

Caracterización de los Materiales de Construcción y de los Procesos de Deterioro en los Edificios Históricos. Casos de Estudio en la Provincia de Jaén

María José Campos Suñol, María José de la Torre López

Programa de Doctorado "Geología Ambiental y Recursos Naturales". Departamento de Geología. Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas s/n, 23071, Jaén.

mjcampos@ujaen.es

Resumen

San Isidoro es uno de los monumentos ubetenses construidos con la llamada *Piedra Dorada*, calcarenita del Tortoniense Superior que se ha extraído tradicionalmente en la comarca de la Loma. Según la tradición local y los datos de estudios previos, existen dos variedades pertenecientes a la misma facies. Estas son la piedra Viva, bien cementada y con buenas propiedades físico-mecánicas, y la piedra Franca con mayor porosidad y fácilmente alterable.

A partir de la metodología seguida en San Isidoro, trataremos de caracterizar la Piedra Dorada de Úbeda y Baeza. De igual forma se intentará identificar y estudiar los distintos morteros de cal, yeso y cemento que han ido empleándose en las diferentes fases de intervención llevadas a cabo en el monumento. El crecimiento de eflorescencias tanto en las fachadas como en el interior acelera el proceso de deterioro de San Isidoro, que hasta el momento estaba estabilizado. Por último, expondremos una síntesis de las principales formas de alteración detectadas, tratando de identificar los agentes que las producen, poniendo estos datos en relación con factores microclimáticos y otros.

INTRODUCCIÓN

San Isidoro es un monumento situado en el centro histórico de Úbeda cuya fábrica original se remonta al siglo XIII. Ya desde sus inicios ha sufrido una larga y dificultosa evolución. El edificio primitivo se concibió en el gótico y se construyó sobre los restos de una fortificación árabe que defendía la ciudad por el oeste o una mezquita fuera del recinto amurallado (Torres, 1990, *Hist. Úbeda* VII). Constaba de tres naves, separadas por siete pares de pilares a partir del arco triunfal, cubierta únicamente por un alfarje, sin crucero (Gila, 1994, *Arq Rel* 206).

A principios del s.XVI, el obispo D. Alonso Suárez manda construir las dos portadas principales, la Norte y la Sur. En 1550 se presenta un ambicioso proyecto de renovación de la antigua fábrica. Algunos indicios llevan a pensar que fue Vandelvira o su aparejador, Alonso de Barba, los artífices de tal proyecto. Plantearon un modelo catedralicio (Jaén) a menor escala, que nunca se llegó a concluir ya que, la tremenda depresión económica sufrida en Úbeda durante el siglo XVI, ralentiza las obras en numerosas ocasiones e incluso obliga a revisar las trazas y a abandonar el proyecto inicial. En 1698 se finalizan las obras a través de un plan de urgencia definitivo en el que se derriba parte del edificio viejo, respetando las portadas y buena parte del muro perimetral, quedando el cuerpo de

la iglesia reducido a una sola nave longitudinal (Moreno, 1993, *Ub Renac* 155-163).



Fig. 1: portada sur de San Isidoro. Se aprecian las manchas de humedad y las densas eflorescencias en toda la arquivolta.



Fig. 2: fachada norte de San Isidoro, en proceso de intervención durante el 2004. También se distinguen las manchas por infiltración y las eflorescencias.

San Isidoro fue construido con la llamada ***Piedra Dorada***, calcarenita que se ha extraído tradicionalmente en la comarca de la Loma. Según la tradición local y los datos de estudios previos (Sebastián et al., 1996, *At Tici Sci Ter* 205-213 y Alcalde et al., 1996, *Reh Pat Arq* 515-539) existen dos variedades pertenecientes a la misma facies. Estas son la piedra Viva, bien cementada y con buenas propiedades físico-mecánicas, y la piedra Franca con mayor porosidad y fácilmente alterable. En el estudio realizado se han identificado ambos tipos, si bien en ocasiones resulta difícil determinar la variedad de una muestra en el edificio, puesto que son posibles todas las situaciones intermedias entre ambos litotipos. Realmente, se ha constatado que entre ambos tipos sólo hay diferencias en el grado de cementación y como consecuencia, en su porosidad total abierta.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo seguida en la realización de este proyecto se inició con una revisión bibliográfica de los escasos estudios previos existentes de las rocas de la zona, así como un análisis comparado de las diferentes fases arquitectónicas e intervenciones que ha sufrido San Isidoro.

Se prosiguió con una toma de muestras lo más amplia posible, de forma que pudiéramos caracterizar la “Piedra Dorada” y sus patologías sin alterar de manera significativa el estado de conservación del edificio. También se intentó recoger, a través de fotografías digitales, información de las zonas más dañadas del edificio así como identificar los puntos de muestreo.

Posteriormente se realizó el análisis de las muestras mediante difracción de Rayos X, con el que se consiguió estimar los porcentajes de los minerales siguiendo el método de los poderes reflectantes.

Con la Microscopía Electrónica (SEM) se pudo realizar el microanálisis y estudio petrográfico de algunas muestras, permitiendo identificar diferencias entre morteros, tratamientos aplicados sobre el material pétreo y presencia de sales en la microestructura.

Finalmente, mediante el Microscopio Petrográfico tratamos de estudiar la mineralogía y las relaciones texturales de las muestras.

RESULTADOS

Como podemos apreciar en la tabla 1, la piedra Viva (Fig.3) se caracteriza por un contenido en calcita netamente superior a la variedad Franca. En nuestras muestras, dicho contenido oscila entre un 68 y un 78% de la composición total. La calcita actúa tanto de cementante como aportando granos esqueléticos a la estructura. El cuarzo es el más abundante de los terrígenos y su contenido oscila entre un 10-15%, aunque pueden presentarse valores inferiores. Otros minerales encontrados en menores proporciones son los feldespatos y filosilicatos, especialmente micas, también con una representación muy heterogénea pero normalmente inferiores a un 10%.

La variedad Franca (Fig.4) responde a un contenido en calcita mucho menor en nuestras muestras, entre un 44-63% únicamente, frente a un enriquecimiento comparativo en el de cuarzo (21-23%). El resto de minerales oscilan dentro de las mismas proporciones heterogéneas que en la anterior, así como otros carbonatos, principalmente dolomita (Villegas, 1990, *Est Alter* 577), que pueden estar únicamente presentes como trazas o bien alcanzar hasta un 13% tanto en piedra Viva como en la Franca.

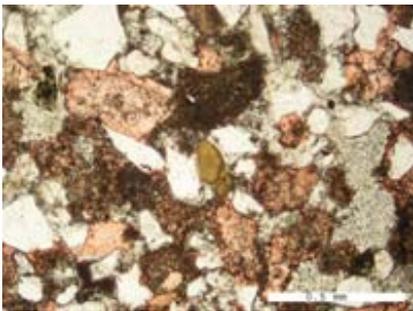


Fig.3: piedra Viva en lámina delgada con nicols paralelos. Sección teñida con rojo de Alizarina. Se aprecia la excelente cementación de la muestra.

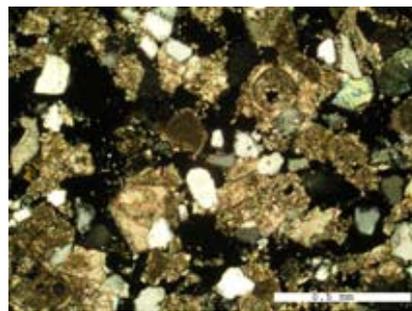


Fig.4: piedra Franca muy deteriorada, con pérdida de cemento calcáreo esparítico e incremento de la porosidad. Observada con nicols cruzados

Las dos variedades incorporan glauconita (Sebastián et al., 1996, *At Tici Sci Ter* 205-213) en su estructura que es la causante de que esta calcarenita muestre su color dorado tan representativo.

Tabla 1: **PIEDRA DORADA**
Composición mineralógica expresada en %

Muestra	Qtz	Cal	Fds	Dol	Fil	Gp	Arg	Otros <5%***
SI-1	13	78	8	trazas		trazas		hex
SI-2	23	63	trazas		12			
SI-3	11	68	trazas	trazas	15	trazas		hex/mi
SI-5	21	62	7	trazas		8		mi
SI-6	23	44		13	16	trazas		ww/wd
SI-11	23	52	9		12	trazas		nes/ww/wd
SI-20	6	72	7	7	7	trazas		
SI-21	15	72	trazas		11			oxalatos

***consultar abreviaturas en tabla 4

Como hemos indicado anteriormente, se han identificado distintos morteros en las juntas de los sillares, correspondientes a sucesivas etapas de restauración (Tabla 2). Por un lado tenemos los morteros de cal tradicionales (con un contenido en calcita de un 60%) que se han ido superponiendo uno tras otro en las fachadas y muros perimetrales, con variaciones en la cantidad de árido añadido, cuyos mayores problemas aparecen cuando se utilizan en zonas muy húmedas, por el crecimiento de cristales de yeso de neoformación en el interior de los poros (Benavente, 2004, *Eng Geol* 74: 113-127) o incluso por la formación de algunas costras negras potenciadas por la contaminación atmosférica (Madruga, 2003, *App Study Cult Her* 131-174 y Dolske, 1995, *Sci Total Envir* 167:15-31). Los nuevos morteros de restauración contienen cemento Portland o bien importantes proporciones en yeso, que desencadenan rápidos procesos de formación de eflorescencias salinas en la superficie expuesta de los sillares (Durán, 1992, *Soc Esp Miner* 15: 66-70).

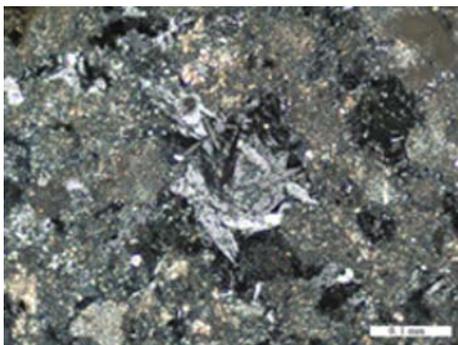


Fig.5: crecimiento de cristales de yeso aciculares en los poros de un mortero de cal. Nícoles cruzados.

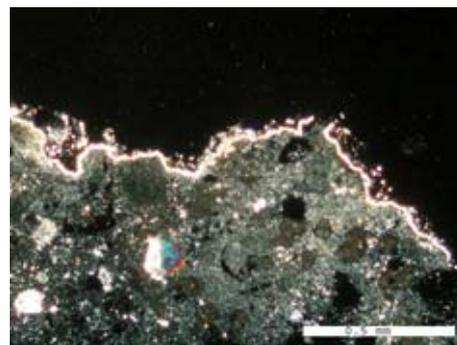


Fig.6: capa de suciedad sobre mortero de cal. Nícoles cruzados

Tabla 2: MORTEROS
 Composición mineralógica expresada en %

Muestra	Qtz	Cal	Fds	Dol	Fil	Gp	Arg	Otros <5%***
SI-4	14	60	trazas		15	trazas	trazas	
SI-7	13	39	trazas	21	15	10		P.C
SI-17	17	49	trazas	14	15	trazas		sid/port
SI-18	18	43	trazas	17	15	trazas		mir/sid
SI-19	22	17	23	15	21	trazas		ep
SI-22	19	20	24	trazas	34			hex
SI-23	13	42	9	6	20	11		ww/wd
SI-26	36	24	3	6	12	19		mi/sid/ww/nes
SI-29	16	65	trazas	14		5		ep/hex/nes

***consultar abreviaturas en tabla 4

Las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido nos permitieron confirmar la presencia de ciertas sales que aparecían como trazas en los análisis por difracción de rayos X, así como apreciar la disposición del resto de minerales en la muestra. De igual forma pudimos observar el crecimiento de dichas sales, tanto en el interior como en el exterior de morteros y piedras, ya fuera en poros aproximadamente redondeados o bien en fisuras paralelas o perpendiculares a la superficie (fig.7 y 8). Algunos de estos crecimientos interiores muestran una continuidad con la superficie, lo que lleva a pensar que estas sales podrían tener un origen de contaminación ambiental (Fig.7). También es frecuente encontrar representadas las capas de suciedad sobre la muestra (fig.8).

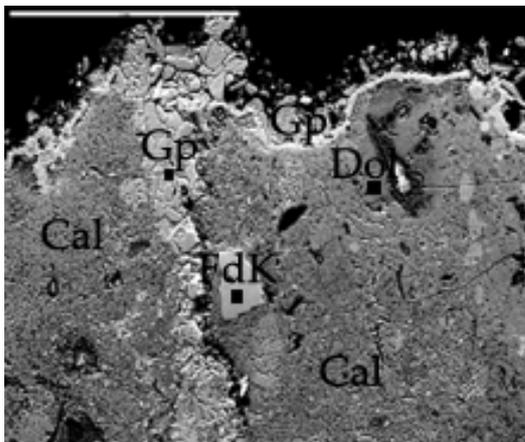


Fig.7: mortero de cal con cristalización de yeso tanto en la superficie como en el poro perpendicular a esta.

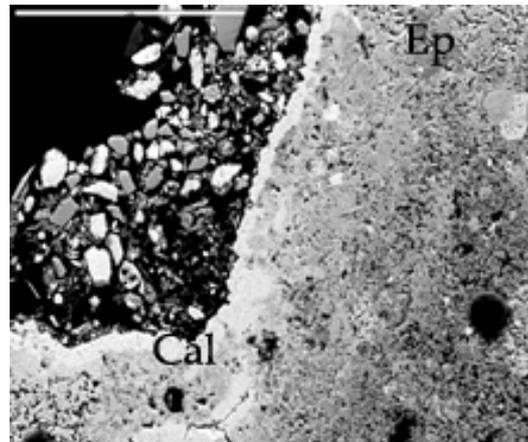


Fig.8: mortero de cal con capa de suciedad en la superficie y endurecido por una fina capa de cal por tratamiento posterior o exudación.

En la tabla 3 se representan los valores resultantes de realizar una difracción de rayos-X en las sales directamente obtenidas en eflorescencias. Estos resultados vienen a complementar las imágenes y difractogramas conseguidos con SEM.

La mayoría de sales, tanto en las obtenidas directamente en las eflorescencias como en las de cristalización interior, tenían naturaleza sulfatada, predominando las de composición sulfatomagnésica susceptibles de cristalizar en varios estados de hidratación, fundamentalmente en epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) o hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). También pueden aparecer acompañadas de otros sulfatos sódicos o algunos oxalatos

Tabla 3: **EFLORESCENCIAS SALINAS**

Composición mineralógica (XX: mayoritario, X: abundante, xx: minoritario, x: trazas)

	Ep	Gp	Hex	Kie	The	Mi	Cal	Qtz	Fil
SI-12		xx	XX		x		X	X	
SI-13		Xx	x			x	X	XX	
SI-24	XX	X			x		X	X	x
SI-25	XX	XX			x				
SI-27	XX		X	x			X	x	x
SI-28	XX	x	X				x		x

La abreviaturas empleadas para los minerales en este trabajo han sido basadas en Kretz (1983, *Amer Miner* 68: 277-279) cuando ello fue posible:

Cal: calcita Qtz: cuarzo Fds: feldespatos
Do: dolomita Arg: aragonito Fil: filosilicatos

Tabla 4: **abreviaturas de sales y trazas**

Gp: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Hex: hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	Wd: wedellita ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
Ep: epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	Mi: mirabilita ($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	Nes: nesquehonita ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
Kie: kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	Sid: siderotil: ($\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	P.C: picos del cemento
The: thenardita (Na_2SO_4)	Ww: whewellita ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	Port: portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES. AGENTES DE DETERIORO Y FORMAS DE ALTERACIÓN

La piedra Viva presenta un cemento esparítico muy bien desarrollado, en ocasiones en continuidad óptica con los granos de calcita. La variedad Franca, está débilmente cementada. Sin embargo, ambos litotipos coexisten en la misma cantera, incluso a veces en el mismo sillar.

La piedra Viva se emplea en las zonas que tiene que soportar un mayor empuje y sostener todo el peso de la estructura sin desestabilizarse, mientras que la piedra Franca se ha empleado en áreas donde las tensiones están más repartidas y la deficiente resistencia mecánica de esta piedra pueda ser contrarrestada (Alcalde, 1996 *Reh Pat Arq* 515-539). Por otro lado, su propia "debilidad" es una ventaja, ya que permite el tallado de delicadas ornamentaciones. El encontrar piedra Franca en lugares atípicos puede deberse a una alteración de la Viva. Por otra parte, un sillar que en la cantera, antes de ser tallado, tenía características de piedra Viva, una vez colocado en el edificio puede verse sensiblemente alterado por multitud de agentes, viéndose modificadas así sus propiedades.

Las distintas etapas de construcción y restauración se ponen de manifiesto no sólo en la talla y tamaño de los sillares que han sido añadidos posteriormente,

sino también en los morteros. Se ha podido apreciar una evolución desde los morteros de cal más antiguos, muy puros hasta otros mucho más modernos con cemento. Resulta muy difícil precisar cuántas restauraciones se han podido realizar desde su edificación, si bien queda claro que han sido numerosas.

Las características climáticas de la zona constituyen el factor de alteración más importante. Dentro de los factores climáticos, los más relevantes son los relacionados con la temperatura, el viento y la lluvia. Las diferencias de temperatura entre las estaciones son muy marcadas, pero también entre un día y otro. La amplitud térmica ronda los 20°C, pudiendo alcanzar incluso 25°C. Durante el invierno pueden alcanzarse mínimas absolutas inferiores a -5°C, y en verano superiores a 40°C. En lo referente a la pluviometría, la variabilidad de precipitaciones es muy grande. Se concentran principalmente en primavera y otoño, con valores mínimos en verano. Los días de nieve son muy escasos y los días de escarcha tienen su máximo en enero. Los vientos dominantes proceden del Noroeste (Martín-Clabo et al., 1994, *Fund Cult Ban* 32-53).

Son numerosos los agentes que van a contribuir a la alteración del edificio. Uno de ellos es la capilaridad (que no ha ocasionado problemas severos de sales).

Las copiosas lluvias caídas durante el otoño e invierno fueron muy mal canalizadas durante las obras y se infiltraron en los sillares. Así, las sales que habían permanecido disueltas durante el invierno empiezan a cristalizar aprovechando zonas de debilidad de la piedra apareciendo enormes eflorescencias en la primavera del 2004 (Winkler et al., 1972, *Geol Soc Amer* 83: 3509-14, de la Torre, 1995, *Tes Doc*, 213). Su composición es sulfatomagnésica (epsomita o hexahidrita). También se identificaron subeflorescencias y criptoflorescencias con efectos mucho más deteriorantes. Otro origen de las sales ha sido la sustitución reciente de morteros de cal por otros con cemento Portland.

Los vientos de componente noroeste ejercen su acción abrasiva sobre las fachadas, especialmente en la norte, originando superficies con alveolización y redondeamiento de los relieves, contribuyendo también a acelerar el proceso de evaporación del agua que satura los sillares tras las lluvias, aumentando así la velocidad de cristalización de las sales (Camuffo, D., 1995, *Sci Total Envir*, 167:1-14).

La alteración antrópica ha incrementado la pérdida de material en las zonas más bajas de la misma forma que las pequeñas costras negras y depósitos de polvo en zonas protegidas de las fachadas son el resultado del tráfico en las calles que rodean a la iglesia (Galán et al., 2003, *Study Cult Her*, 225-242).

Encontramos áreas (fundamentalmente en la fachada norte) afectadas por una fina biocostra constituida por líquenes crustáceos. Su colonización se ha centrado en la fachada, sobre todo en los elementos ornamentales tallados en la piedra más porosa, por lo que aquí su acción es más perniciosa. Los líquenes ejercen una acción mecánica sobre la piedra por el cambio de volumen de sus hifas, pero también inician procesos químicos de solubilización del sustrato por la acción de los ácidos liquénicos que llevan asociados, así como la de otros ácidos orgánicos simples (oxálico, cítrico, glucónico) (Gehrman et al., 1989, *Deterior Cons Ston* 33-39). También encontramos musgos cuyo principal riesgo radica en preparar el camino a la invasión de otras plantas vasculares más destructivas (García, 1996, *Inst And Pat Hist* 14: 57-66).

Todos estos agentes han sido los causantes de la aparición de las distintas formas de alteración en el monumento. La portada Norte presenta una pérdida de relieve en los elementos decorativos y estructurales más acusada que la Sur, acentuada en la parte izquierda, directamente sometida a la acción de los vientos del Noroeste. Sin embargo, las eflorescencias de mayor tamaño se concentran en la portada Sur. La fachada Oeste es la muestra un mejor estado al carecer de elementos decorativos, y sólo destacan algunos desplazados en los sillares y eflorescencias dispersas. También han podido detectarse algunas zonas con costras negras en zonas protegidas de las portadas así como costras biológicas finas en áreas húmedas.

De cualquier forma, el estado de conservación general de San Isidoro era aceptable hasta la última intervención, incluso inusualmente bueno dadas las características de la piedra Franca.