnica permite a observación directa de la mineralogía y textura de la roca en una sección y la información que proporciona se basa ampliamente en la experiencia del observador. La identificación de los minerales se realiza a través de sus propiedades ópticas reconocibles con el microscopio polarizante al ser atravesados por la luz polarizada. Al observarse directamente los granos se aprecia, igualmente, su textura y macroporosidad. Se pueden efectuar cuantitativos mediante la estimación del área ocupada por cada fase. Esto se puede hacer mediante apreciación visual, nuevamente basada en la experiencia del petrógrafo, o mediante análisis modal, contando los puntos de una red superpuesta que caen en cada una de ellas.

Para preparar la muestra, se impregna al vacío con una combinación de resina y fluoresceína, se pega sobre un portaobjetos de cristal y se desbasta hasta el espesor señalado de 30 micras. A ese espesor, la mayor parte de los minerales de las rocas son transparentes. Para distinguir los feldespatos potásicos de calcosódicos su pueden teñir los minerales con cobalto nitrito sódico. El feldespato potásico se tiñe de amarillo y el calcosódico no.

5.3.3 Lupa Binocular

En este estudio se estudian cada uno de los morteros a través de lupa binocular seleccionándose las partes más representativas para determinar las características micro y macroscópicas de las muestras.



Mediante esta observación se obtienen características básicas de: color, estructura, forma y tipos de áridos, oquedades, porosidad superficial, eflorescencias, manchas, posibles desintegraciones, presencia de microorganismos, etc.

5.3.4 Difracción de rayos X

La aplicación fundamental de la difracción de rayos X es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina. La difracción está basada en las interferencias que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa la muestra en polvo. En función de la red cristalina de los minerales presentes, esta radiación sufrirá una serie de reflexiones (en realidad difracciones) características de cada mineral, según la conocida ley de Bragg, que relaciona el ángulo de reflexión (θ) con la longitud de onda utilizada (λ) y el espaciado entre los planos reticulares de la estructura (d)

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

donde n , es un número entero.

Esta técnica se realiza mediante la molienda de la muestra por debajo de 40 micras, previo a la introducción de la misma en un difractómetro. El difractómetro empleado es un PHILLIPS BW-1404 del Laboratorio Centralizado de la E.T.S.I. de Minas de la UPM. Los resultados obtenidos se pueden representar como un listado de los picos principales, o bien, como un gráfico de intensidad de radiación en función del ángulo de incidencia del rayo. Éstos deben después interpretarse en función de los patrones publicados para cada mineral.

5.3.5 Fluorescencia de rayos X

La Fluorescencia de Rayos X tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como semicuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y uranio (U). En el análisis cuantitativo se dispone de un calibrado para muestras geológicas y similares, con patrones de referencia internacional. Los elementos mayoritarios que se determinan son: Al_2O_3 , P_2O_5 , K_2O , CaO , SiO_2 , TiO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O y como elementos traza: V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ba, Nb, Rb, Sr, Y, Zr, U, Th, Pb, S.

Esta técnica nos facilita los resultados en porcentaje de óxidos y en porcentaje de elementos químicos.



Estos análisis fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del C.A.I., perteneciente a la Universidad Complutense de Madrid.

5.3.6 Porosimetría

Esta técnica permite el material, generando datos cualitativos y cuantitativos del sistema poroso que presenta, basándose en la intrusión de mercurio en función de las variaciones de presión.

Para los ensayos se han realizado en el Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC, mediante un equipo PoroMaster Modelo PM-33-8 de la firma Quanta Chrome Instruments.

Las muestras se han cortado la muestras en forma cuasicilíndrica, luego, se han desecado previamente en una estufa de vacío. Esta operación se realiza en un intervalo de temperaturas que oscila entre los 60 y los 65° C, para evitar transformaciones en la estructura de los minerales.

El porosímetro de mercurio, determina la porosidad en función del volumen de mercurio intruido en los poros bajo diferentes presiones. Según la Ley de Jurín, existe una relación entre el diámetro de los poros que el mercurio puede alcanzar y la presión ejercida sobre el líquido metal. El volumen de mercurio introducido es medido por el cambio en la capacitancia eléctrica de un transductor cilíndrico formado por una coraza externa metálica alrededor del vástago del penetrómetro, en el capilar interior de mercurio.

El nivel de mercurio dentro del capilar decae tanto como los poros se rellenan en la muestra bajo incremento de presión, conduciendo a un decrecimiento lineal de la capacitancia eléctrica con el incremento del volumen. Los cambios en la capacitancia son convertidos en volúmenes mediante un factor de calibración del penetrómetro.

La aludida ley de Jurín, expresa que:

$$d = \frac{\gamma \cos \theta}{P}$$

Donde

d: Diámetro del poro en micras

γ : Tensión superficial líquido-aire (γ Hg=480 dinas/cm, a 250° C)

θ : Angulo de contacto líquido-sólido (θ Hg-piedra = 138,6 °)

P: Presión ejercida sobre el líquido en psias



Es decir, para el caso del mercurio y materiales pétreos se tiene la expresión
 $d = 360/P$

El volumen de mercurio intruido es medido por la variación que experimenta el nivel del mercurio en un tubo capilar de sección conocida.

6 Resultados

6.1 Mortero

6.1.1 Caracterización de la muestra mediante DFRX

El análisis mediante DFRX permite identificar diferentes especies minerales. Los compuestos mineralógicos detectados mediante la técnica de DFRX son cuarzo y calcita en mayor proporción seguido de feldespato en menor cantidad.

ANÁLISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X		
Picos intensos	1°	Cuarzo
	2°	Calcita
Picos débiles	2°	Feldespato

6.1.2 Caracterización de la muestra mediante FRX

Se ha realizado un análisis semicuantitativo de la muestra.

Para su análisis se ha preparado una pastilla prensada: (m = 10g y F=250 kN, t= 20 s).

Se expresan los resultados en tanto por ciento en peso como óxidos y como elementos.

El análisis instrumental realizado arroja la siguiente composición en óxidos y elementos:



MTC óxidos	
Compuesto	Concentración (%)
SiO ₂	49,70
CaO	29,99
Al ₂ O ₃	10,31
K ₂ O	3,61
MgO	2,82
Fe ₂ O ₃	1,81
Na ₂ O	0,34
SO ₃	0,71
TiO ₂	0,27
P ₂ O ₅	0,23
BaO	0,09
SrO	0,04
MnO	0,04
Rb ₂ O	0,02
ZrO ₂	0,01

MTC elementos	
Elemento	Concentración (%)
O	42,94
Si	23,23
Al	5,46
K	3
Mg	1,7
Fe	1,26
S	0,28
Na	0,25
Ti	0,16
P	0,10
Ba	0,08
Sr	0,04
Mn	0,03
Rb	0,02
Zr	0,01

Cálculo normativo

Con los datos aportados por la fluorescencia de Rayos X, se ha llevado a cabo un cálculo normativo para determinar las sustancias presentes.

La metodología seguida es la siguiente:

Los porcentajes en óxidos se dividen por los pesos moleculares de esos óxidos metálicos. De esta forma se obtienen magnitudes proporcionales al número de moles. Para no trabajar con decimales, los resultados se multiplican por 1000, obteniéndose los equivalentes moleculares por 1000.

Con los porcentajes moleculares de los diferentes óxidos, así calculados, se comienzan a formar minerales o sustancias, hasta que se agotan los componentes. De esta manera se obtienen magnitudes proporcionales a los moles de cada mineral que se recalculan a porcentajes.

Estos porcentajes en moléculas, se pueden calcular en peso de cada una de las sustancias o minerales, sin más que multiplicar por el peso molecular correspondiente, y recalculan a 100.

Posteriormente, para comparar los resultados del análisis normativo realizado sobre los datos suministrados por la fluorescencia de rayos X, con los datos



modales, obtenidos mediante la estimación visual de porcentajes a partir del análisis petrográfico, los porcentajes en peso se dividen por la densidad de cada fase mineral y se recalcula a 100.

La comparación se establece en un cuadro aparte (derecha), donde aparecen los porcentajes en volumen calculados y estimados en petrografía. Hay que destacar que la petrografía solo puede informar acerca de la mineralogía del árido, ya que las fases minerales de matriz, por mantener un tamaño de grano submicroscópico, no pueden ser identificadas normalmente, únicamente se apreciará su proporción como conjunto con respecto al árido. Por otro lado, la fluorescencia, debido a la propia naturaleza del método, no puede informar de la porosidad, mientras que la petrografía sí lo hace, al menos en lo que se refiere a la de rango de poro en tamaño suficiente para ser apreciada mediante esta técnica (superior a unos 10 micrones). Ello lleva a algunas discrepancias aparentes que es preciso tener en cuenta a la hora de comparar porcentajes entre uno y otro tipo de análisis. Lo mismo se puede afirmar respecto a los fragmentos de roca que pudieran estar presentes en el árido, apreciados mediante la petrografía, pero que el análisis normativo incorpora a las fases minerales.

Esta manera de calcular se basa en que la observación petrográfica que se realiza en sección plana de la muestra, si la muestra es isótropa (aproximación válida en rocas no esquistosas, ni laminadas o en morteros), tal como enseña la estereotomía, los volúmenes son proporcionales a las áreas medidas, permitiendo una comparación entre la estimación visual en lámina transparente y los cálculos normativos referidos a volúmenes.

Hay que señalar que los resultados de cálculos estequiométricos normativos dependen en gran medida del orden en que se vayan formando los compuestos. Ésta es una decisión arbitraria que en el análisis de rocas responde a un acuerdo denominado la catanorma CPIW1, o norma internacional. No existe nada similar, en cambio, para los morteros. El orden elegido se basa en nuestra experiencia en el conocimiento de estos materiales históricos, y la concordancia obtenida entre el análisis modal petrográfico y el normativo, parece avalar el sistema.

Este cálculo estequiométrico es especialmente útil, cuando existe componente pórtland en los morteros, muy difícil de determinar directamente mediante el simple análisis, a menos que por difracción de rayos X se pudieran identificar fases pertenecientes, únicamente, a este tipo de componente, lo que no suele ocurrir. Para ello, el aluminio presente se podría atribuir a silicatos de aluminio

1 CPIW De Cross, Pearsons, Idding, y Washington, quienes la propusieron, la norma internacional aceptada para el cálculo de la mineralogía normativa de las rocas.



componentes del pórtland o a componentes minerales en el árido que lo contienen. Si la petrografía señala la presencia de feldespato o filosilicatos en el árido, el aluminio se atribuye a estos componentes hasta agotar los cationes correspondientes de sodio y potasio. El exceso de alúmina, si existiera, se atribuye a silicato de alúmina del pórtland.

Los resultados se expresan en el siguiente cuadro



		CaO	SO3	SiO2	Al2O3	MgO	Fe2O3	K2O	Na2O	P2O5	MnO	Cl	TiO2										
		56,08	80,07	60,09	101,96	40,32	159,70	95,92	61,98	141,94	70,94	35,45	79,87										
		29,99	0,71	49,70	10,31	2,82	1,81	3,61	0,34	0,23	0,04	0,00	0,27	suma									
		0,53	0,01	0,83	0,10	0,07	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,59									
minerales	PM	E.MOL %	CaO	SO3	SiO2	Al2O3	MgO	Fe2O3	K2O	Na2O	P2O5	MnO	Cl	TiO2	E. MOL	MOLES %	PESO	PESO %	P.E.	VOLUMEN	VOLUMEN %	Petrograf. %	Recal. sin porosidad
yeso	136,15	CaSO4	33,06	0,00											0,56	0,79	107,12	1,00	2,30	0,43	1,19		0,00
halita	58,44	NaCl																	2,15	0,00	0,00		
silvinita	75,41	KCl																	1,99				
moscovita	762,34	6 SiO2 3Al2O3 K2O																	2,83			4,00	
ortosa	558,42	6 SiO2 Al2O3 K2O			37,80	3,99			0,00						2,37	3,34	1864,64	17,35	2,55	6,82	18,79		
albita	604,44	6 SiO2 Al2O3 Na2O			37,80	3,99				0,00					0,00	0,00	0,00	0,00	2,62	0,00	0,00		
anortita	278,22	2 SiO2 Al2O3 CaO	25,08		29,82	0,00									3,99	5,63	1567,04	14,58	2,65	5,50	15,17	6,00	
silimanita	162,05	SiO2 Al2O3																	3,15				
silicato potásico	156,01	SiO2 K2O																					
hematites	159,70	Fe2O3						0,00							0,71	1,01	160,59	1,49	5,10	0,29	0,81	1,00	1,25
dolomita	140,40	MgO CO2 Ca CO2	20,68				0,00								4,40	6,21	871,23	8,11	2,90	2,80	7,71		
calcita	100,08	CaO CO2	0,00												20,68	29,19	2921,31	27,19	3,00	9,06	24,98	50,00	
wollastonita	116,17	SiO2 CaO																	3,30	0,00	0,00		
pirolusita	70,94	MnO									0,00				0,04	0,05	3,55	0,03	4,80	0,01	0,02		
pentóxido de fósforo	141,94	P2O5								0,00					0,10	0,14	20,41	0,19	3,18	0,06	0,16		
rutilo	79,87	TiO2													0,21	0,30	23,96	0,22	4,20	0,05	0,15		
cuarzo	60,09	SiO2			0,00										37,80	53,35	3205,64	29,83	2,65	11,26	31,03	30,00	37,50
SUMAS															70,85	100,00	10745,47	100,00		36,28	100,00	91,00	38,75
frags roca																							
Arido 45,00 56,25																							
Aglomerante 50,00 62,50																							
Porosidad 5,00																							
100,00 118,75																							

La baja proporción de aluminio se justifica, simplemente con las micas y feldspatos del árido. Por consiguiente todo parece indicar que se trata de un mortero de cal aérea. Esto parece confirmarse por la ausencia de disilicato cálcico y aluminatos cálcicos, es decir, ningún componente hidráulico en la difracción de rayos X. Por lo demás no presenta ninguna particularidad significativa desde el punto de vista químico. Por lo demás se trata de un mortero 1:1 tal como muestra la petrografía. Sin embargo, este dato hay que corregirlo por el hecho de que la granulometría del árido es muy heterogénea y tanto en la fluorescencia como en la lámina, se excluyen granos muy gruesos. Teniendo en cuenta la influencia de estos granos, la proporción de árido será superior a la de cal en una proporción indeterminada. Para su cálculo, habría que realizar otro tipo de analítica que excede los límites económicos y temporales de este informe.

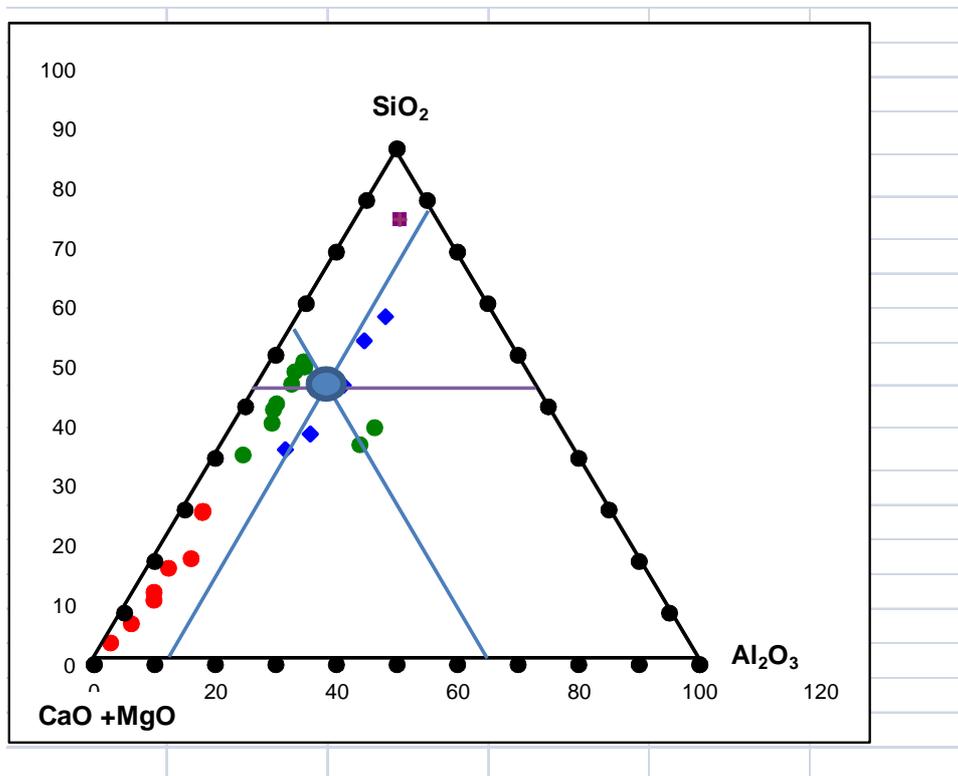


Para confirmar esta hipótesis se han calculado las proporciones relativas entre los componentes químicos principales, sílice, alúmina y suma de óxido de cal y magnesio. El resultado se expresa en el siguiente cuadro:

**TEATRO ROMANO TOLEDO
RECALCULO A 100**

SiO ₂	49,70	53,54
Al ₂ O ₃	10,31	11,11
CaO+MgO	32,81	35,35
	92,82	100,00

Estas proporciones se han proyectado en un diagrama ternario para analizar su ubicación entre otros morteros de diversa procedencia. El resultado es el siguiente:



Donde el mortero del Circo Romano está representado por el círculo azul grueso. Morteros hidráulicos aparecen en verde a la derecha.



6.1.3 Caracterización de la muestra mediante microscopía óptica

Árido: 45%. Granos heterométricos subangulosos-subredondeados, predominantemente de cuarzo.

Distribución mineralógica:

- Cuarzo mono y policristalino: 30%, angulosos-subangulosos, tamaños comprendidos entre 0,2 y 2 mm.
- Fragmentos de roca sedimentaria: 1%, subredondeados, tamaños entre 0,3 y 0.6 mm.
- Feldespato: 8 %, tamaños entre 0,8 y 2 mm.
- Minerales del grupo de las micas: 5%
- Opacos: 1 %

Granulometría general del árido:

- > 1 mm. 20%
- 0,5 – 1 mm. 18%
- < 0,5 mm. 7%
- Aglomerante 50%.

- Porosidad interpartícula: 5 %

Relación árido/aglomerante: 1/1

Observaciones:

-Los porcentajes se estiman por observación visual.

-Las láminas están teñidas con alizarina.

6.1.4 Caracterización del mortero mediante lupa binocular

El mortero es de grano medio con cristales de forma redondeada y subredondeada.

El mortero presenta una estructura homogénea y compacta; de color beige, con gran proporción de clastos de árido de tamaño entre 1-4mm.

Se puede observar la presencia de cuarzo, principalmente ahumado



6.1.5 Caracterización del mortero mediante porosimetría

Muestra MTP	
Porosidad total (%)	29,75
Porosidad Interpartícula (%)	3,51
Porosidad Intrapartícula (%)	26,24
Porosidad Tortuosa (%)	1,89

La muestra estudiada presenta 29,75 % de porosidad total, de la cual solamente un 3,51 % se encuentra en el campo de la porosidad interpartícula.

Se trata de un valor de porosidad óptimo para un mortero. Además hay que destacar que gran parte de la porosidad corresponde a porosidad intrapartícula.

La gráfica adjunta muestra una distribución del sistema poroso de la muestra modal con una moda de $1E-1$ englobada casi totalmente dentro del intervalo comprendido entre $2E-0$ y $7E-3$ μm de diámetro de poro.

Hay que destacar que existe buena comunicación entre los poros.



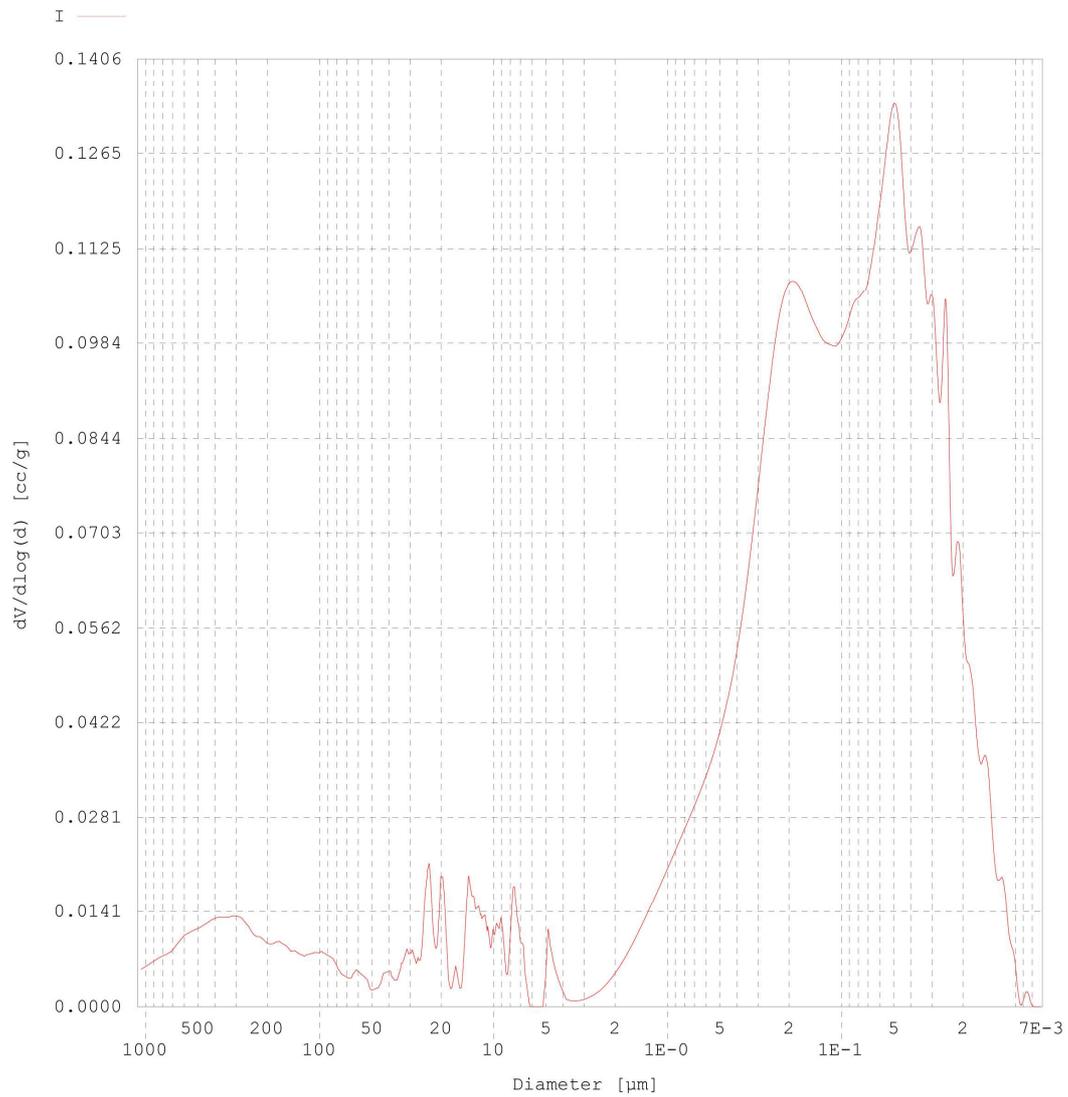
Report date: 10/04/2011

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 5.10

Sample ID	MTP	File Name	MTPH_Merged.PRM
Sample Weight	0.5756 grams	Bulk Sample Volume	0.3460 cc
Sample Description			
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	ISMAEL		Mercury volume normalized by sample weight.

-dV/dlogD vs. Pore Size





6.2 Costra negra

6.2.1 Caracterización de la composición de la costra negra mediante MEB

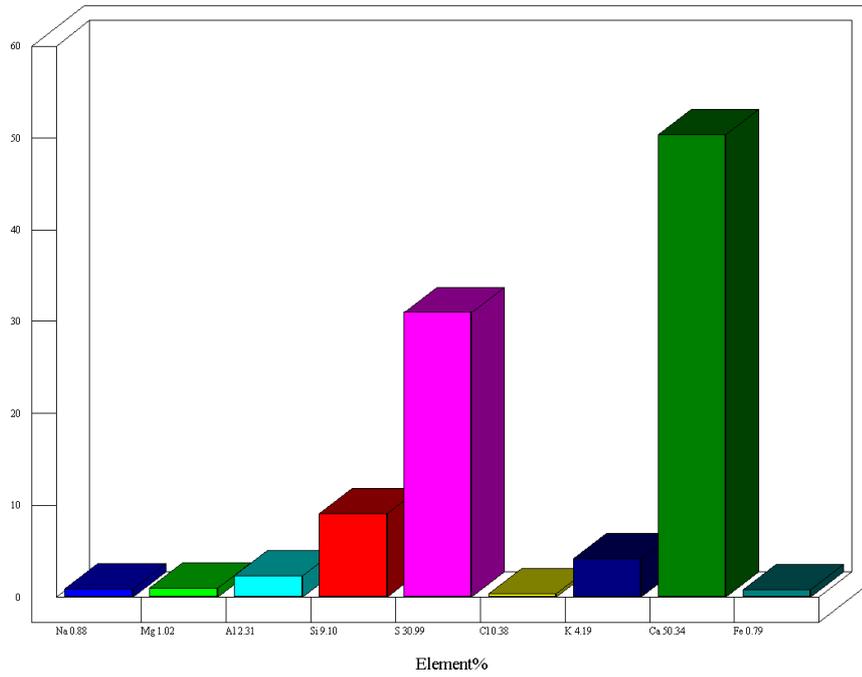
Para la caracterización de la muestra se han efectuado un análisis en la muestra.

Se ha realizado mediante el sistema EDS del microscopio electrónico. Los resultados están representados en las tablas y gráfica que se expone a continuación.

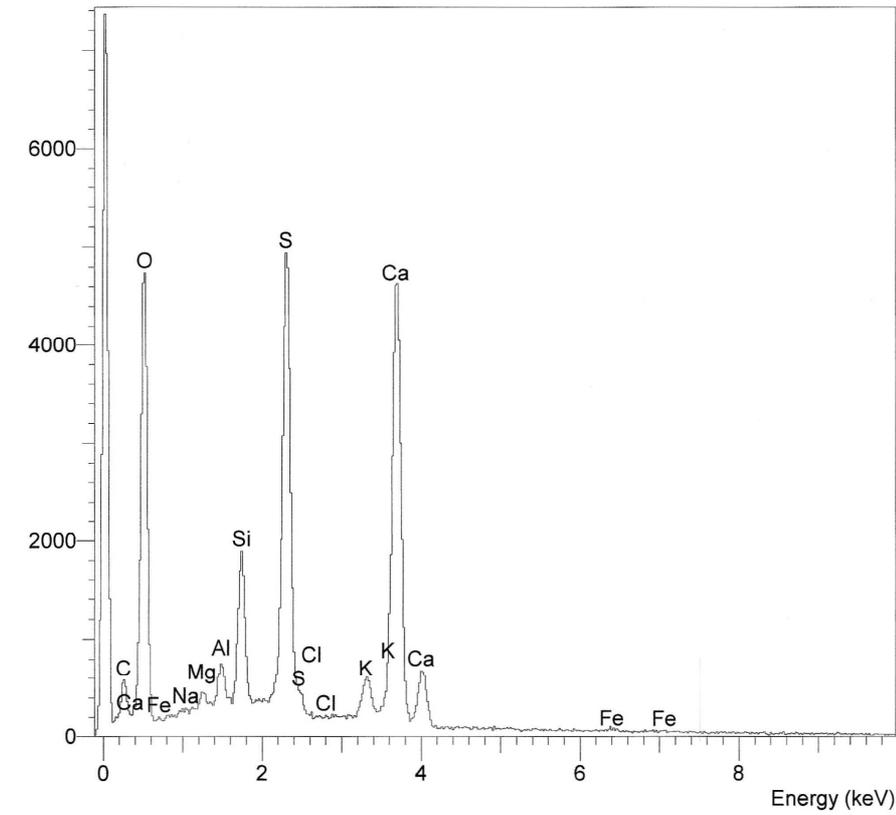
ELEMENT	SPECT TYPE	ELEMENT %	ATOMIC %
Na	ED	0,88	1,35
Mg	ED	1,02	1,48
Al	ED	2,31	3,01
Si	ED	9,10	11,01
S	ED	30,99	33,97
Cl	ED	0,38	0,38
K	ED	4,19	3,77
Ca	ED	50,34	44,16
Fe	ED	0,79	0,49
Total	ED	100	100

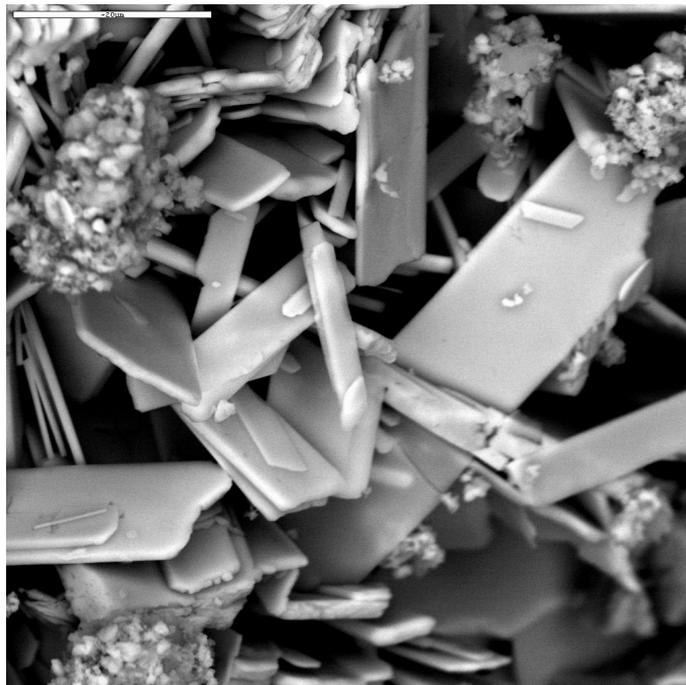
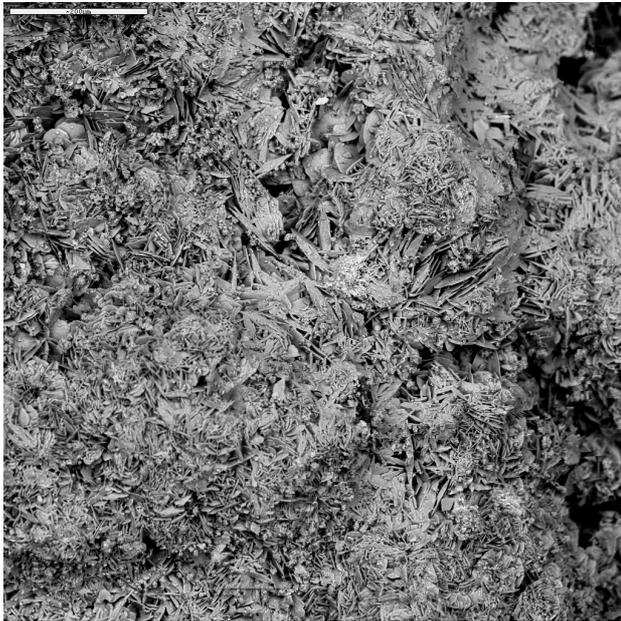
Estos análisis muestra la variedad de elementos presentes en la composición química de la superficie estudiada. El pico mayor corresponde a azufre (S). A continuación aparecen calcio (Ca) y otros en menor medida.

Por tanto se puede decir claramente que la composición principal de la costra es sulfato cálcico. Por consiguiente, se trata de una verdadera costra negra formada por ataque de contaminantes.



Operator : Fernando
Client : All ISIS users
Job : Demonstration data SiLi detector
costra_1 (30/09/11 13:05)





Imágenes de superficie de la muestra, obtenida con el MEB, mediante el detector de electrones secundarios. A 100, 5010 y 1300 aumentos. Se trata de cristales de yeso



6.2.2 Análisis MEB de la extracción salinas

Se ha realizado una extracción salina del total de la muestra S1. La muestra S1 corresponde a un fragmento de costra negra depositado en el intradós de uno de los arcos del Circo Romano.

Con el fin de separar las sales solubles del resto de partículas, se ha diluido el volumen total de la muestra en 50 ml de agua destilada. El residuo resultante de sales es lo que se ha analizado mediante MEB.

	Peso Total muestra (g)	Volumen disolución (ml)	Peso sales solubles (g)
Muestra S1	4,92	50	0,32

Porcentaje de sales 0,065%

El análisis general de las sales solubles de la muestra, realizado mediante el sistema EDS del microscopio electrónico está representado en la gráfica y tablas siguientes.

Las tablas muestran dos análisis realizados sobre la muestra S1 en diferentes áreas: S1_1 y S1_2.

El diagrama de picos de la muestra S1 correspondiente con el análisis S1_2.

En el prevalece la presencia de sílice (Si) (no se debe considerar significativa su presencia). Otros elementos destacables son calcio (Ca), cloro (Cl), potasio (K), sodio (Na), Aluminio (Al) y azufre (S).

Estos resultados pueden evidenciar que el cloruro (sódico) junto con el yeso es la sal dominante como producto de alteración presente en el interior del sistema poroso y artífice de su deterioro. Aunque su proporción sea pequeña, como se ha visto en el % de sales en el total de la muestra.

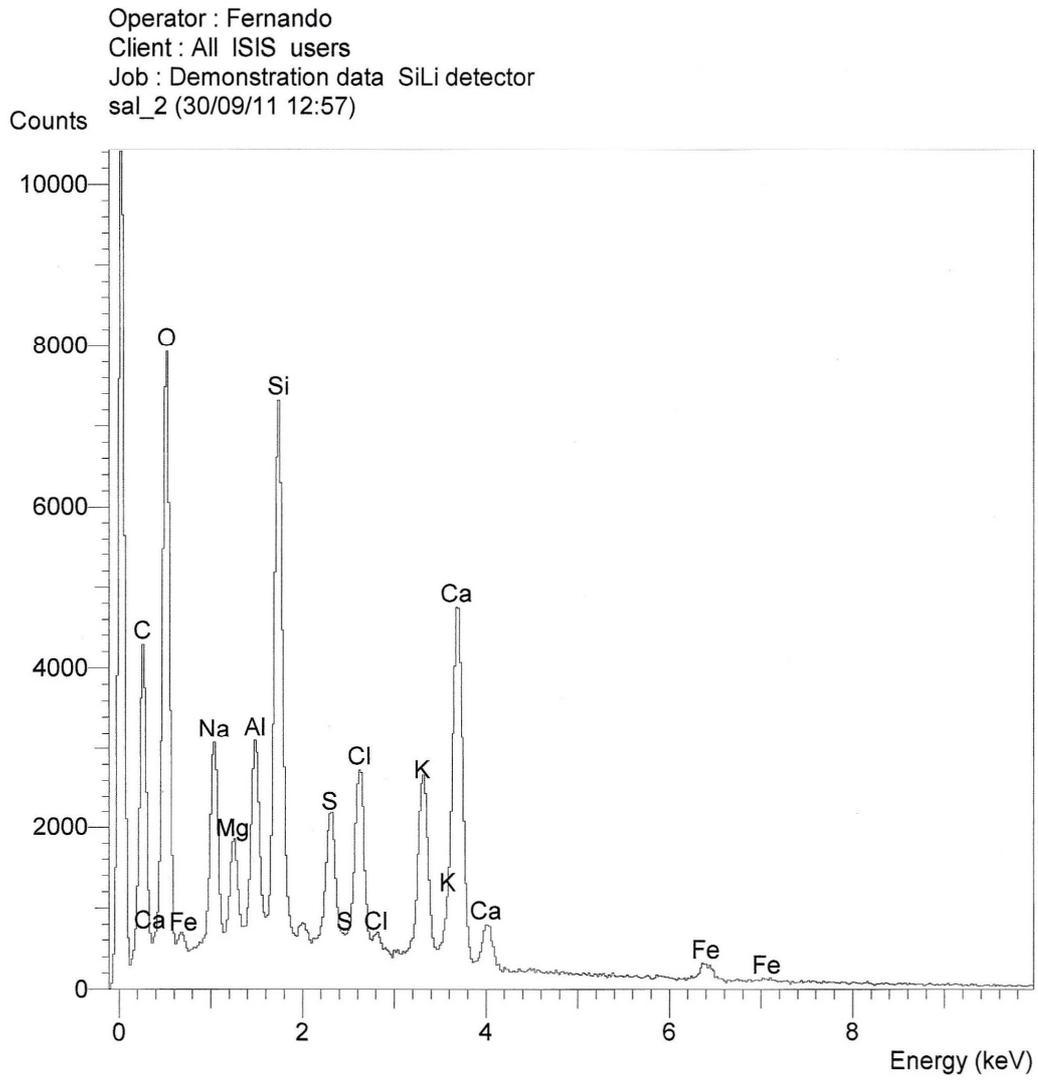


Análisis general de la muestra S_1

S_1_1			
ELEMENT	SPECT.TYPE	ELEMENT %	ATOMIC %
Na	ED	9.18	12.74
Mg	ED	4.22	5.54
Al	ED	7.97	9.43
Si	ED	24.10	27.37
S	ED	5.42	5.39
Cl	ED	8.84	7.96
K	ED	11.57	9.44
Ca	ED	25.58	20.36
Fe	ED	3.11	1.78
Total		100	100

Análisis de un agregado cristalino de la muestra S_1

S1_2			
ELEMENT	SPECT.TYPE	ELEMENT %	ATOMIC %
Na	ED	11.23	15.48
Mg	ED	4.45	5.81
Al	ED	7.41	8.70
Si	ED	21.42	24.19
S	ED	6.44	6.37
Cl	ED	10.02	8.96
K	ED	11.60	9.41
Ca	ED	24.66	19.51
Fe	ED	2.77	1.57
Total		100	100



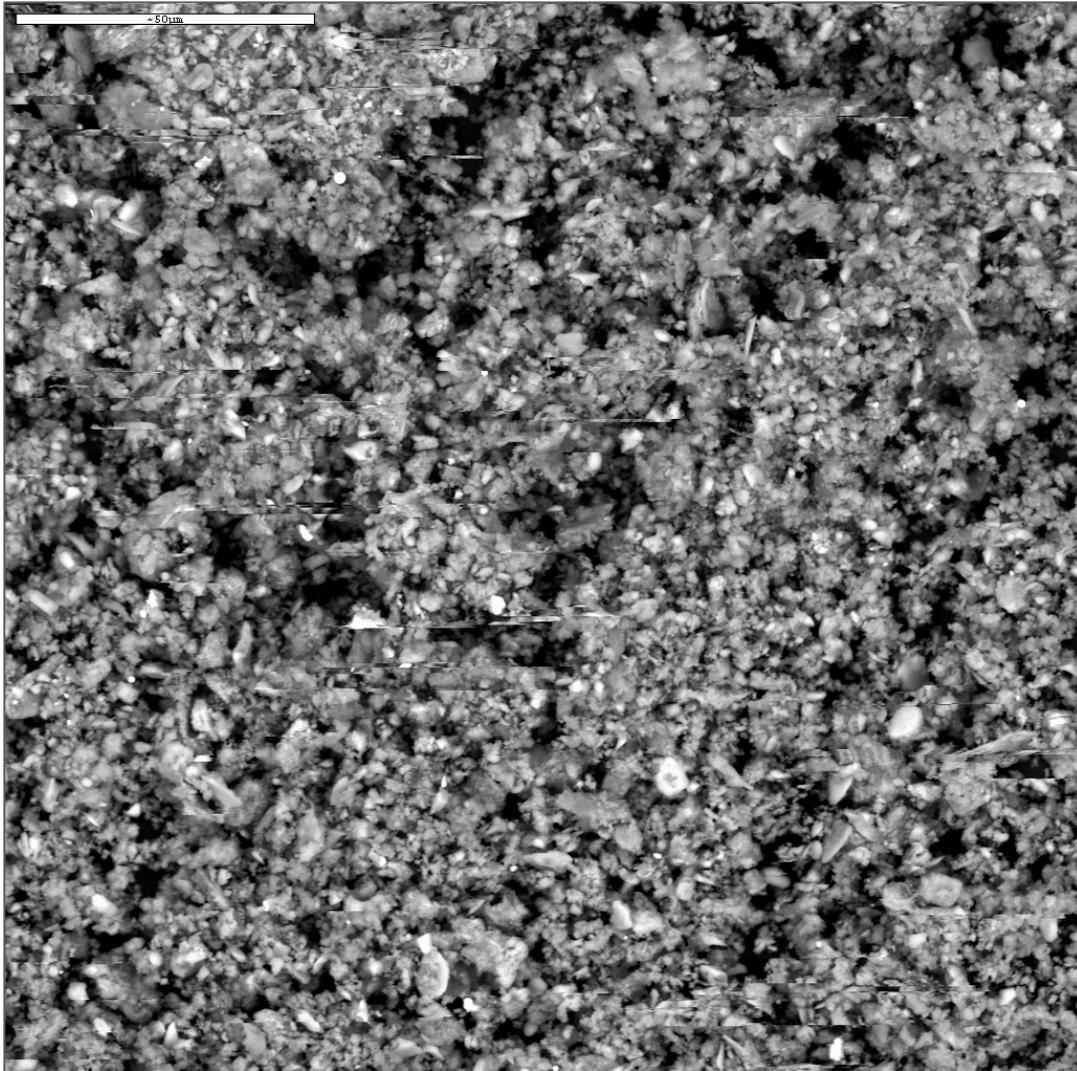


Foto a 500 aumentos realizado con el MEB sobre la muestra de extracción salina

7 Cartografía de sales y humedades

METODOLOGÍA.

Para la elaboración de las cartografías de humedad se ha utilizado un equipo Protimeter Mini que mide la humedad en una escala de 0 a 100 % y permite una rápida estimación de la humedad en un punto.

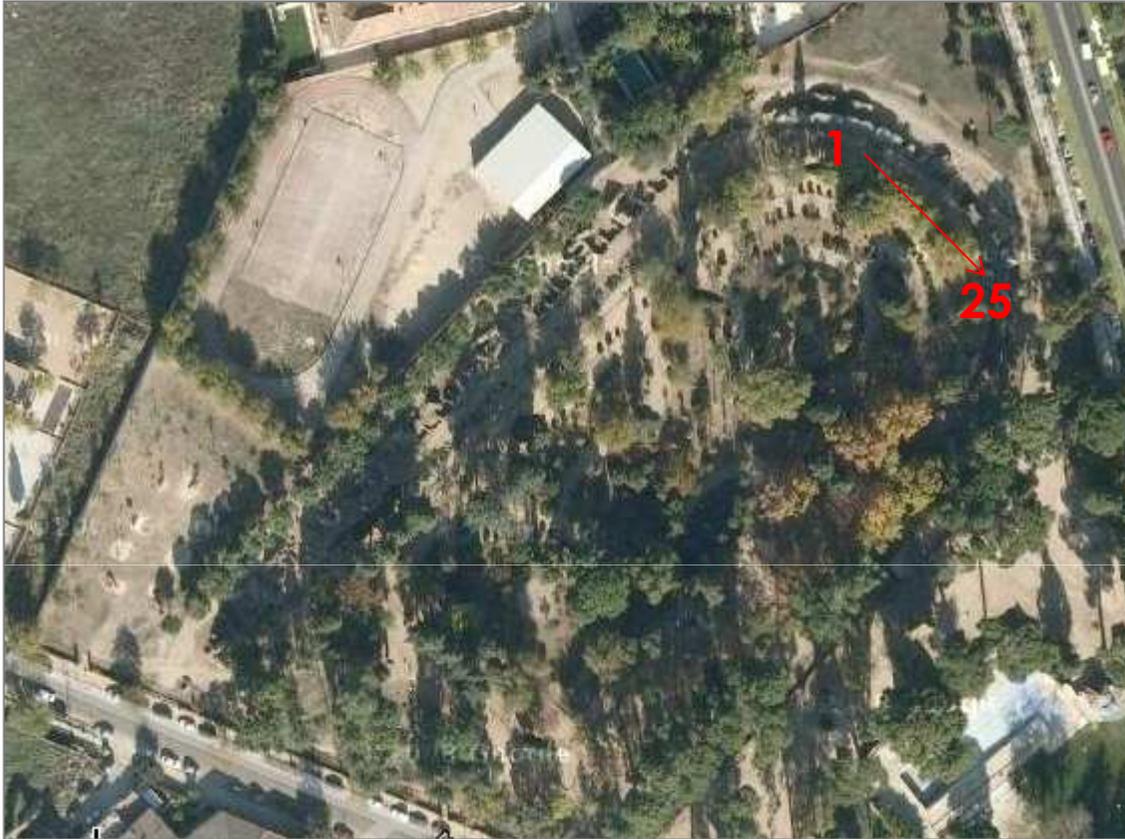
Este tipo de equipos basa la medida de humedades en la conductividad del sólido al ser sometido al tránsito de una corriente continua. La conductividad de un material sólido es función fundamentalmente del contenido en humedad del mismo, por lo cual, a mayor contenido en agua, mayor será la medida directa obtenida en el aparato al ponerse en contacto los electrodos del mismo con el material en estudio.

Por otro lado, la toma de datos de salinidad para las cartografías de sales se llevó a cabo mediante un medidor de conductividad *Hanna* con sonda lineal de diseño propio.

En general, se pueden considerar como anomalías positivas, de alta representatividad, aquellas medidas que sobrepasen la conductividad del 25% en grado de humedad y el valor de conductividad de 0,5 mS de salinidad. Las áreas de valores iguales o superiores son aquéllas donde son significativas la actividad salina y las humedades.

Para la buena conservación de los materiales es imprescindible detectar la causa de las humedades y detenerla. Asimismo, también es indispensable extraer las sales ya que de otro modo los procesos de degradación continuarían, aún una vez remitido el frente de humedades. Tampoco tiene sentido aplicar ningún tratamiento de consolidación o protección, ya que dicho tratamiento sería levantado por el ataque salino y la existencia del tratamiento aceleraría el proceso de deterioro.

TOMA DE DATOS Y RESULTADOS

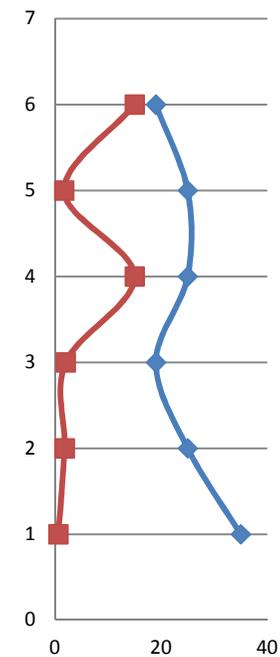
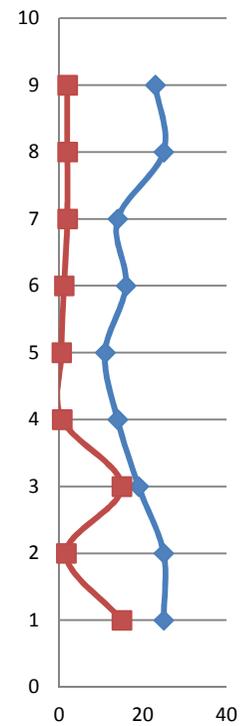
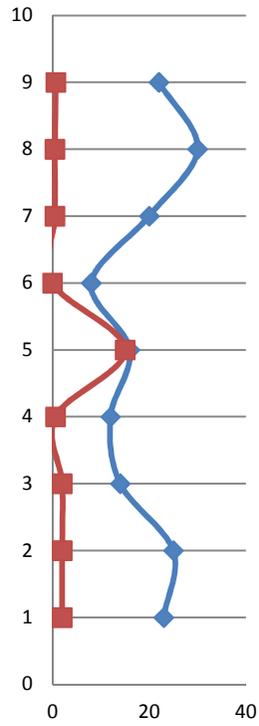
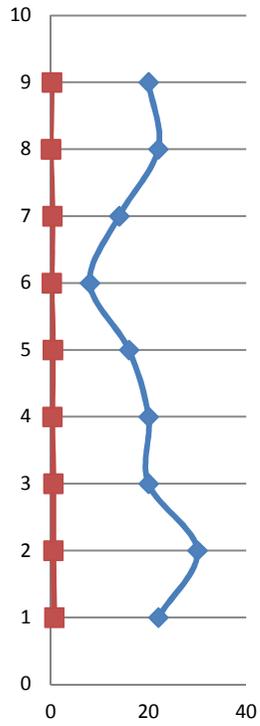
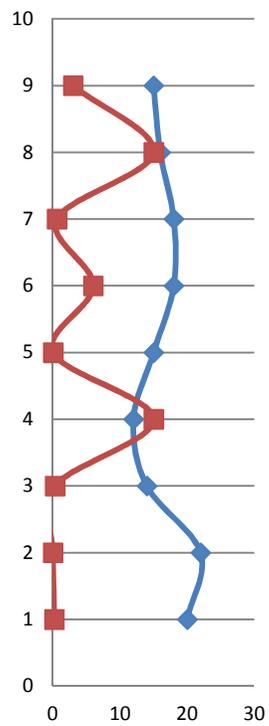
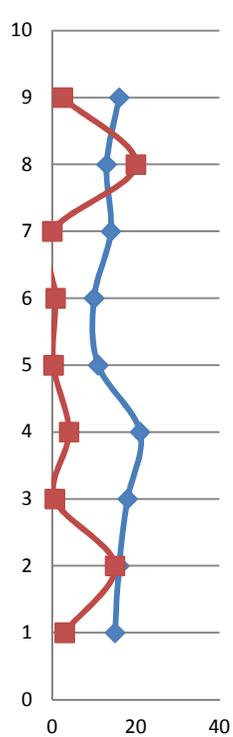
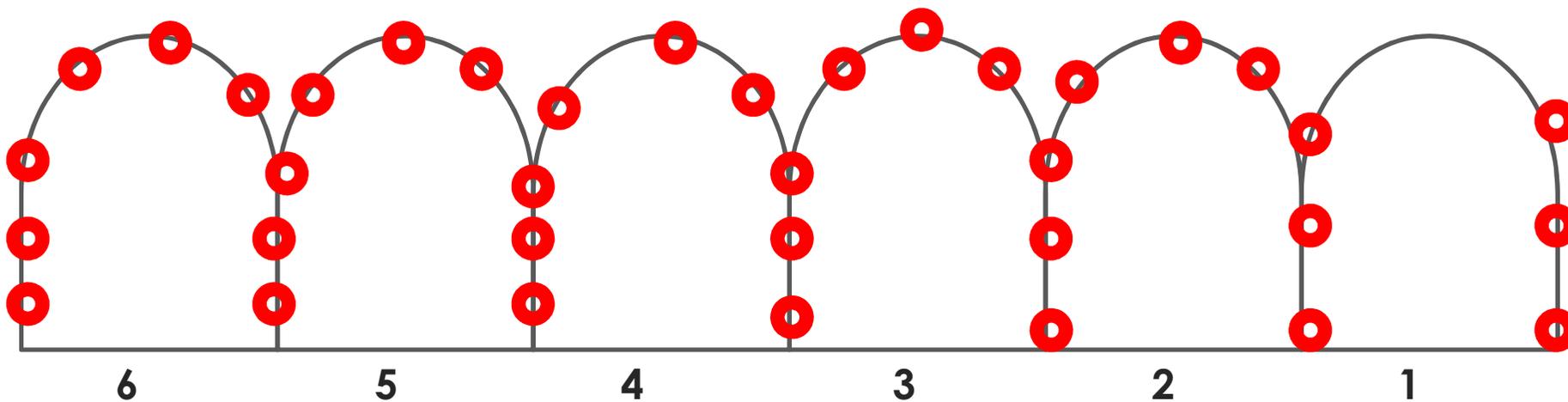


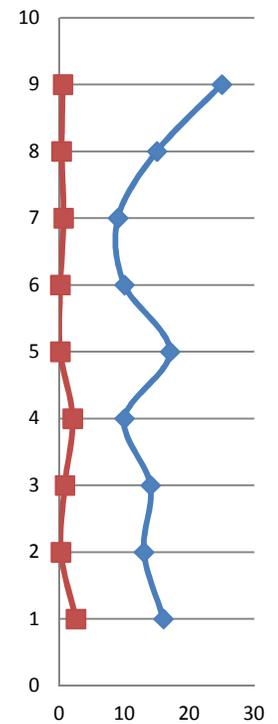
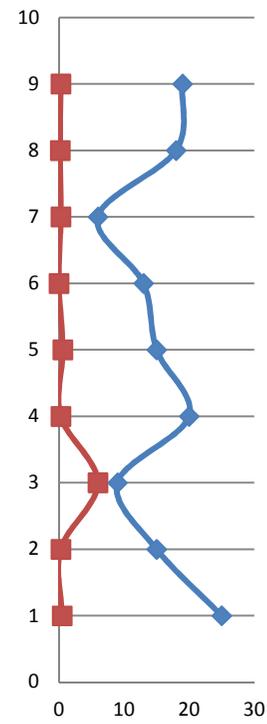
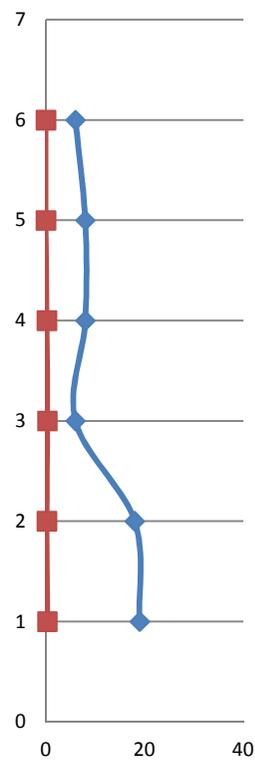
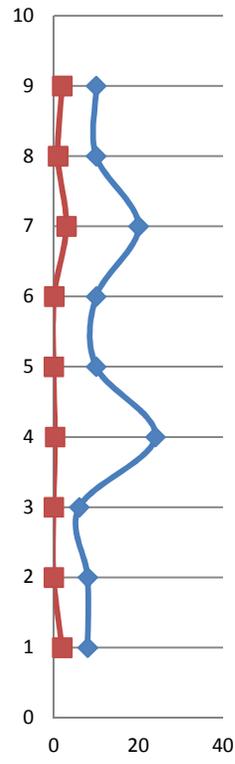
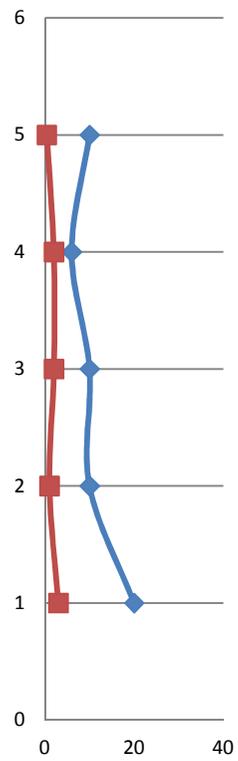
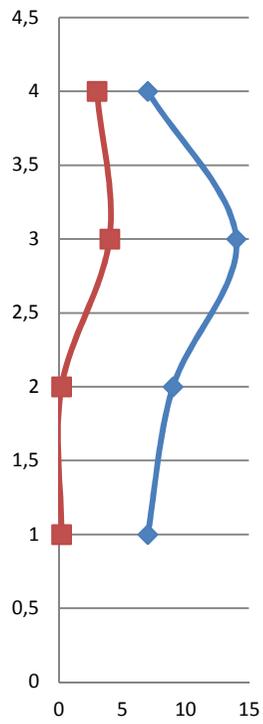
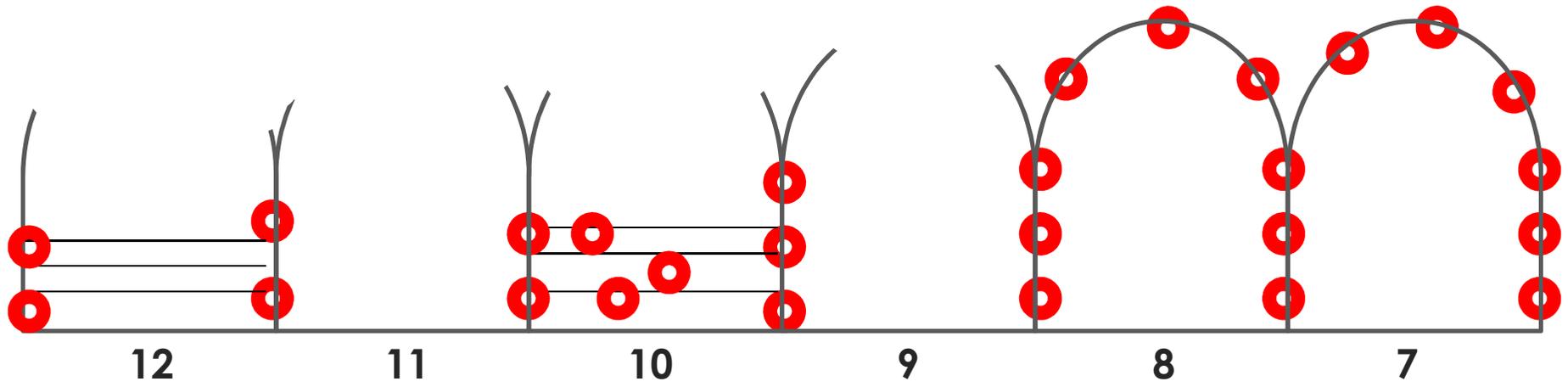
Para estudiar la influencia de la presencia de sales y humedades y su relación con posibles causa de patología, se han realizado diferentes perfiles de toma de datos.

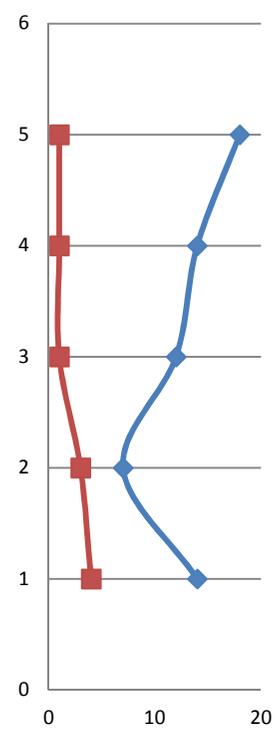
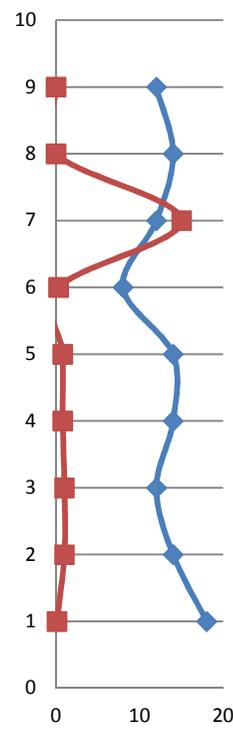
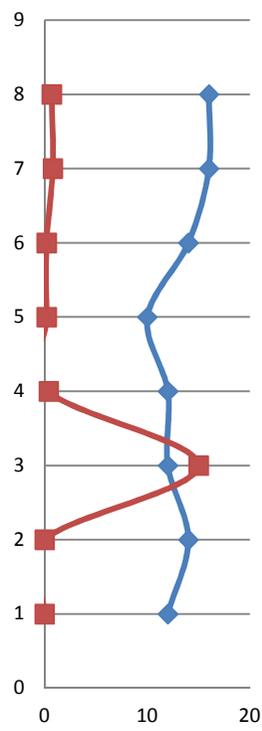
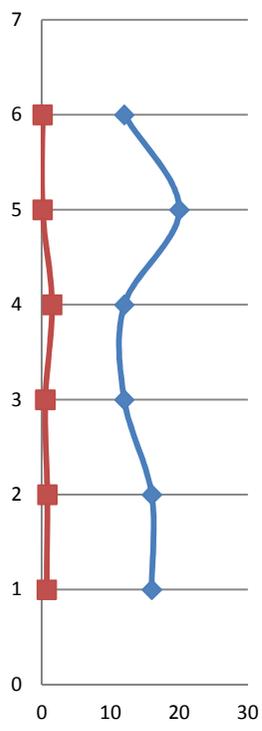
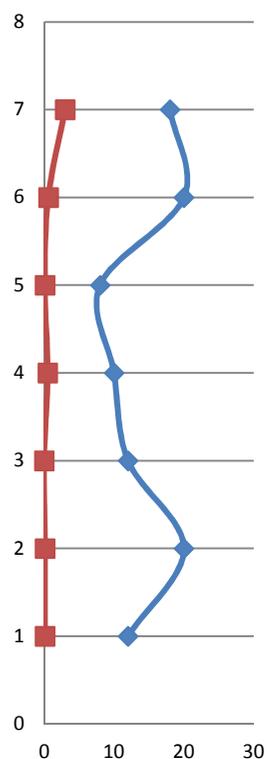
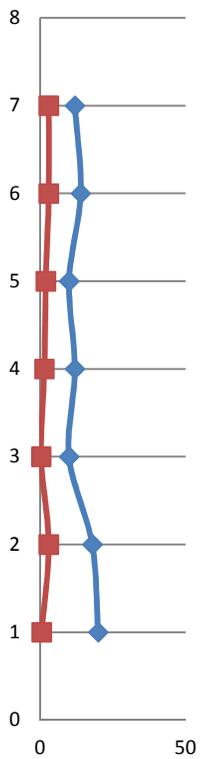
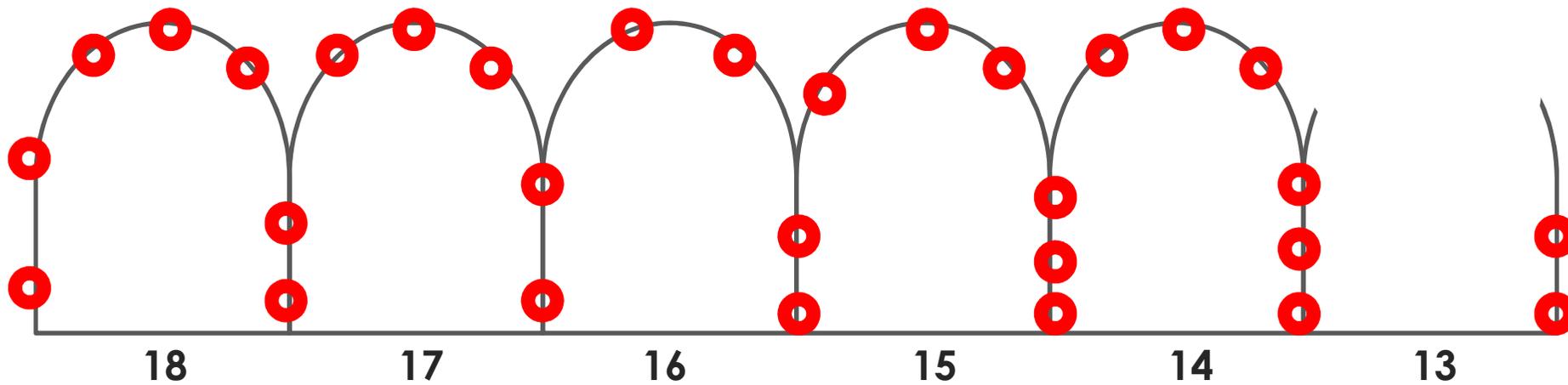
La numeración establecida, para ello, corresponde con el orden mostrado en la fotografía adjunta.

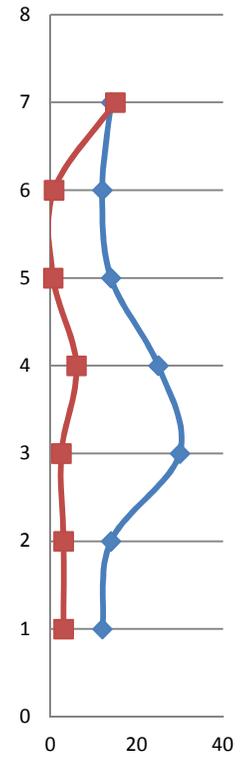
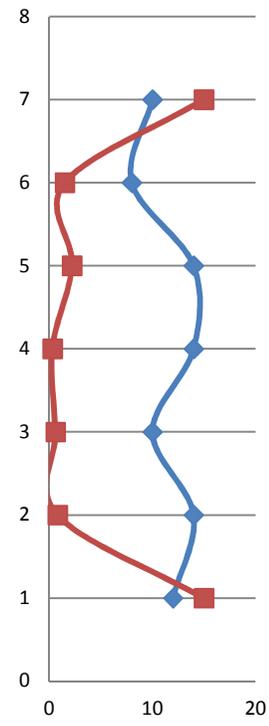
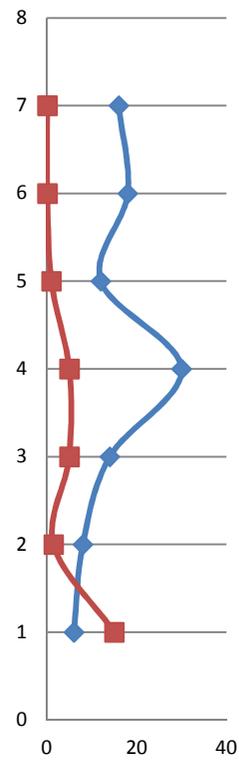
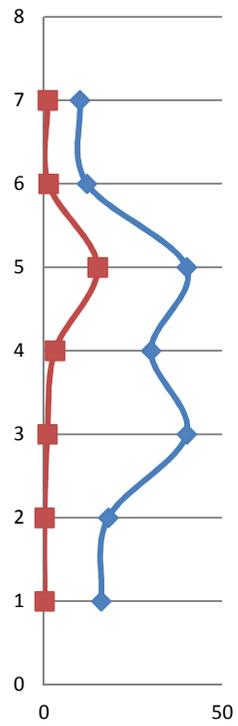
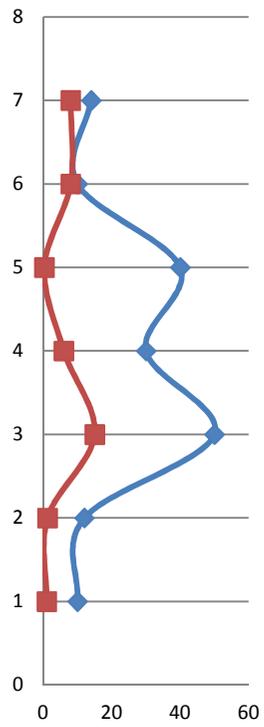
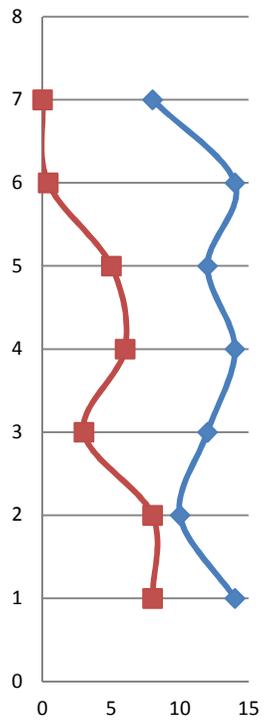
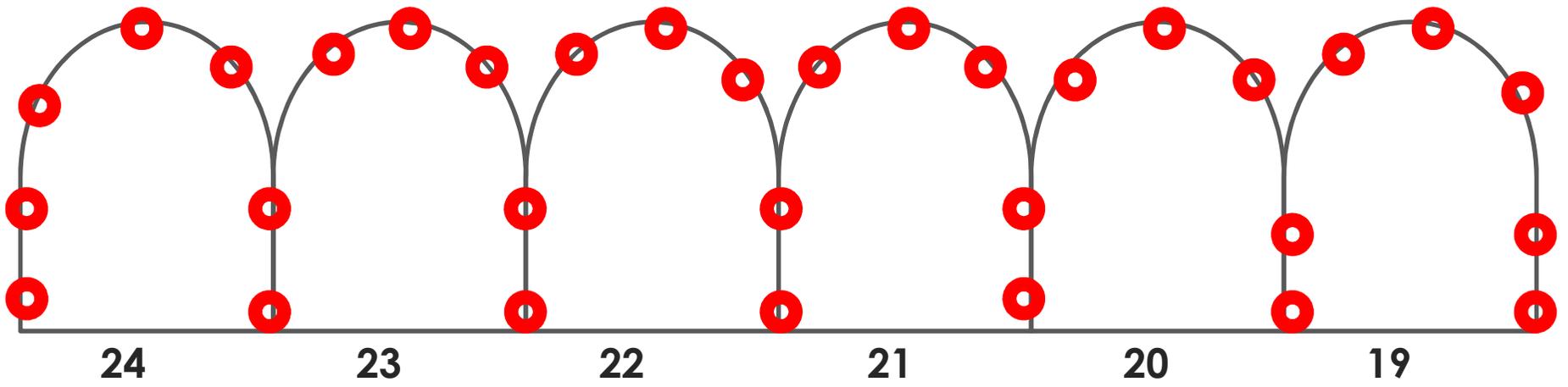
Los resultados se expresan en gráficos, que se acompañan de las principales conclusiones que se deducen de cada uno de ellos.

En todas los gráficos, los valores de sales se han multiplicado por 10 para una mejor visualización.









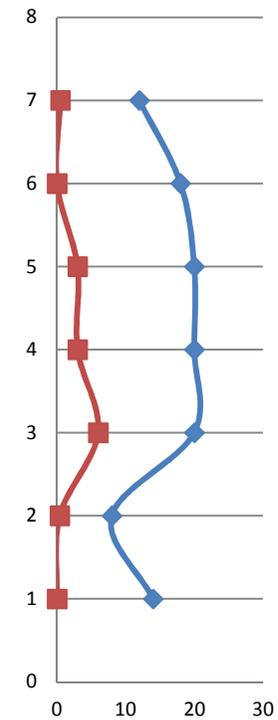
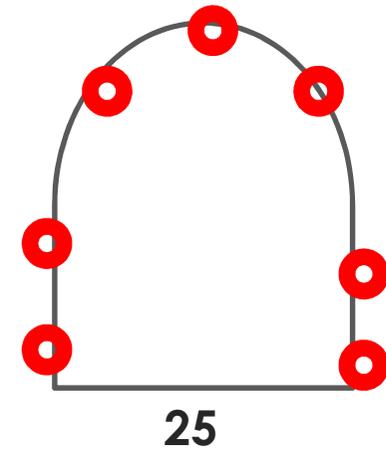
CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que en general la degradación por presencia de sales no es alarmante. En ningún caso aparecen sales por capilaridad. La concentración mayor aparece en zonas superiores de los arcos.

No obstante, se admite que la estructura puede ser afectada por agua de escorrentía tanto de lluvia como la propia del sistema de riego de los jardines aledaños. Al encontrarse el monumento a un nivel de cota inferior, esta agua puede acumularse en forma de charcos y afectar a la conservación del monumento.

Por ello, se considera necesario, a modo de prevención y para evitar lesiones posteriores, el realizar un eficaz sistema de drenaje que canalice el agua de forma correcta y la aleje del monumento.

Por otro lado, es conveniente destacar que en la mayoría de los casos la presencia de sales coincide con el canal de junta de hormigonado, presente en la clave de los arcos. Esto es debido a procesos de filtración y escorrentía a lo largo del tiempo. Se aconseja realizar un extracción salina de estas zonas.





8 Tratamientos y MEB

8.1 Tratamientos empleados

Se ha tomado una muestra de mortero del circo romano de Toledo. Esta muestra ha sido sometida a una serie de tratamientos superficiales, mediante diferentes formulaciones y se ha dejado una muestra sin tratar para que sirva como patrón de comparación.

Mediante el estudio de MEB se ha tratado de identificar la idoneidad de los tratamientos aplicados, por su incidencia directa sobre los parámetros físico-químicos de la roca.

Los tratamientos empleados han sido los siguientes:

-A1: una mezcla de acrílico (Paraloid B72) con Tegosivin HL 100. El primero es un polimetil-metacrilato. Las proporciones son las siguientes:

FÓRMULA A1 RICA ACRILICO							
DISOLUCION	CONSOLIDANTE		HIDROFUGANTE		DISOLVENTE AGREGADO	DILUYENTE AGREGADO	SUMA
	ACRILICO	DISOL	SILICONA	DILUY			
PARTES PRODUCTO	2		1		0	30	33
DISOL-DILUYENT	PARALOID B72	NITRO		W.SPIRIT		TRICL	
CONCENTRACION	60,00%	40,00%	100,00%	0,00%			
COMPONENTES SOBRE TOTAL %	3,64%	2,42%	3,03%	0,00%	0,00%	90,91%	100,00%
TOTAL MAT ACTIVA	6,67%						
TOTAL DISOLVENTE	2,42%						
TOTAL DILUYENTE	90,91%						
ACRILICO/DISOLVENTE	150,00%						
ACRILICO/MATERIA ACTIVA	54,55%						
SILICONA/MATERIA ACTIVA	45,45%						
ACRILICO/SILICONA	1,20						
SILICONA/ACRILICO	0,83						
DISOLV/DILUYENTE	2,60%						



-**A2**: una mezcla con contenido acrílico cuya formulación es la que se muestra en la tabla adjunta..

FÓRMULA A2 RICA EN SILICONA							
DISOLUCION	CONSOLIDANTE		HIDROFUGANTE		DISOLVENTE	DILUYENTE	
	ACRILICO	DISOL	SILICONA	DILUY	AGREGADO	AGREGADO	
						SUMA	
PARTES PRODUCTO	1		2			15	18
DISOL-DILUYENT		TRICL		W.SPIRIT			
CONCENTRACION	70,00%	30,00%	100,00%	0,00%			
COMPONENTES SOBRE TOTAL %	3,89%	1,67%	11,11%	0,00%	0,00%	83,33%	100,00%
TOTAL MAT ACTIVA	15,00%						
TOTAL DISOLVENTE	1,67%						
TOTAL DILUYENTE	83,33%						
ACRILICO/DISOLVENTE	233,33%						
ACRILICO/MATERIA ACTIVA	25,93%						
SILICONA/MATERIA ACTIVA	74,07%						
ACRILICO/SILICONA	0,35						
SILICONA/ACRILICO	2,86						
DISOLV/DILUYENTE	1,96%						

-**ESTEL 1000**:. Se trata de una consolidante a base de silicato de etilo en solución en white spirit D40.

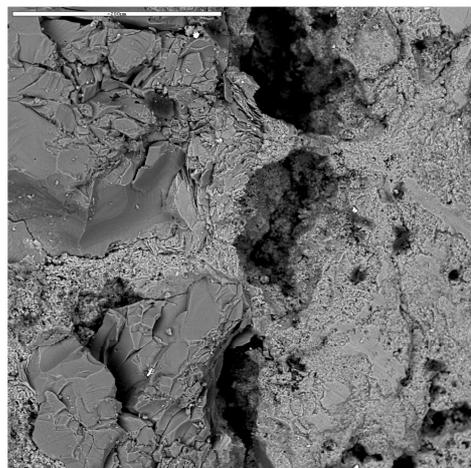
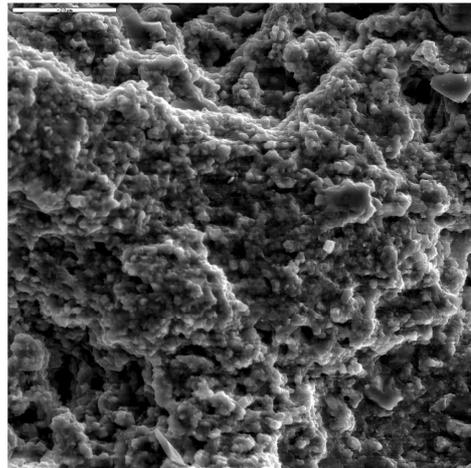
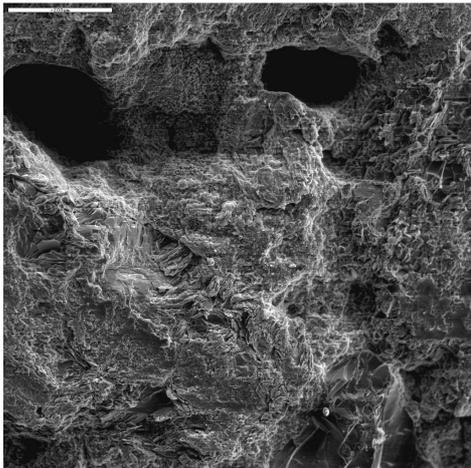
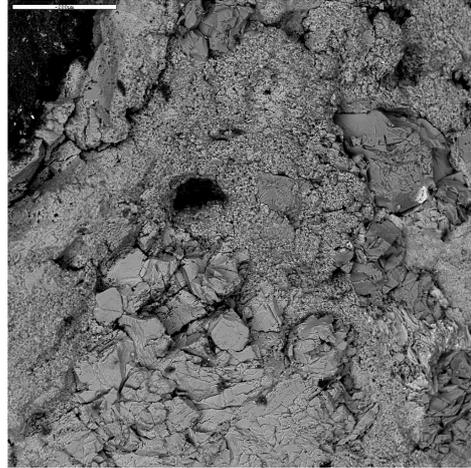
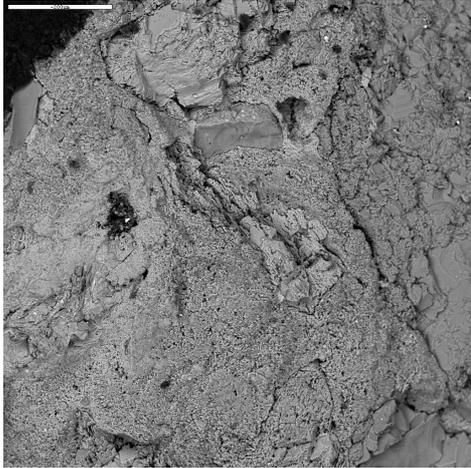
-**ESTEL 1000 más TEGOSIVIN**: es decir silicato de etilo más silicona.

-**TEGOSIVIN**, silicona.

Para comprobar si los tratamientos aplicados varían la porosidad de la muestra se observaron mediante MEB las tres muestras tratadas y una sin tratar.

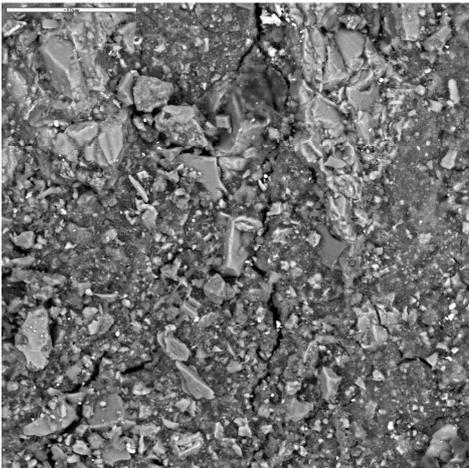
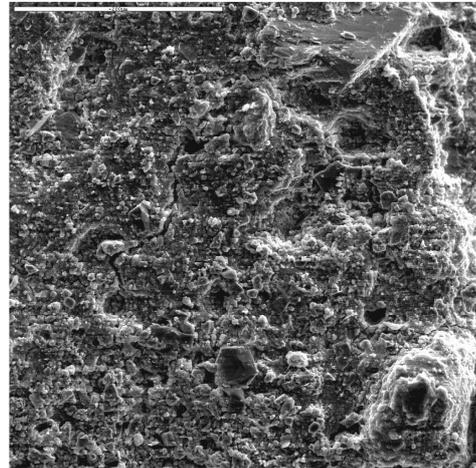
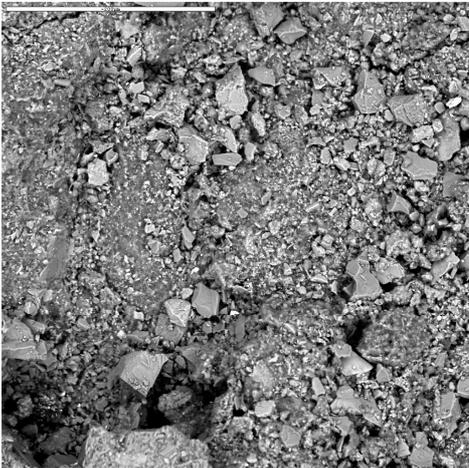
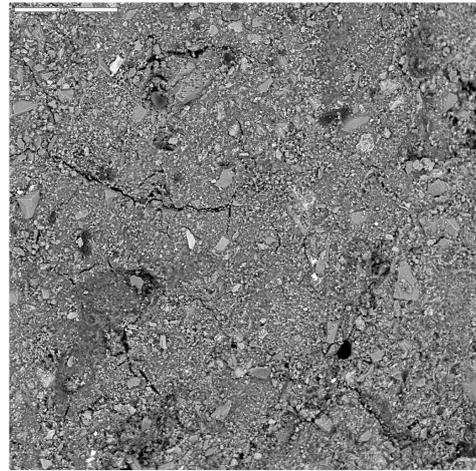
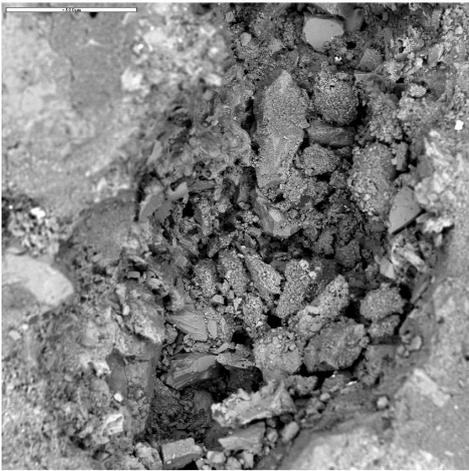
8.2 Muestras

Muestra sin Tratar (ST)



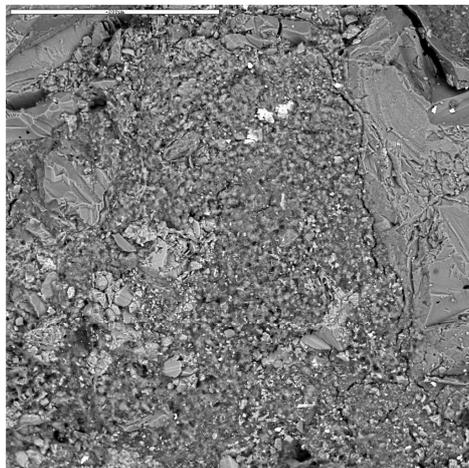
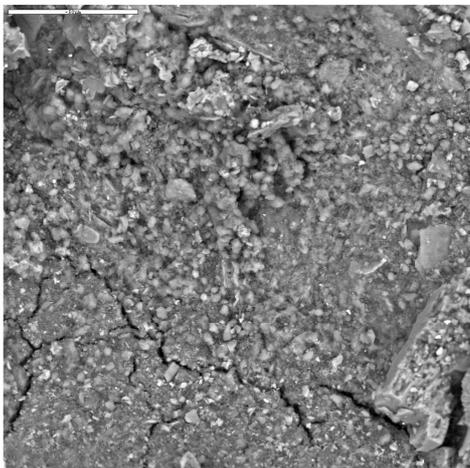
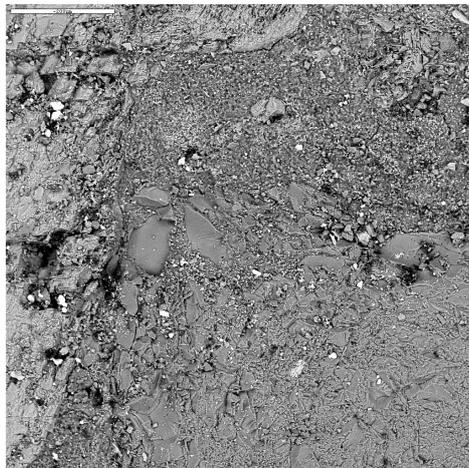
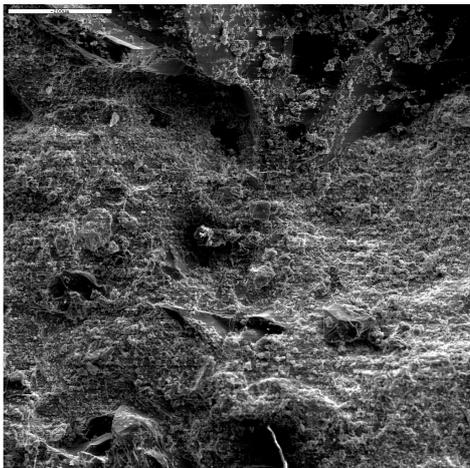
Muestra sin tratar.
Vistas a diferentes aumentos.

Muestra tratada con acrilsilicona formulación A1



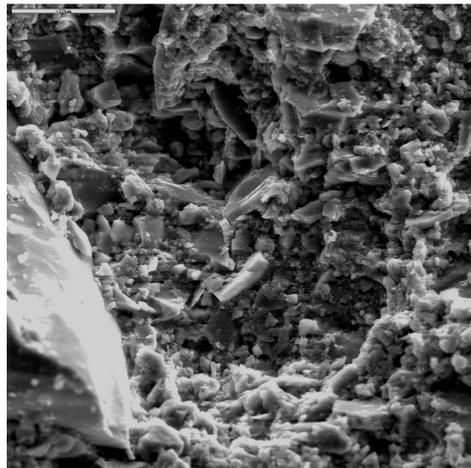
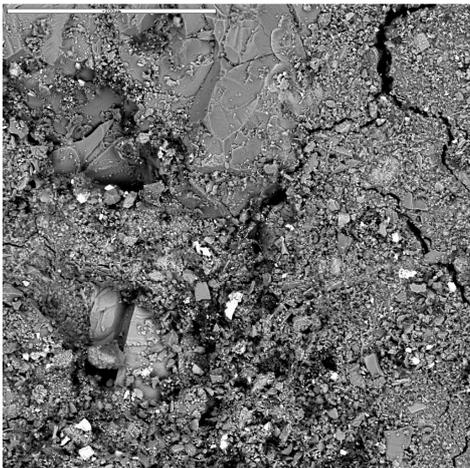
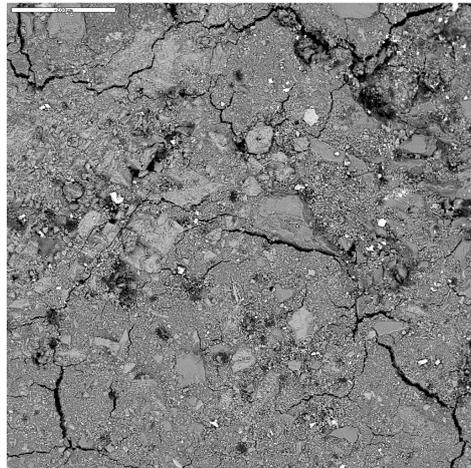
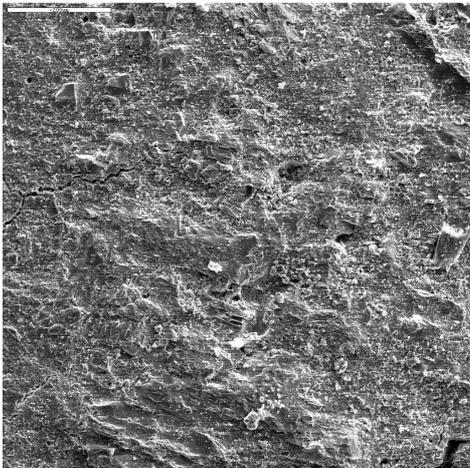
Muestra tratada con la formulación A1.
Vistas a diferentes aumentos.

Muestra tratada con silicona formulación A2



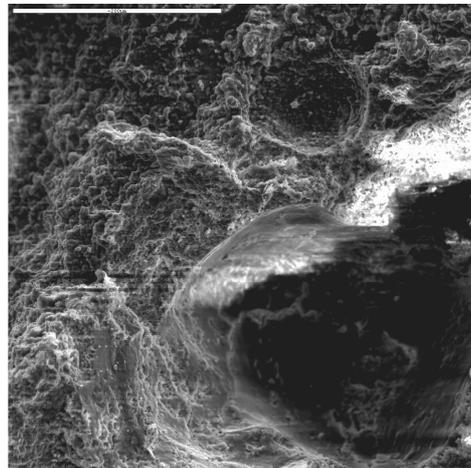
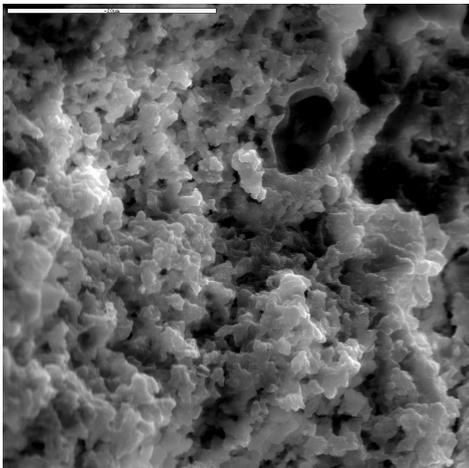
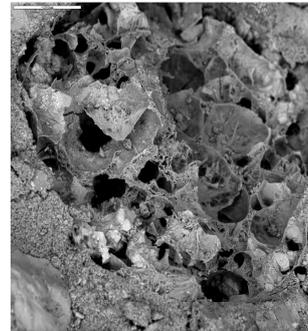
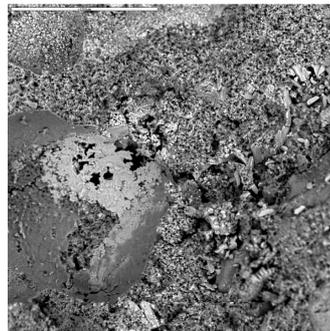
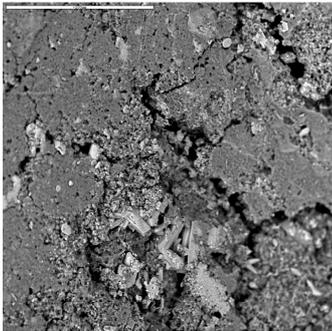
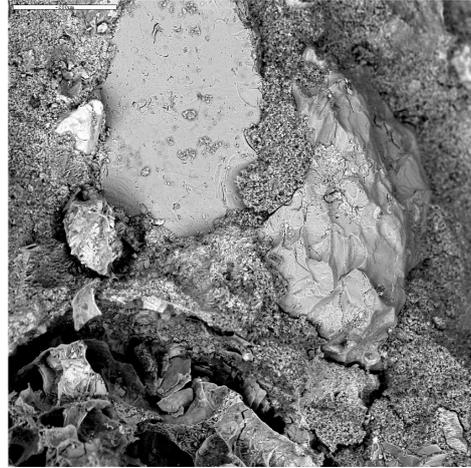
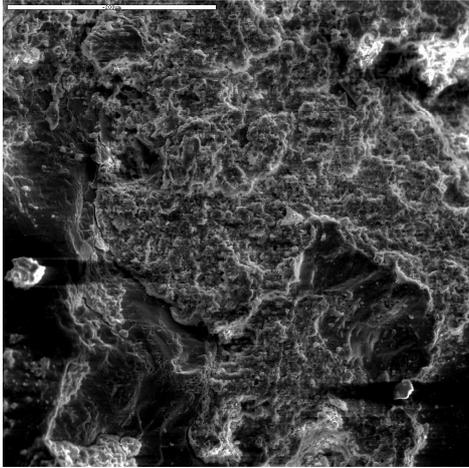
Muestra tratada con la formulación A2.
Vistas a diferentes aumentos.

Muestra tratada con Estel 1000



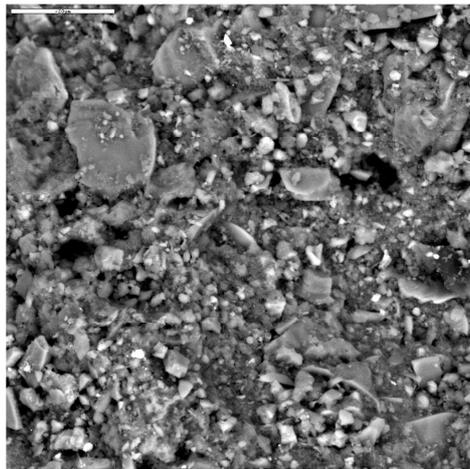
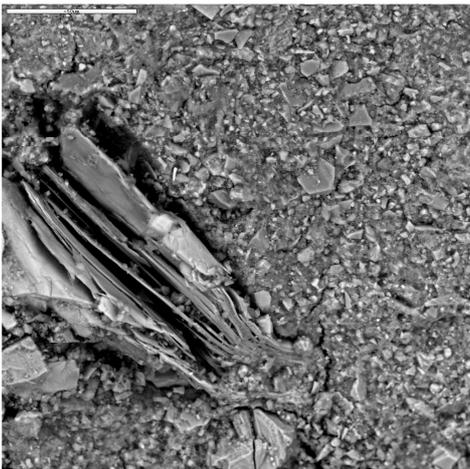
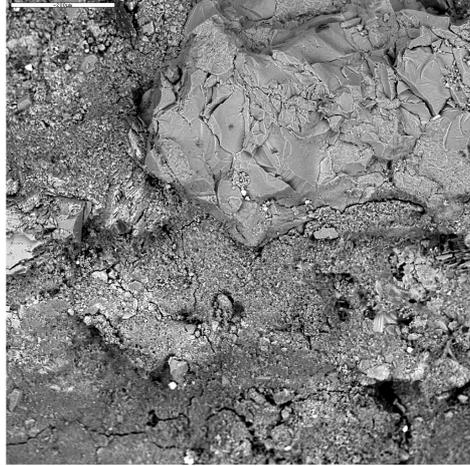
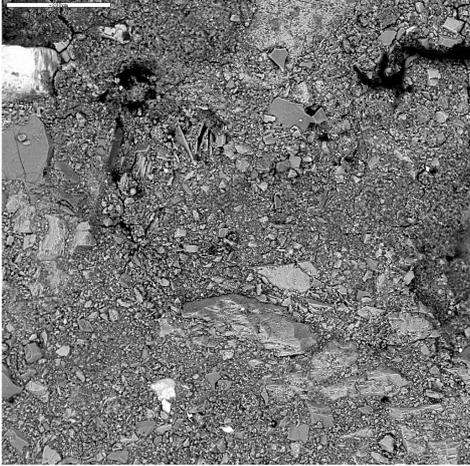
Muestra tratada con formulación Estel 1000.
Vistas a diferentes aumentos.

Muestra tratada con Estel 1000+ Tegosivin



Muestra tratada con Estel 1000+Tegosivin.
Vistas a diferentes aumentos.

Muestra tratada con Tegosivin



Muestra tratada con Tegosivin.
Vistas a diferentes aumentos.



8.3 Conclusiones sobre la observación de los tratamientos

A modo de conclusión general se puede decir que los tres tratamientos aplicados disminuyen la porosidad con una incidencia variable dependiendo de la muestra.

En la aplicación de los tratamientos consolidantes, se aprecia una ligera reducción de la porosidad en un material tan poroso como el mortero romano.

En cambio para los tratamientos hidrofugantes no se modifica la porosidad de la superficie o lo hace muy ligeramente.

En el Teatro Romano de Toledo se busca el efecto hidrofugante, por lo cual se debe de dar un tratamiento a base d silicona. El tratamiento acrílico añade cierto poder consolidante pero reduce la porosidad.

9 Diagnóstico y actuaciones recomendadas

9.1 Introducción

De acuerdo con la doctrina internacional de intervención con el patrimonio, fundamentalmente con la Carta de Venecia, no se introducirán añadidos o materiales nuevos mas allá de los estrictamente necesarios para la buena conservación.

Cuatro son los procesos de deterioro que afectan o han afectado al Circo Romano de Toledo:

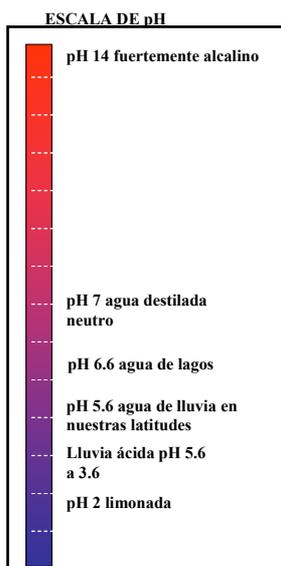
1. Disolución kárstica de la cal de los morteros por agua de lluvia.
2. Contrastes térmicos
3. Ataque por sales y heladas
4. Formación de costra negra.

De estos tres, el primero es el más importante y a él se pueden achacar la mayor parte de los daños que hoy día se observan. Se examinarán seguidamente.

9.2 Disolución kárstica del mortero

Una vez que los morteros quedan expuestos por expolio de las piezas que lo recubrían, comienza su disolución.

La cal de los morteros está formada principalmente por carbonato cálcico, CaCO_3 . El carbonato cálcico es ligeramente soluble en agua ácida.

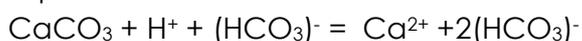


El agua de lluvia se acidifica débilmente por disolución del anhídrido carbónico, CO_2 , atmosférico, según $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + (\text{HCO}_3)^-$

Las bajas temperaturas y presencia de CO_2 favorecen este proceso, así que será más incidente en invierno y en ambientes contaminados.

El agua de lluvia mantiene un pH de 5.6 en nuestras latitudes pudiendo descender bastante en ambientes contaminados. Este grado de acidez es muy bajo pero ha debido estar actuando a lo largo de cientos de años. Se trata, por consiguiente, de un proceso muy lento que no requiere medidas de emergencia, y su fuerte incidencia solo se puede achacar al paso lento del tiempo.

El proceso actúa sobre el carbonato como se ha dicho según





El carbonato disuelto es arrastrado hacia el terreno.

Este proceso actúa principalmente desde la superficie, pero también puede formar oquedades internas a partir de grietas.

Superficialmente disuelve la cal aglomerante de los morteros, con lo que el árido queda liberado y se va desprendiendo. El efecto continuado es que la piedra que forma el hormigón romano, queda resaltando, terminando por desprenderse, con la consiguiente pérdida de volumen que se aprecia en casi todas las zonas de Circo.

El agua que circula a través de las grietas va ampliando su luz hasta poder formar cavidades internas que debilitan la estructura. Por ello se recomendará, más adelante, la inyección de lechada o mortero de árido muy fino de cal hidráulica en grietas y oquedades. En espacios más amplios se puede introducir mortero con árido más grueso, también de cal hidráulica. Las dosificaciones aparecen en el siguiente capítulo.

El proceso de disolución en una estructura abierta y expuesta es difícil de detener. Afortunadamente se trata de un proceso muy lento que no requiere actuaciones de forma inmediata. Se podría cubrir la estructura pero afectaría a su estética y ambientación y no se justifica una actuación tan agresiva. Otra medida paliativa es el tratamiento con hidrofugantes. Esta medida es de poco coste y casi nula incidencia. Lamentablemente su acción es limitada en el tiempo y sería poco efectiva si no se repusiera cada cierto tiempo, por ejemplo, cada 15 años. En realidad, la duración depende del hidrofugante utilizado. Los polisiloxanos que se utilizan (siliconas de cadena corta) son débiles física y químicamente y tienden a desaparecer.

Para reforzar su durabilidad se puede acudir a agregar una pequeña cantidad de resina acrílica a la silicona. Las resinas acrílicas son muy estables y duraderas y protegen los polisiloxanos. Pero lo mejor es mantener una vigilancia periódica del estado del tratamiento. Dicha vigilancia es muy sencilla, basta arrojar un poco de agua. Mientras el agua perla y no moja el material, el tratamiento sigue siendo efectivo. En caso contrario habría que aplicar un nuevo tratamiento. El intervalo para efectuar las comprobaciones está dado por la durabilidad esperada del tratamiento, es decir, cada 10 o 15 años.

El hidrofugante se puede aplicar a la totalidad de la estructura o a las zonas más expuestas al impacto directo de las precipitaciones. Esta última forma de proceder sería la recomendada; primero para evitar riesgos innecesarios ya que el tratamiento evitará la escorrentía sobre los planos verticales al rebajar la tensión superficial en las zonas tratadas.

Para evitar la descohesión superficial provocada por la disolución del aglomerante de cal, en alguna zona pudiera ser necesario aplicar un tratamiento de consolidación a base de silicato de etilo. Es necesario advertir que este tratamiento implica riesgos por lo que solo se aplicará cuando la descohesión granular alcance zonas profundas y el simple saneado significaría una gran pérdida de material.



El riesgo es que se cree una capa consolidada y endurecida sobre un substrato más blando. Esta capa corre el riesgo de quebrarse y desprenderse con el tiempo. En contra de este proceso indeseable está la alta porosidad del mortero que conlleva una buena penetración del tratamiento. Favorece el mismo, en cambio, la alta plasticidad del mortero de cal y la rigidez de la capa endurecida.

El tratamiento siempre se aplica a saturación para lograr una buena penetración. Si se quiere rebajar el grado de consolidación para no cerrar en exceso la porosidad, es preferible utilizar una formulación diluida del principio activo, antes que recurrir a una aplicación insuficiente.

Ocasionalmente podría ser necesario apear zonas degradadas en voladizo con elementos que impliquen el menor impacto estético posible.

9.3 Contraste térmico

Se trata de los cambios volumétricos experimentados por los materiales en los ciclos diarios noche-día.

Los datos climáticos para Toledo proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología son los siguientes:

Toledo

Latitud: 39° 53' 5" N - Longitud: 4° 2' 58" O
Altitud: 515 m –

Precipitación: 1982-2011 Temperatura: 1982-2011 Viento: 1982-2011

Variable	Anual
Máx. núm. de días de lluvia en el mes	23 (dic 1989)
Máx. núm. de días de nieve en el mes	4 (ene 2010)
Máx. núm. de días de tormenta en el mes	10 (jun 1988)
Prec. máx. en un día (l/m2)	89.6 (11 oct 2008)
Prec. mensual mas alta (l/m2)	151.0 (oct 2008)
Prec. mensual mas baja (l/m2)	0.0 (ene 1983)
Racha máx. viento: velocidad y dirección (Km/h)	Vel 138, Dir 280 (25 feb 1989 16:45)
Tem. max. absoluta (°C)	42.4 (24 jul 1995)
Tem. media de las máx. mas alta (°C)	36.8 (jul 1994)
Tem. media de las mín. mas baja (°C)	-2.9 (ene 2005)
Tem. media mas alta (°C)	28.9 (jul 2006)
Tem. media mas baja (°C)	3.6 (dic 2001)
Tem. min. absoluta (°C)	-9.6 (27 ene 2005)



Se aprecia que se trata con una climatología con contrastes térmicos moderados a altos, como corresponde a un clima mesetario. Sin embargo, la elasticidad y bajo coeficiente de dilatación térmica diferencial de los morteros de cal asigna un rol a esta causa prácticamente despreciable.

COEF. DIL. LINEAL TÉRMICA DE MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

	m/m C°	
Hormigón	10	$\times 10^{-6}$
Hormigón con grava	9-12	$\times 10^{-6}$
Hormigón con arcillas expansivas	7-9	$\times 10^{-6}$
Mortero de cemento	10-11	$\times 10^{-6}$
Mortero de cal	8-10	$\times 10^{-6}$
Piedra caliza	7	$\times 10^{-6}$
Ladrillo	5	$\times 10^{-6}$
Granito	8	$\times 10^{-6}$
Vidrio (alcalís 10%)	4,8	$\times 10^{-6}$
Hierro	11,5	$\times 10^{-6}$
Acero	10-14	$\times 10^{-6}$
Cobre	16,8	$\times 10^{-6}$
Aluminio	23,8	$\times 10^{-6}$
Plomo	29,4	$\times 10^{-6}$
Resinas de poliéster	100-150	$\times 10^{-6}$
Laminas de vidrio poliéster	35-45	$\times 10^{-6}$
Resinas epoxídicas	60	$\times 10^{-6}$
Epoxis con carga de sílice	20	$\times 10^{-6}$
Resinas acrílicas	70-80	$\times 10^{-6}$
Cloruro de polivinilo (PVC)	70-80	$\times 10^{-6}$
Nylon 66	70-100	$\times 10^{-6}$

Resumida de "E.B. Grunau, B. Diergarten: Rev. Technique de Bâtiment e des Constructions Industriels, N° 51, P. 75. 1975".

9.4 Ataque por sales y heladas

Las sales solubles son una de las mayores causas de degradación de los materiales de construcción. Se trata de compuestos que se disuelven en tiempo húmedo cristalizando en los poros durante el tiempo seco, al evaporarse el agua en que van disueltas. La formación de estos cristallitos se desarrolla con tal fuerza que cuando alcanzan la pared opuesta del poro la rompen, provocando la desintegración del material.

Las heladas actúan de forma parecida sobre los materiales, pero en este caso los cristales que se forman son de hielo, al bajar la temperatura ambiente, se admite, que por debajo de -3° C.



Los datos climáticos en enero, para Toledo de la Agencia de Meteorología arrojan los siguientes resultados

Valores Climatológicos Normales. Toledo

Periodo: 1971-2000 - Altitud (m): 515

Latitud: 39° 53' 5" N - Longitud: 4° 2' 58" O -

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	6.4	11.2	1.6	28	78	6	0	0	8	12	7	150
Febrero	8.3	13.6	3.0	28	72	5	0	0	4	6	6	164
Marzo	11.0	17.1	4.8	25	62	4	0	0	2	2	6	222
Abril	12.9	18.8	6.9	41	62	7	0	1	1	0	4	238
Mayo	16.9	23.1	10.8	44	59	7	0	3	1	0	4	276
Junio	22.1	29.0	15.2	28	50	3	0	3	1	0	9	317
Julio	26.0	33.6	18.5	12	44	2	0	2	0	0	17	369
Agosto	25.7	33.1	18.3	9	44	2	0	2	0	0	16	345
Septiembre	21.6	28.4	14.8	22	54	3	0	2	0	0	10	256
Octubre	15.6	21.4	9.9	38	67	6	0	1	3	0	6	203
Noviembre	10.2	15.3	5.2	40	76	6	0	0	8	3	6	155
Diciembre	7.3	11.5	3.0	44	81	6	0	0	8	8	5	120
Año	15.4	21.4	9.3	357	62	56	2	15	34	33	95	2847

Leyenda

T	Temperatura media mensual/anual (°C)
TM	Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
Tm	Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
R	Precipitación mensual/anual media (mm)
H	Humedad relativa media (%)
DR	Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
DN	Número medio mensual/anual de días de nieve
DT	Número medio mensual/anual de días de tormenta
DF	Número medio mensual/anual de días de niebla
DH	Número medio mensual/anual de días de helada
DD	Número medio mensual/anual de días despejados
I	Número medio mensual/anual de horas de sol

Se aprecia como existen 33 días de heladas al año. Se trata de una cifra significativa y seguramente se trata de un factor a tener en cuenta se encuentra lejos de ser el principal en la degradación. Nuevamente el tratamiento con hidrofugantes en las partes más expuestas, que impide la entrada de agua en los poros, es la única medida lógica de protección, con las mismas salvedades y precauciones que se han expresado al tratar la disolución kárstica.

En cuanto a las sales, la cartografía no ha detectado una presencia significativa. El análisis revela que se trata de cloruros pero principalmente sulfatos. Los contenidos más elevados se encuentran en las claves de los arcos.



De deposición se puede deber a la morfología de la estructura. En el intrados de estas claves se remansa el agua durante las precipitaciones permaneciendo húmedas cuando la precipitación cesa. En los riñones, debido a la pendiente, el agua escurre hacia el terreno. Cuando se evapora el agua remansada en las claves, precipitan las sales que lleva disueltas. La repetición del proceso en cada precipitación, ha llegado a producir una ligera acumulación salina en estos puntos.

En tratamiento contra sales se aborda primero en sus causas y luego en la extracción de las mismas del material que las aloja. Nuevamente es la hidrofugación el único medio para evitar la futura acumulación de las mismas. Pero además, es necesario extraer las ya depositadas ya que algunas sales son higroscópicas; se disuelven en la humedad ambiente en tiempo húmedo y cristalizan en tiempo seco continuando su acción lesiva. La técnica para la extracción salina se expresa más adelante.

Adicionalmente, aunque no se han detectado contenidos significativos de sales por capilaridad ascendente desde el terreno, se considera muy conveniente establecer un buen drenaje del agua que impida el encharcamiento del agua en las proximidades de la estructura y la derive hacia cualquier sistema de desagüe.

9.5 Formación de costra negra

Se han detectado costras negras, si bien con poco desarrollo, en las claves de los arcos. Estas costras negras están formadas por sulfatos, principalmente sulfato cálcico bihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, yeso). Presentan un típico color negruzco debido a la acumulación de partículas sólidas de contaminantes. Debajo de la costra yesífera el material aparece arenizado de forma que aquella termina por quebrarse y desprenderse arrastrando la piedra arenizada. Cuando se encuentran bien desarrolladas, cual no es el caso presente, aparecen con un aspecto colomorfo.

Su origen hay que buscarlo en el ataque por contaminantes sulfurosos a los minerales de los materiales de construcción. El SO_2 , de dichos contaminantes se oxida con el oxígeno atmosférico y el anhídrido sulfúrico formado se combina con la humedad ambiente para formar ácido sulfúrico



Este ácido sulfúrico forma sulfatos al atacar los morteros.



El sulfato cálcico es menos móvil que otros sulfates y permanece "in situ" mientras que sulfates más móviles pueden ser arrastrados por disolución en el agua de las precipitaciones a otras áreas.

Hoy día no es de esperar contaminación significativa por SO_2 en el Circo, pero pudo producirse en el tiempo de las calefacciones de carbón, dejando las



costras negras como un efecto de esa época. No parece necesario, en consecuencia, tomar precauciones para que no se formen en un futuro pero hay que retirar las ya formadas. Al fin y al cabo, los sulfatos son sales solubles pudiendo ser aplicable aquí lo anteriormente expuesto al tratarlas.

Estas costras negras deben ser eliminadas mecánicamente, procediendo seguidamente a la desalinización de la zona afectada. Hay que tener en cuenta que la costra negra ya no es material original sino un producto de alteración que sigue groseramente su morfología. El substrato arenizado es difícil de conservar y no aporta un elemento de valor histórico artístico esencial para la comprensión del monumento. Por ello, debería ser saneado antes de proceder a la desalinización.

9.6 Biocolonias

Si bien las biocolonias son escasas debido a la naturaleza de la cal que proporciona un medio alcalino, se han apreciado colonias de musgo, líquen e incluso plantas. En las claves y zonas de umbría también se ha observado algas. El musgo, algas y las plantas, especialmente estas últimas deben ser eliminadas pues ejercen un efecto dañino: Las plantas por sus raíces y el musgo por sus rizomas. El efecto de las algas es casi únicamente estético no produciendo daños apreciables.

El líquen está indicando que actualmente no existe un ambiente contaminado en la zona, en el que no podrían desarrollarse. Su crecimiento es muy lento y su capacidad de dañar muy reducida, siendo compensada por ejercer un cierto papel como hidrofugante al impedir la entrada de agua donde se asientan, permitiendo la transpiración en cambio. En consecuencia, no es imperativa su eliminación.

Los tratamientos biocidas se especifican en el apartado de técnicas, no obstante es necesario advertir que solo un buen mantenimiento periódico es eficaz a largo plazo, ya que si las condiciones son favorables las colonias vuelven a desarrollarse.

9.7 Otras actuaciones

Las causas señaladas han afectado profundamente al Circo Romano en algunas zonas. Algunos arcos han colapsado y otros están en riesgo de hacerlo. La fracturación suele progresar a partir de las claves. En el apartado de técnicas se describe el sistema de cosido de las mismas.

En otras zonas la erosión ha provocado que algunas zonas hayan colapsado, quedando otras en voladizo.

La única solución es apejar las zonas en voladizo y con riesgo futuro de colapso, con elementos inalterables.



10 Técnicas

10.1 Relleno de oquedades y morteros de reintegración

En grietas finas, se podrá inyectar mortero de cal hidráulica a través de las boquillas de inyección, una vez que se han cerrado posibles bocas de fuga.

Para que la operación sea lo más completa posible, sería conveniente un árido muy fino (inferior a 0,5 mm). Bien es cierto que un árido fino podría provocar ascenso capilar de humedades, pero la ausencia de humedad y los sistemas de drenaje evitan temer este riesgo.

La presión de inyección es otro factor a tener en cuenta. Esta debe ser lo más elevada posible para lograr mejor el relleno, pero no tanto como para abrir o provocar nuevas fisuras.

En las oquedades más gruesas se puede introducir mortero retacado de cal hidráulica. En este caso el árido puede ser más grueso, y no es necesario que se encuentre bien clasificado.

Convenientemente armado con camisas y/o anclajes, inertes a base de acero inoxidable o fibra de vidrio, se puede utilizar el mortero para reintegraciones donde fueran necesarias para la buena estabilidad estructural.

En todos casos el árido más conveniente sería de arena de río. La arena de miga proporcionaría un mortero demasiado compacto y exento de porosidad respecto al original.

En cuanto se refiere al aglomerante se podrá utilizar cal hidráulica. Bien es cierto, que el mortero romano se ha confeccionado con cal aérea, pero este material, la cal aérea, es difícil de trabajar y requiere un conocimiento artesanal no siempre disponible. Hay que tener en cuenta la dificultad de carbonatación de la cal aérea en oquedades y espacios internos donde es difícil que llegue el aire con el anhídrido carbónico necesario para producirla. Ante este riesgo, se prefiere utilizar cal hidráulica. El índice de hidraulicidad en cualquier caso no debe ser muy elevado para que no se produzca un mortero excesivamente rígido en comparación con el original, de forma que no se generen tensiones.

El índice de hidraulicidad será medio, según la siguiente tabla (0,16 0,31)



Hidraulicidad según el tipo de cal

Tipo	Índice de hidraulicidad
Cal aérea	0,0 a 0,10
Cal débilmente hidráulica	0,10 a 0,16
Cal medianamente hidráulica	0,16 a 0,31
Cal hidráulica normal	0,31 a 0,42
Cal eminentemente hidráulica	0,42 a 0,50

Índice de hidraulicidad

$$I = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Con lo que según la siguiente tabla se tiene un tiempo de fraguado de entre 10-15 días.

Contenido de las cales y fraguado

Designación	% Impurezas	Tipo de impureza	Índice hidráulico	Tiempo de fraguado en el agua
Cal común, Cal grasa	<5.3	Si, Al	0.0-0.10	No
Cal Árida, Cal Magra	8-12	Si, Fe, Mn, Mg	0.10-0.16	16-30 días
Cal Dolomítica	13-17	Mg	0.0-0.10	No
Cal medianamente Hidráulica	18-20	Arcillas, Mg, Mn, Fe	0.16-0.31	10-15 días
Cal Hidráulica	20-25	Arcillas, Mg, Mn, Fe, SiO ₂ preponderante	0.31-0.42	5-9 días
Cal eminentemente Hidráulica	25-27	Arcillas, Mg, Mn, Fe, SiO ₂ preponderante	0.42-0.50	2-4 días
Cal límite o cemento lento	25-36	Arcilla	0.50-0.65	1-12 horas
Cemento rápido	37-65	Arcilla	0.65-1.20	5-15 minutos

Se podría sustituir la cal hidráulica por una mezcla de cal aérea/cemento blanco bajo en sales (por ejemplo, UNE 80-305/88 RIGAS), en la proporción 5/1, si no se encontrara una buena cal hidráulica.

En este caso, la cal aérea no deberá ser lo que se comercializa como hidróxido cálcico, producida mediante el apagado rápido industrial, sino cal apagada manualmente. Preferiblemente cal ensilada durante largo tiempo. Si no se encontrara, se podría apagar la cal en obra manteniéndola en reposo, en bidones cubierta con agua el mayor tiempo posible. Esto aumenta el



tamaño de los cristales de portlandita y facilita la carbonatación del hidróxido cálcico. Además elimina las posibles sales presentes.

Respecto a las sales, en ambos casos, se trate de cal hidráulica o cal aérea/cemento, el contenido debe ser bajo en estos compuestos. Ahora la normativa reciente ya exige unos contenidos máximos aceptables pero hasta ahora no ha sido así.

En ambos casos, también, deberían tener un bajo contenido en magnesio, en cualquier caso no superior al 2,8 %, que contienen los morteros originales.

10.2 Apeos, cosidos y anclajes

En las zonas donde se aprecie la presencia de fragmentación de la estructura, se pueden cosidos o anclajes. La técnica se refiere más adelante.

No obstante lo cual, hay que ser consciente de la dificultad de practicar taladros en la estructura de mortero de cal y piedra. El mortero de cal es blando y plástico mientras que la piedra metamórfica que contiene es un material muy resistente a la perforación. Por ello, es de temer que, al practicar el taladro fácilmente en el mortero de cal, y encontrar una piedra en el interior, el mortero no mantenga la resistencia necesaria para apoyar la operación y se fragmente. Esta fragmentación puede ser especialmente arriesgada en las claves de los arcos por cuanto la fisuración provocada podría llevar al colapso.

Siempre que se aprecie este riesgo, que será en la mayoría de los casos, no habrá otra forma de actuar que acudir a realizar apeos para sostener la estructura. Se tratará, no obstante, de que estos apeos se realicen con material inalterable y con el menor impacto estético posible.

En aquellos casos en que la disposición de las fisuras lo permita, sin embargo, y existan garantías de que los taladros se pueden llevar a cabo sin los riesgos señalados, se podría acudir a llevar a cabo el cosido de las fisuras. Esta actuación queda oculta, no provocando ningún efecto en la apariencia del monumento. Sin embargo, es de temer que la mayor parte de las veces no se pueda llevar a cabo si riesgos. No obstante lo cual, por si fuera posible en algún caso se describe aquí la actuación pertinente, en las claves, la zona más complicada:

Se colocarán dos varillas en aspa, para impedir el arranque por tracción debido al peso. Los asientos de los anclajes, deberán encontrarse lo más sanos posible. El cosido en aspa, impide desplazamientos que se podrían producir si los cosidos consisten en varillas paralelas, en dirección normal a las mismas. Dada la baja consistencia del mortero, en este caso, las varillas podrían ser



arrancadas junto con un muñón de mortero resinado.

Las varillas serán de acero inoxidable, o mejor de fibra de vidrio embutidas en resinas epoxídicas. Se excluye el acero normal por su alterabilidad. En lo que se refiere a la alterabilidad de resinas, se conoce que son sensibles a la radiación UV, pero al permanecer ocultas, este fenómeno no es de temer.

Las resinas epoxídicas mantienen patente de 1938. Son resinas termofraguantes de una gran importancia técnica y comercial, disponibles en el mercado a partir del 1946, inmediatamente después de la segunda guerra mundial. Los productores son numerosos en todo el mundo, sobre todo por el interés desarrollado en los últimos años en la fabricación de los mencionados compuestos hechos a base de resinas termofraguantes (como las epoxídicas y el poliéster) con la agregación de refuerzos fibrosos que sirven para aumentar su resistencia mecánica. Además que para los materiales compuestos las epoxídicas se usan en los elementos de la industria electrotécnica, química y mecánica.

En conservación del patrimonio se comenzaron a aplicar poco después de encontrarse disponibles en el mercado. Durante este tiempo de aplicación, no se conocen otros efectos contrarios a su durabilidad que los referidos. La alteración, en presencia de agua, que a veces se ha señalado, se ha hecho en condiciones de laboratorio, diferentes a las de la obra, y su uso en restauración se encuentra muy extendido en sellado de fisuras y adhesión de piezas. Está contraindicado su uso en exterior por amarillear rápidamente y por su dilatación lineal térmica, muy superior a la de la mayoría de los materiales históricos.

La resistencia mecánica a tracción de las varillas de resina reforzadas con fibra de vidrio alcanza el valor de 300 Kg/cm² a tracción, superior en cualquier caso, a la resistencia, normal al anclaje del mortero. Ello lleva a considerar que el colapso no se producirá por fallo mecánico de la varilla, sino por desprendimiento de la misma con un muñón de mortero y resina.

Las varillas se pueden confeccionar en obra o se pueden adquirir en mercado. FETASA, las comercializa bajo pedido, con una superficie rugosa, adecuada al fin previsto. En obra se pueden confeccionar introduciendo varilla de fibra de vidrio en un tubo de vidrio parafinado y vertiendo después resina epoxídica hasta rellenarlo.

El acero inoxidable roscado también se utiliza frecuentemente en restauración para cosidos y anclajes. También se estima una alta durabilidad, en ausencia de corrosión galvánica y máxime, encontrándose embutido en resina. Tampoco se han reportado problemas en las intervenciones ejecutadas con este material.

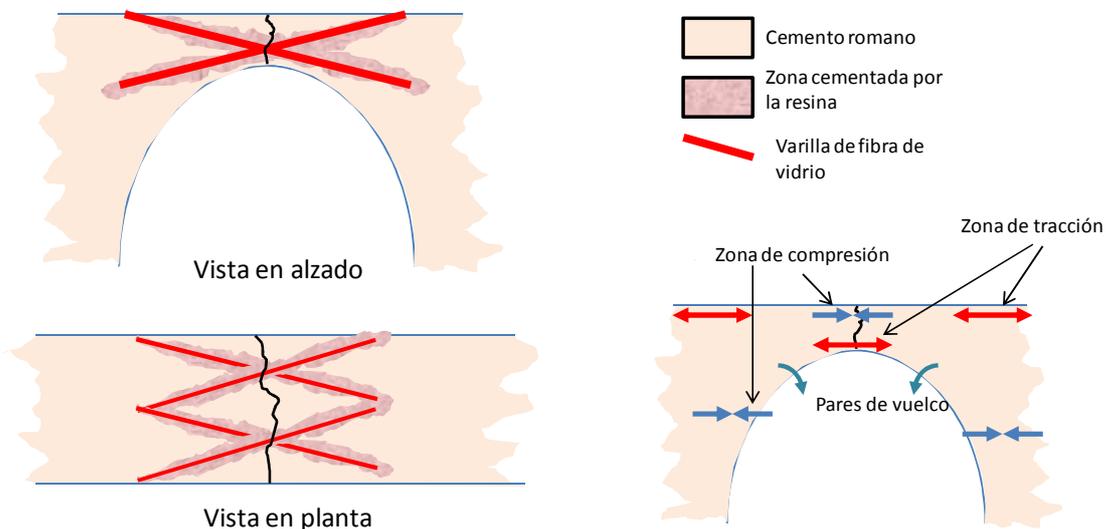
La ejecución es practicar el taladro; a continuación introducir la varilla y verter resina epoxídica (FETASA nuevamente puede orientar sobre la resina más

adecuada, normalmente FETADIT IN/63 2/C). Es de esperar que si se utiliza una resina de baja tensión superficial embeba una amplia zona de mortero alrededor de la varilla, dada la amplia porosidad de éste.

Si se tuviera que efectuar el anclaje en alguna pieza muy deteriorada, sería conveniente efectuar la consolidación interna previa de la pieza, inyectando resina epoxídica de baja tensión superficial a través del taladro; volver a taladrar y ejecutar el anclaje como se ha explicado anteriormente.

Por otro lado, este tipo de resina viene siendo ampliamente utilizado en ingeniería civil y en la construcción, sin que existan informes negativos similares. Por nuestra parte, en los más de 230 monumentos que llevamos estudiados no hemos podido apreciar este tipo de problemas, sin embargo, se trata de materiales bastante recientes y solo el paso del tiempo advertirá de si existen contraindicaciones del tipo de las anotadas o se trata de problemas locales, no inherentes a las propias resinas. No obstante lo cual, y como norma general en restauración, se debe usar de estos productos relativamente nuevos y no testados por el paso de los siglos, con prudencia y solo cuando sean imprescindibles.

El cosido de las claves fracturadas presenta un problema particular. Seguidamente se ofrece un esquema de la manera de actuar. En planta a efectos de representación se han dibujado dos cosidos en aspa pero es mejor colocar varios cosidos con varillas más finas que menos con varillas más gruesas.



Croquis del cosido de las claves

En los arcos, la parte superior de la clave trabaja a compresión y el cosido sería inútil. Es más bien la zona próxima al intradós que trabaja a tracción la que debe ser reforzada. Cuando la erosión haya provocado una luz excesiva, se puede considerar efectuar un cosido adicional en los riñones. En esta zona, al contrario que en la clave, la zona que trabaja a tracción es la superior.

Solo se considerará la colocación de apeos cuando el cosido no ofrezca garantías por el fuerte deterioro de la estructura.

10.3 Extracción de sales



Extracción de sales mediante apósitos de carboximetil en la Portada de la Iglesia de Santa María de Aranda de Duero.

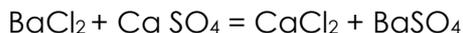


Pruebas de extracción de sales mediante apósitos de sepiolita en la Portada de la Iglesia de San Pablo de Valladolid.

La metodología a seguir para la extracción es la siguiente:

Desalación con apósitos de material absorbente sobre las superficies señaladas por la cartografía; puede ser pasta de papel, carboximetil celulosa, atapulgita o sepiolita. Esta última se comercializa para este fin con un tratamiento de triactivación que la hace más eficiente, al eliminar los cationes que contiene y que reducen su capacidad de absorción. Los apósitos se empapan con agua destilada de forma similar a lo expresado al referirse a la limpieza con arcillas especiales, que penetra en el material a tratar disolviendo las sales. Una vez que el apósito se seca, las sales se han depositado en el mismo, donde ahora se encuentra el frente de evaporación. Si se trata de arcillas el apósito se resquebraja y se desprende por si solo, quedando un polvillo que se puede eliminar con aire comprimido o lavando suavemente con agua destilada. A veces se acude a colocar papel Kleenex, entre el apósito y el muro para una mejor eliminación posterior de los restos de arcilla.

Como se han detectado sulfatos, se efectuará un rociado previo a spray con disolución acuosa de cloruro de bario al 2%. Este rociado tiene como objeto inmovilizar los sulfatos transformándoles en cloruros según la reacción.



El sulfato de bario es insoluble, así que se trata de un compuesto inactivo y no dañino. Lo que se persigue es que los sulfatos se recubran de una coraza insoluble de sulfato de bario que los inmovilice, a cambio se incrementa la proporción de cloruros, móviles y peligrosos. Estos cloruros que serán extraídos junto con el resto de las sales, mediante la aplicación posterior de apósitos de agua destilada.

La aplicación de sulfato de bario es especialmente útil donde existan sulfatos poco solubles, como el sulfato cálcico de las costras negras, que, de otro



modo, pasarían con dificultad a los apósitos.

10.4 Tratamientos biocidas

Abordar las condiciones que las producen es la primera medida a tomar ya que cualquier biocida que los elimine, no evitará que vuelvan a aparecer. Esto es difícil de llevar a cabo en una estructura expuesta al intemperismo, así que el mantenimiento periódico es la mejor garantía de defensa frente a la acción de organismos.

Localmente, puede ser conveniente impregnar con una disolución de formol en agua al 10 %, para que mueran los organismos, antes de la limpieza mediante cepillo. Normalmente el tratamiento de consolidación aplicado en disolventes orgánicos es ya biocida.

El algicida más extendido es el cloruro de alquil-benzil-dimetil-amonio (cloruro de benzalconio). Contra las algas también se comercializan productos a base de sales de cobre tales como sulfato de cobre Cu SO_4 , sulfato de cobretetramina $(\text{NH}_3)_4\text{CuSO}_4$, y sulfatos complejos de cobre hidrazina $\text{Cu SO}_4-(\text{N}_2\text{H}_5)_2 \text{SO}_4$. Las sales de cobre presentan riesgos de teñido por lo que no se deben emplear. Asimismo, se han utilizado compuestos fenólicos que pueden producir cambios de coloración en la piedra.

A veces se han combatido las colonias de algas con rayos UVA (longitud de onda de 250 nm.) producidos por una lámpara de 40 W, retirada unos 15 cm. de la superficie y aplicada durante una semana².

Contra colonias de musgo y líquen se ha utilizado hipoclorito de litio en solución acuosa al 2%, seguida de aplicación de Lito 7 (detergente neutro de Ciba Geigy), para terminar con un tratamiento a base de triazina, el Lito 3, también de Ciba Geigy, pero este tratamiento puede generar sales peligrosas por lo que se encuentra contraindicado.

Durante un tiempo, contra las plantas se ha utilizado la sal de cocina en el tocón del tronco una vez serrado, pero el cloruro sódico es una sal móvil y peligrosa. Hoy día se aplican derivados de la triazina como la clorotriazina aplicada en las raíces, siendo preferibles, sin embargo, los que se aplican en las hojas como la metoxitriazina. Estos biocidas son de baja toxicidad para animales y personas y perduran un tiempo, por su baja solubilidad no extendiéndose a zonas contiguas a las que se quieren tratar. Una vez muertas las plantas, se arrancan mecánicamente.

El papel de los líquenes y la conveniencia de su eliminación, ha sido ampliamente debatido. Por un lado se ha defendido su eliminación aduciendo el deterioro que originan en la piedra. Por otro, se ha propuesto su

² VAN DER MOLEN, J.M., GARTY, J., AARDEMA, B.W., KRUMBEIN, W. E. *Growth control of algae and cyanobacteria on historical monuments by a mobile UV unit. (MUVU)*. Studies in Conservation, vol 25, n. 2. 1980, 71-77.

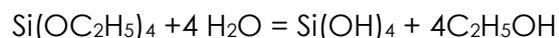
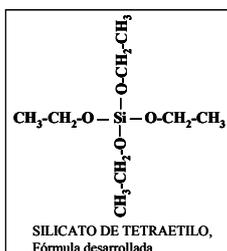


conservación, dado que la lentitud de su crecimiento conlleva una agresión ralentizada y limitada a la parte superficial. Esta lesión una vez producida progresa aún más lentamente, compensándose sus negativos efectos con el papel protector e hidrofugante que la capa de líquen representa. Aún se han propuesto razones estéticas y el impacto social que su eliminación tendría, en monumentos, como por ejemplo, la Catedral de Santiago, cuyo cromatismo actual lo deben estas colonias.

El uso de biocidas siempre implica un riesgo de manipulación, y para el medio ambiente derivado de su toxicidad, por más que la industria química ha tratado de que los productos más recientes mantengan la toxicidad más baja posible para personas y animales, por lo que siempre existe un problema de dosis. Además, su eficacia es siempre limitada en el tiempo, por lo que un buen programa de mantenimiento constituye el biocida más seguro y eficaz.

10.5 Consolidación con ésteres silícicos.

Los ésteres silícicos se conocen como silicatos de etilo. Los ésteres silícicos reaccionan con el agua en presencia de un catalizador ácido (ácido clorhídrico, acético o fórmico), precipitando gel de sílice hidratada, liberando alcohol etílico, según, por ejemplo



Silicato de etilo + agua = gel de sílice hidratada + etanol

Posteriormente por desecación y al igual que en los casos anteriores, la sílice hidratada (ácido silícico) termina liberando sílice libre que cementa los granos de la piedra.



El alcohol contribuye a eliminar la humedad y finalmente se evapora. La reacción es muy lenta y hay que esperar un cierto tiempo para garantizar su consecución (al menos tres semanas) y, como los ésteres silícicos son volátiles, es preciso tomar precauciones para que no se evapore antes de que la reacción se haya completado. También es necesario eliminar el producto que queda en superficie para evitar eflorescencias de sílice.

Un inconveniente es que la humedad ambiente puede condicionar ampliamente el tiempo de reacción, sobre todo el de deshidratación del gel hidratado. Se han referido problemas en las aplicaciones en climas muy húmedos como el del norte de España, produciéndose eflorescencias por cristalización de la sílice en superficie, casi imposibles de eliminar.

La velocidad de reacción está fuertemente condicionada por el catalizador, normalmente se trata de un ácido, puede ser ácido clorhídrico, aunque la



mayoría de las firmas que comercializan estos preparados se reservan la información sobre su naturaleza.

Normalmente estos productos se presentan disueltos en white spirit o etanol y la baja tensión superficial de los preparados es un factor positivo para su buena penetración.

Hay que tener en cuenta que al contrario de lo que sucede con los consolidantes orgánicos, este tratamiento no posee ningún poder hidrofugante. Esto es consecuencia de que la sílice es hidrofílica, y al igual que ocurre con los demás tratamientos inorgánicos, si se quiere hidrofugar, se debe aplicar un tratamiento específico de esta naturaleza (a base de siliconas).

El principal inconveniente es su irreversibilidad junto con lo impredecible de su velocidad de reacción en función de factores ambientales. Como se ha explicado, hoy día existen en el mercado preparados precatalizados donde este último inconveniente se elimina parcialmente.

Otra fuente de problemas pueden derivarse de la reacción de deshidratación del gel hidratado. Al microscopio electrónico de barrido se aprecia como en un primer momento se forma, a veces, una película que tapona los poros, que al deshidratarse se agrieta liberando la porosidad. A veces esta segunda reacción se acompaña de una removilización del producto que puede llegar a ocluirla o no agrietarse dejando los poros taponados. Por ello es importante que los estudios de este tipo se realicen una vez que la reacción ha finalizado completamente, lo que, como se explicado puede llevar tres semanas tras el tratamiento.

En definitiva, se trata de uno de los consolidantes más utilizados y convenientes, pero debe ser aplicado por manos expertas.

Algunos de los productos comerciales de silicatos de etilo que se pueden encontrar en el mercado y que han sido utilizados en restauración son:

- Sandsteinverfestiger OH de la WACKER CHEMIE.
- OH Wacker de la WACKER CHEMIE³.
- Tegovakon V de T.H. GOLDSCHMIDT A. G⁴. Utilizado en los ensayos que se han realizado en laboratorio para este estudio. Se trata de tetraetoxisilano en etanol y oligómeros al 75 %. Catalizador desconocido.
- AC70 de RHÖNE POULENC

³ Wacker tiene varios productos de este tipo, ver

http://www.ctseurope.com/depliants/%7BB5EC5498-B604-4B96-81EA-238FBF0159D9%7D_2.1%20consolidanti_6di6.pdf, y http://www.hotfrog.es/Empresas/Wacker-Quimica-Iberica_239574.

⁴ Dirección de Goldschmidt en España

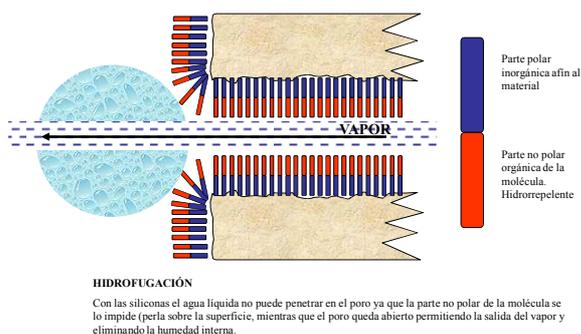
http://www.autoindustria.com/productos/escaparate.cfm?id_emp=3258.

- Rhodosil RC70 de RHÖNE POULENC.
- ESTEL 1000 de la C.T.S.5
- Tegovakon V 100 de BASF
- Funcosil 300 (KSE 300) de Remmers Baustofftechnik GMBH. Se trata de ortosilicato de tetraetilo (<80%) con catalizador de dilaurato de dibutilestano (1,0%). El fabricante no aporta datos sobre el 20 % restante, aunque normalmente se suele tratar de etanol o White spirit.

En el Circo Romano, dada la baja tensión superficial y viscosidad del producto, y la alta porosidad del mortero, es de esperar una buena penetración. En morteros de similar porosidad hemos encontrado una penetración de 10 cm. Este factor es muy importante para evitar que se produzca una delgada capa endurecida, consolidada, sobre un substrato plástico como es el mortero de cal que terminaría por quebrarse. Cuanto mayor espesor de la capa consolidada, menos probabilidad de que ocurra este efecto.

Otro efecto de temer es la reducción de la porosidad en un material tan poroso como el mortero romano. Es esencial recordar la necesidad de esperar, al menos 20 días antes de aplicar cualquier otro tratamiento, por ejemplo de hidrofugación, sobre la zona consolidada. Durante ese tiempo se produce la deshidratación abriéndose una neoporosidad por microcraquelado de la capa de silicato de etilo. Dicha deshidratación debe producirse en ausencia de fuerte humedad ambiente, e insolación directa.

10.6 Hidrofugación.



Para la hidrofugación hoy día se utilizan casi exclusivamente los polisiloxanos denominados siliconas (de cadena corta). Los polisiloxanos son compuestos que contienen una base silícica inorgánica, y cadenas orgánicas. La base silícica tiene afinidad electroquímica por la

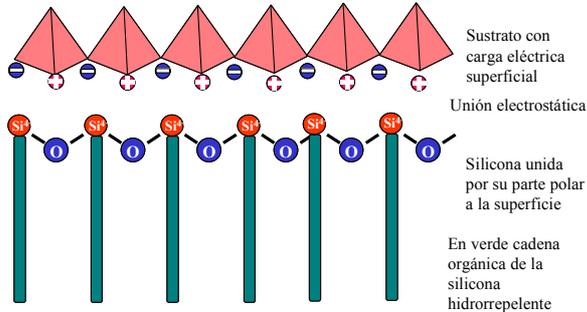
superficie de los morteros, mientras que la cadena orgánica es hidrorrepelente. La silicona forma una capa molecular sobre la superficie del material. Las cadenas orgánicas se disponen hacia el exterior de dicha capa. El efecto es como encerar una tabla donde el agua que podía mojarla, ahora perla.

El tratamiento hidrofugante no debe modificar el aspecto de la superficie de

⁵ Consolidantes de Estel, a base de silicatos de etilo pueden consultarse en http://www.ctseurope.com/depliants/%7BA39B04DC-3FA9-47EA-8D36-2473A50F7952%7D_Linea%20Estel.pdf

forma que sea imposible establecer organolépticamente si una zona ha sido tratada, a menos que se vierta agua sobre ella.

El tratamiento hidrofugante a base de polisiloxanos no modifica la porosidad de la superficie o lo hace débilmente. En consecuencia, no afecta a la capacidad de la eliminación de la humedad interna por transpiración.



Ello se debe a que el polisiloxano forma una finísima capa que tapiza la superficie de los poros pero no los obstruye. Dicha capa hidrorrepelente, impide la entrada del agua líquida pero al no estar ocluido el poro la eliminación del agua en forma de vapor no resulta

afectada.

Se ha advertido de contrastes entre zonas tratadas y sin tratar con el tiempo, aunque en nuestra experiencia, no hemos observado este efecto en más de 230 monumentos estudiados. Podría deberse a la acumulación de polvo y mugre en las zonas no tratadas, mientras que en las que lo han sido, dichos elementos no pueden alojarse en la porosidad con el agua que los transporta, siendo lavados por la siguiente precipitación.

Las siliconas son muy débiles mecánica y químicamente, por lo que el tratamiento hay que volver a aplicarlo periódicamente (los fabricantes no garantizan una durabilidad por encima de 10 años). Para incrementar su resistencia se puede agregar a la silicona una pequeña proporción de resina acrílica tal como más adelante se describe.

En el mercado aparecen varios preparados de este tipo:

- Silirain 50 es un polisiloxano.
- Dow Corning comercializa bastantes preparados de este tipo⁶.
- Dow Corning DRI-SIL 55 de la Dow Chemical, es un polisiloxano en disolución acuosa.
- De T.H Goldschmidt A.G, se encuentra Tegosivín HL1007, un polisiloxano ampliamente utilizado en restauración.
- Dri Film 104 de la General Electric. Este producto se ha aplicado en la fachada de la iglesia de San Petronio en Bolonia.
- 2902 de la Wacker Chemie.
- Rhodosil 11309 de la Rhône Poulenc.

⁶ <http://www.dowcorning.com/content/publishedlit/63-1042-05.pdf>.

⁷ <http://www.dbbecker.com/TSIVHL-100.pdf>



- Impregnante Baysilone LV-N de BAYER. Es una solución de resina de silicona en xileno/Butanol.
- Impregnante Baysilone LO-N de BAYER. Es un Alcoxi-siloxano fuertemente alcoholizado 8
- SILO 111 de la C.T.S. Es un organosiloxano en disolución de Aguarrás Mineral.
- Sellador hidrófugo invisible de JUNO.
- Dique fluido hidrofugante de PROCOLOR.
- Impermeabilizante de fachadas de TEAIS Resina a base de un siloxano-oligómero de baja molecularidad

Todos ellos son preparados a base polisiloxanos de cadena corta como principio activo, en disolvente.

Las siliconas en cadena lineal son solubles en disolventes orgánicos pero no en agua. Normalmente se presentan en white spirit.

A veces se comercializan como emulsiones para ser inyectadas en orden a formar barreras contra capilaridad ascendente, pero estos productos en emulsión en agua, no penetran bien en los poros de la piedra formando una capa superficial por lo que no deben ser usados como tratamientos superficiales hidrofugantes.

Los productos comercializados como hidrofugantes en solución acuosa (no en emulsión) son generalmente siliconatos de sodio o potasio. El inconveniente de estos compuestos, más cómodos que los aplicados en disolventes orgánicos, es que liberan sosa cáustica, que con el tiempo general de sales peligrosas, por lo que no deben ser utilizados.

Otro inconveniente de las siliconas es su inestabilidad frente al oxígeno y la luz, lo que obliga a un mantenimiento periódico, así como la debilidad de la fina capa hidrófoba frente a agresiones mecánicas. Simplemente el polvo arrastrado por el viento puede irlo eliminando.

Para incrementar la durabilidad de los tratamientos con silicona se les puede agregar una pequeña cantidad de resina acrílica.

Dentro de esta gama de productos se ha venido utilizando una combinación de metilmetacrilato (Paraloid B72 al 30 % en disolvente nitro: 1:1 xileno y tolueno) con un polisiloxano (Dri Film 104 al 70 % en white spirit) disuelto en tricloroetano 1.1.1 en las proporciones 10:10:80, aplicado por Ottorino Nonfarmale y Rossa Manaressi en la Fachada de S. Petronio y en el Colegio de España en Bolonia. También se puede utilizar tricloroetano como disolvente.

⁸ Bajo el nombre de Baysilone con distinta numeración, Bayer comercializa distintas formulaciones, la mayor parte son siliconas en disolventes orgánicos, otras son emulsiones (véase <http://www.chemidex.com/products/supplier/GE+Bayer+Silicones/industry/%E6%B2%B9%E6%BC%86%E8%88%87%E5%A1%97%E6%96%99/lid/14/iid/6001/rid/5002/cyid/1000288>).



Bajo nuestras recomendaciones se han utilizado distintas formulaciones de este tipo en muchos monumentos (Puente de Toledo, Portada del Hospicio, Monumento a Alfonso XII, Monumento a Colón, todos ellos en Madrid, Hospital de Tavera y Portada de los Reyes de la Catedral de Palencia, Muralla en Toledo y muchos otros). En ningún caso y hasta la fecha, se han podido detectar efectos indeseados o nocivos, manteniéndose la permanencia del tratamiento y efectividad del mismo (salvo ligeras modificaciones de tono en piedra muy poco porosa, que se ha descrito al tratar las resinas acrílicas).

La formulación se puede dosificar según se requiera mayor poder hidrofugante (mayor proporción de silicona) o consolidante (mayor proporción de acrílico). En cualquier caso, ambos componentes deben estar presentes ya que los tratamientos hidrofugantes se protegen con el acrílico y los tratamientos con intención consolidante, siempre es conveniente que mantengan un cierto poder hidrofugante. En el Teatro Romano de Toledo se busca el efecto hidrofugante, por consiguiente, debe predominar claramente la silicona. De hecho el acrílico añade cierto poder consolidante pero reduce algo la porosidad.

Para preparar la acrílica se toma el acrílico, que viene sólido, se ablanda primero con acetona. Entonces se disuelve en tricloroetano o disolvente nitro.

La silicona puede ya venir disuelta en white spirit. De no ser así se disuelve en este hidrocarburo.

Ahora, se mezclan las dos disoluciones en la proporción adecuada hasta conseguir las concentraciones requeridas. Una formulación conveniente al propósito que nos ocupa y adecuada a las características del mortero podría ser la siguiente utilizada bajo nuestra recomendación en la reciente intervención en la Catedral de Pamplona:

HIDROFUGANTE PARA CATEDRAL DE PAMPLONA							
DISOLUCION	CONSOLIDANTE		HIDROFUGANTE		DISOLVENTE	DILUYENTE	
	ACRILICO	DISOL	SILICONA	DILUY	AGREGADO	AGREGADO	
						SUMA	
PARTES PRODUCTO	2		80		15	5	102
DISOL-DILUYENTE			W. SPIRIT				
CONCENTRACION	60,00%	40,00%	70,00%	30,00%			
COMPONENTES SOBRE TOTAL %	1,18%	0,78%	54,90%	23,53%	14,71%	4,90%	100,00%
TOTAL MAT ACTIVA	56,08%						
TOTAL DISOLVENTE	15,49%						
TOTAL DILUYENTE	28,43%						
ACRILICO/DISOLVENTE	7,59%						
ACRILICO/MATERIA ACTIVA	2,10%						
SILICONA/MATERIA ACTIVA	97,90%						
ACRILICO/SILICONA	0,02						
SILICONA/ACRILICO	46,67						
DISOLV/DILUYENTE	35,27%						

Donde el acrílico se encuentra al 60 % en tricloroetano o disolvente nitro y la silicona al 70 % en white spirit

La disolución final debe ser transparente, agregando tricloroetano hasta conseguirlo. De no lograrse una disolución trasparente, se incrementará la proporción de silicona para rebajar la de white spirit, incrementando, asimismo el tricloroetano.



Estos valores son estimativos y es el buen hacer del restaurador el que adoptará la formulación final, sin rebasar, en ningún caso, el 2 % de acrílico en total. Si una vez aplicado el tratamiento se observara que el poder hidrofugante es inferior al deseado se disminuirá la proporción de tricloroetano para incrementar la concentración de materia activa. También se pueden aplicar sucesivas manos hasta lograr el efecto deseado. Como es normal en restauración, las pruebas en obra establecerán la metodología final hasta conseguir el efecto deseado.

Este tratamiento se puede aplicar a brocha o spray, siempre a saturación del material.

Para comprobar el efecto hidrofugante, basta arrojar una pequeña cantidad de agua sobre la superficie tratada y una vez evaporado el disolvente (unos 3 días después de la aplicación). El agua deber perlar y no mojar la piedra.

El tratamiento se aplicará en todas las partes expuestas directamente a las precipitaciones. En las zonas abrigadas no sería necesario.