



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

FACULTAT DE BELLES ARTS DE SANT CARLES

DEPARTAMENT DE CONSERVACIÓ I RESTAURACIÓ
DE BÉNS CULTURALS

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS
COMPUESTOS, PARA SU APLICACIÓN EN
INTERVENCIONES DE SELLADOS,
REPOSICIONES Y RÉPLICAS, DE ELEMENTOS
PÉTREOS ESCULTÓRICO-ORNAMENTALES.

Tesi doctoral presentada per
En **XAVIER MAS i BARBERÀ**

Dirigida per

Na **Maria Teresa Doménech Carbó** i
En **José Luis Roig Salom**

València 2006

RESUMEN

El propósito de esta investigación se centra en el estudio de la efectividad de una serie de morteros compuestos. El empleo de estos materiales artificiales supone una alternativa a la piedra natural. De este modo, se intenta resolver problemas de sellados, reposiciones y réplicas en elementos escultórico-ornamentales realizados con piedra Tosca de Rocafort (genéricamente “Pedra de Godella”) y piedra Bateig (“Pedra de Novelda”). Estas rocas, ampliamente utilizadas en monumentos del Patrimonio Valenciano, están sufriendo un importante deterioro causado por las alteraciones físicas, químicas y biológicas.

Los morteros compuestos se obtienen combinando el micronizado del material pétreo Tosca de Rocafort o Bateig y, el conglomerante orgánico (resinas termoplásticas o termoendurecibles) o inorgánico (hidróxido de calcio). También, en la matriz del mortero se adiciona unos aditivos (retardadores y biocidas) que mejoran sus propiedades físicas.

El estudio llevado a cabo incluye la optimización de los parámetros experimentales que determinan el método preparativo y composición de los morteros compuestos. También, se han establecido todo un conjunto de propiedades físicas, químicas y de resistencia al biodeterioro mediante ensayos normalizados ampliamente utilizados en el ámbito internacional. Asimismo, se han diseñado una serie de ensayos dirigidos a determinar la idoneidad de estos morteros en su aplicación al campo de la conservación y restauración.

Finalmente, se describen tres intervenciones: un sellado, una reposición y una réplica, llevadas a cabo sobre elementos pétreos del Patrimonio Valenciano, que muestran la aplicación de los morteros compuestos estudiados a casos reales de conservación y restauración.

RESUM

El propòsit d'aquesta investigació es centra en l'estudi sobre l'efectivitat d'una sèrie de morters compostos. L'ús d'aquests materials artificials suposa una alternativa a la pedra natural. D'aquesta manera, s'intenta resoldre problemes de reompliment de fissures/llacunes, reposicions i rèpliques en elements escultòrics-ornamentals realitzats amb pedra Tosca de Rocafort (genèricament "Pedra de Godella") i pedra Bateig ("Pedra de Novelda"). Aquestes roques, molt emprades en monuments del Patrimoni Valencià, estan sofrint un important deteriorament degut a les alteracions físiques, químiques i biològiques.

Els morters compostos s'obtenen combinant els micronitzats del material petri Tosca de Rocafort o Bateig i, el conglomerant orgànic (resines termoplàstiques o termoenduridores) o inorgànic (hidròxid de calci). També, en la matriu del morter s'afegeix uns aditius (retardadors i biocides) que milloren les seues propietats físiques.

L'estudi dut a terme inclou l'optimització dels paràmetres experimentals que determinen el mètode de preparació i composició dels morters compostos. També, s'ha establert tot un conjunt de propietats físiques, químiques i de resistència al biodeteriorament mitjançant assatjos normalitzats molt utilitzats a l'àmbit internacional. Així mateix, s'han dissenyat una sèrie d'assatjos encaminats a establir l'idoneïtat d'aquests morters en la seua aplicació al camp de la conservació i restauració.

Per concloure, es descriuen tres intervencions: un reompliment d'una llacuna, una reposició i una rèplica, duts a terme sobre elements del Patrimoni Valencià, que mostren l'aplicació dels morters compostos estudiats a casos reals de conservació i restauració.

ABSTRACT

This research project is focused on the study of the effectiveness of a series of resin bound mortars. Use of this type of artificial materials supposes an alternative to natural stone in order to obtain solutions for conservation treatments such as sealings, replacement of missing parts or replica of altered sculptures and ornamental pieces. Tosca de Rocafort (generically Godella Stone) and Bateig stone (commonly Novelda Stone) have been selected as specific cases of study. These lithic materials, which have been employed in many monuments from the Valencian Heritage, have undergone a considerable physical, chemical and biological deterioration.

The resin bound mortars are obtained by combining a microparticulated filler made from Tosca Rocafort or Bateig stones and, the organic (synthetic resins) or inorganic (lime) binder. Additives which act as retardants as well as biocide agents have also been added in the matrix of the mortar.

The study carried out included the optimization of the experimental parameters which determine the preparation method of the resin bound mortars. Physical, chemical and resistance to the biodegradation properties have been established by means of normalized tests. Similarly, a series of tests devoted to determine the suitability of these resin bound mortars for heritage conservation processes have been designed.

Finally, three examples of application of the proposed resin bond mortars corresponding to different type of interventions, namely, sealing, replacement and replica, carried out on Valencian monuments and sculptures, are described. These real works show the efficiency of the resin bound mortars studied for conservation purposes.

Parte de los resultados obtenidos y actuaciones realizadas se han presentado en las siguientes publicaciones:

- J. V. Grafiá, X. Mas. *“Proceso de reproducción de la Imagen de Ntra. Sra. de Aguas Vivas debido a las alteraciones causadas por su funcionalidad. Idoneidad en la ejecución del molde y obtención de la réplica”*. II Congreso Iberoamericano de Patrimonio Cultural “Conservar las Raíces”. Madrid, 2003.

- J. Peterman, F. Bolívar, X. Mas, B. Uceda, R. Portero. *“Studies of the efficiency of the biozyde New Des incorporated in artificial stone composed of ground natural stone and a commercial acrylic resin concerning the growth of algae”*. 13th International Biodeterioration and Biodegradation Symposium. Madrid, 2005.

- R. Portero, F. Bolivar, X. Mas, M. T. Doménech. *“Studies of the efficiency of the biocide Biotin N incorporated in artificial stone composed of ground natural stone and a commercial acrylic resin concerning the growth of algae”*. International Conference: Heritage, Weathering and Conservation. Madrid, 2006.

- X. Mas, M. T. Doménech, J. L. Roig. *“Study by SEM/EDX and FT-IR Spectroscopy of resin bound mortars based on hydraulic and synthetic binders combined with Tosca de Rocafort and Bateig Stones*. International Conference: Heritage, Weathering and Conservation. Madrid, 2006.

- X. Mas, J. V. Grafiá, L. Sanmiguel, S. Marco, V. Ortí, J. L. Roig. *“Aplicación de un nuevo material filmógeno como desmoldeante -interfaz soporte/elastómero- en la reproducción de piezas porosas”*. 16 th Internacional Meeting on Heritage Conservation, Valencia, 2006.

Als meus pares,
pel seu recolzament incomparable.

AGRADECIMIENTOS.

Expreso mi más afectuoso agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han hecho posible la realización de esta Tesis Doctoral, especialmente a mis directores, la catedrática María Teresa Doménech Carbó y el doctor José Luis Roig Salom, por confiar en mi trabajo y ofrecerme su sabia dirección, ayuda e interés en todas las fases de la investigación.

Gracias a AIDICO, especialmente a Fernando Muédano por su dedicación, cordialidad y atención desinteresada.

Gracias a Francisco Castelló, gerente de Bateig, por su amabilidad al proporcionarnos la cantidad de piedra solicitada.

Gracias a los escultores Salva Marco y Vicente Ortí, por enseñarme aquello que en los libros no está escrito. También, a Luisa, por su investigación en la historia de los monumentos.

Gracias a María José Pelufo por su ayuda desinteresada en los ensayos mecánicos.

Gracias a Javier Orozco, compañero y amigo, que aportó su granito de arena para que esta Tesis Doctoral se hiciese realidad.

Gracias al servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, especialmente a Luis, por los momentos tan divertidos que hemos pasado.

Gracias a Fernando Bolívar y a Rafa Portero, compañeros y grandes amigos, por las experiencias compartidas en los ensayos biológicos.

Gracias a Carmen Marcos y Carlos por sus consejos y experiencias en este tipo de trabajos.

Gracias a Luis Ángel Alonso por su atención y sabios consejos en petrología y detección de materiales pétreos.

Gracias a los alumnos de la línea de conservación y restauración de escultura que realizaron la encuesta con destacado interés.

Gracias a Laura Osete, Juana de la Cruz, Lola Yusá, María José, Dámaso, Diego y Blanca por su ayuda, gratos consejos, amabilidad y momentos agradables compartidos.

Gracias a mis compañeros del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, en especial a José Madrid, Mavi, Eva y Laura Fuster.

Gracias a Grafiá y a Marisa, a quienes nunca podré agradecer suficientemente todo lo que me ayudaron.

Gracias al personal técnico y administrativo del departamento, Álex, Luis, Juana, Maite, Esther y Ramón.

Gracias a mi compañera y amiga Pili, por compartir las penas y alegrías en el duro pero satisfactorio camino que supone el desarrollo de la Tesis Doctoral.

A TOTS, MOLTÍSSIMES GRÀCIES.

Xavier Mas
08/05/06

“Nuestro desprecio del trabajo manual se acentúa más de día en día, y, sin embargo, en él está la salvación; sólo él puede engendrar el sentimiento de la fraternidad, el cual exige el contacto de unos hombre con otros”

« Idearium Español » Helsingfors, Octubre 1896.
Angel Ganivet Granada 13-XII-1865. Riga 28-XI-1898.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.	7
2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA METODOLÓGICA.	9

PARTE I LOS MORTEROS EN RESTAURACIÓN DE ESCULTURA Y ORNAMENTOS PÉTREOS.

LOS MORTEROS:

3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.	13
4. ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN.	27
5. MORTEROS COMPUESTOS.	33

5.1. Introducción.

5.2. Principios generales.

5.2.1. Componentes.

5.2.1.1. Conglomerantes.

5.2.1.1.1. Inorgánicos.

5.2.1.1.2. Orgánicos.

5.2.1.2. Áridos.

5.2.1.3. Aditivos.

5.2.1.4. Disolventes.

5.2.2. Dosificaciones.

- 5.3. Tipología y características.
- 5.3.1. Morteros compuestos inorgánicos.
- 5.3.1.1. Morteros de cal.
- 5.3.1.2. Morteros de yeso.
- 5.3.1.2.1. Mortero bastardo.
- 5.3.1.3. Características.
- 5.3.2. Morteros compuestos orgánicos.
- 5.3.2.1. Características.

6. LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CARBONÁTICAS Y SULFÁTICAS EVAPORÍTICAS.

65

- 6.1. Tipología y caracterización.
- 6.2. Materiales pétreos empleados.
- 6.2.1. Piedra Tosca de Rocafort.
- 6.2.1. Piedra Novelda. Bateig Crema.

7. LA ALTERACIÓN DE LA PIEDRA: FORMAS, AGENTES Y MECANISMOS.

81

- 7.1. Formas de deterioro. Indicadores macroscópicos de alteración.
- 7.2. Agentes y mecanismos de alteración.
- 7.2.1. Alteraciones físicas.
- 7.2.1.1. Extracción, labra y puesta en obra.
- 7.2.1.2. Cambios térmicos.
- 7.2.1.3. Acción del hielo.
- 7.2.1.4. Acción del agua.
- 7.2.2. Alteraciones químicas.
- 7.2.2.1. Sales solubles.
- 7.2.2.2. Contaminación atmosférica.
- 7.2.2.2.1. Dióxido de azufre.
- 7.2.2.2.2. Dióxido de carbono.
- 7.2.2.2.3. Costras.
- 7.2.3. Alteraciones biológicas.
- 7.2.3.1. Bacterias.
- 7.2.3.2. Algas.
- 7.2.3.3. Hongos.

- 7.2.3.4. Líquenes.
- 7.2.3.5. Plantas inferiores: musgos y hepáticas.
- 7.2.3.6. Plantas superiores.
- 7.2.3.7. Animales.

8. INTERVENCIÓN EN MATERIALES PÉTREOS. 121

- 8.1. Introducción.
- 8.2. Tratamientos y métodos de sustitución.
 - 8.2.1. Sellados.
 - 8.2.2. Reposiciones/ Réplicas.
 - 8.2.3. Tipos de moldes.
 - 8.2.3.1. Rígidos.
 - 8.2.3.1.1. Molde perdido.
 - 8.2.3.1.2. Molde por piezas.
 - 8.2.3.2. Elásticos.
 - 8.2.3.2.1. Procedimiento de colada.
 - 8.2.3.2.2. Procedimiento estratificado.

PARTE II EXPERIMENTAL. INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODOS ANALÍTICOS.

9. MATERIALES Y MÉTODOS DE ANÁLISIS. 145

- 9.1. Introducción.
- 9.2. Microscopía óptica (LM), Análisis de imagen.
- 9.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM/EDX), microanálisis de rayos X.
- 9.4. Espectrofotometría-colorimetría.
- 9.5. Análisis de imagen.
- 9.6. Viscosimetría.
- 9.7. Determinación de densidades.
- 9.8. Tribología.
- 9.9. Envejecimiento acelerado en atmósfera saturada con SO₂.
- 9.10. Envejecimiento acelerado por irradiación con luz Ultravioleta.
- 9.11. Envejecimiento acelerado térmico.

10. MATERIALES Y MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE LOS MORTEROS EXPERIMENTALES. 159

10.1. Introducción.

10.2. Materiales componentes.

10.3. Instrumentación.

10.4. Preparación de probetas.

10.4.1. Metodología.

10.4.1.1. Elaboración moldes de probetas.

10.4.1.2. Proceso de triturado y cribado.

10.4.1.3. Análisis de imagen.

10.4.1.4. Realización de probetas. Dosificación.

10.4.1.5. Tratamiento de acabado.

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 195

11.1 MORTEROS COMPUESTOS 195

11.1.1 Caracterización físico-mecánica.

11.1.1.1 Introducción.

11.1.1.2. Absorción/Desorción.

11.1.1.3. Densidad real/Densidad aparente.

11.1.1.4. Porosidad.

11.1.1.5. Contenido humedad de saturación.

11.1.1.6. Coeficiente de saturación.

11.1.1.7. Resistencia a rotura por flexotracción.

11.1.1.8. Resistencia a rotura por compresión.

11.1.1.9. Resistencia al desgaste por rozamiento en seco y húmedo.

11.1.2. Estabilidad frente a agentes degradantes físico-químicos.

11.1.2.1. Introducción.

11.1.2.2. Ensayo de envejecimiento acelerado termohigrométrico.

11.1.2.3. Ensayo de envejecimiento acelerado por irradiación con ultravioleta.

11.1.2.4. Ensayo de resistencia a las heladas.

11.1.2.5. Ensayo de cristalización salina.

- 11.1.2.6. Ensayo de envejecimiento acelerado en atmósfera saturada con SO₂.
- 11.1.2.7. Resistencia a la degradación natural.

11.2. PROPIEDADES DE INTERÉS EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN. 246

- 11.2.1. Introducción.
- 11.2.2. Adaptabilidad.
- 11.2.3. Morfología superficial del mortero.
- 11.2.4. Tránsito de vapor de agua.
- 11.2.5. Aspecto visual psicofísico. Aspecto táctil.

11.3 MORTEROS COMPUESTOS CON INCORPORACIÓN DE AGENTES BIOCIDAS 272

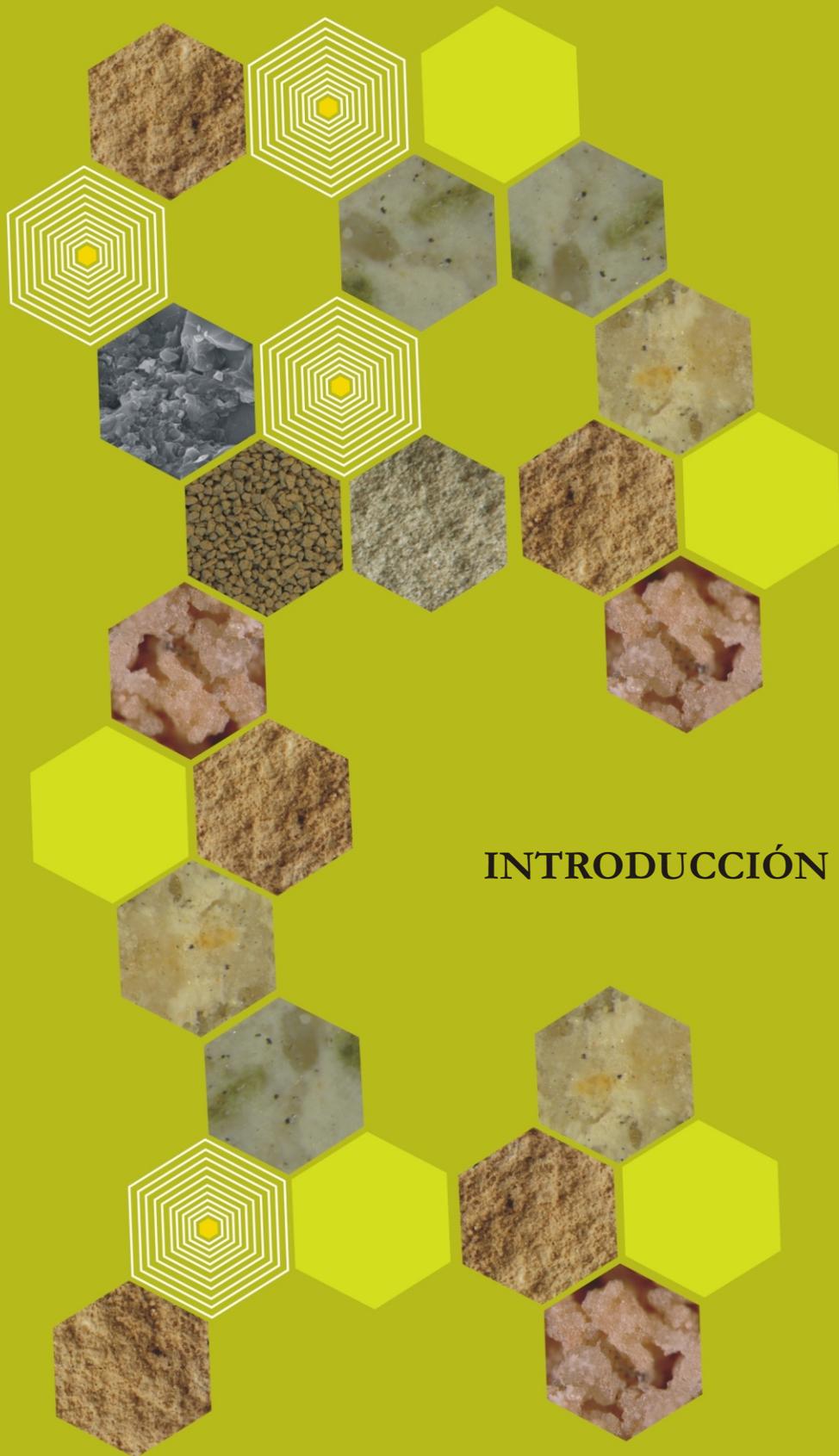
- 11.3.1 Caracterización cromática.
- 11.3.2. Estabilidad frente a agentes degradantes físico-químicos.
 - 11.3.2.1. Introducción.
 - 11.3.2.2. Ensayo de envejecimiento acelerado termohigrométrico.
 - 11.3.2.3. Ensayo de envejecimiento acelerado por irradiación con ultravioleta.
- 11.3.3. Estabilidad frente a agentes degradantes microbiológicos.
 - 11.3.3.1. Introducción.
 - 11.3.3.2. Antecedentes.
 - 11.3.3.3. Procedimiento metodológico.

12. APLICACIÓN DE LOS MORTEROS COMPUESTOS A CASOS REALES DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN ESCULTÓRICA-ORNAMENTAL PÉTREA. 305

- 12.1. Introducción.
- 12.2. Aplicación “in situ”. Los SELLADOS.
- 12.3. Aplicación por medio de prótesis. La REPOSICIÓN.
- 12.4. Aplicación total. La RÉPLICA.

ÍNDICE

13. CONCLUSIONES.	319
14. GLOSARIO.	327
15. BIBLIOGRAFÍA.	333



INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.

Este trabajo pretende establecer nuevas líneas de investigación en el ámbito de la elaboración de nuevos morteros obtenidos a partir de micronizados de material lítico aglomerados con productos inorgánicos y resinas sintéticas, aplicables al campo de la Conservación y Restauración de Bienes Culturales, en intervenciones de sellados, reposiciones de faltantes y obtención de réplicas, en elementos realizados con material pétreo que forman parte del Patrimonio Monumental Valenciano (Berchez, 1995; Prosper y Matas, 1996; Pingarrón, 1998; Zaragoza, 2000).

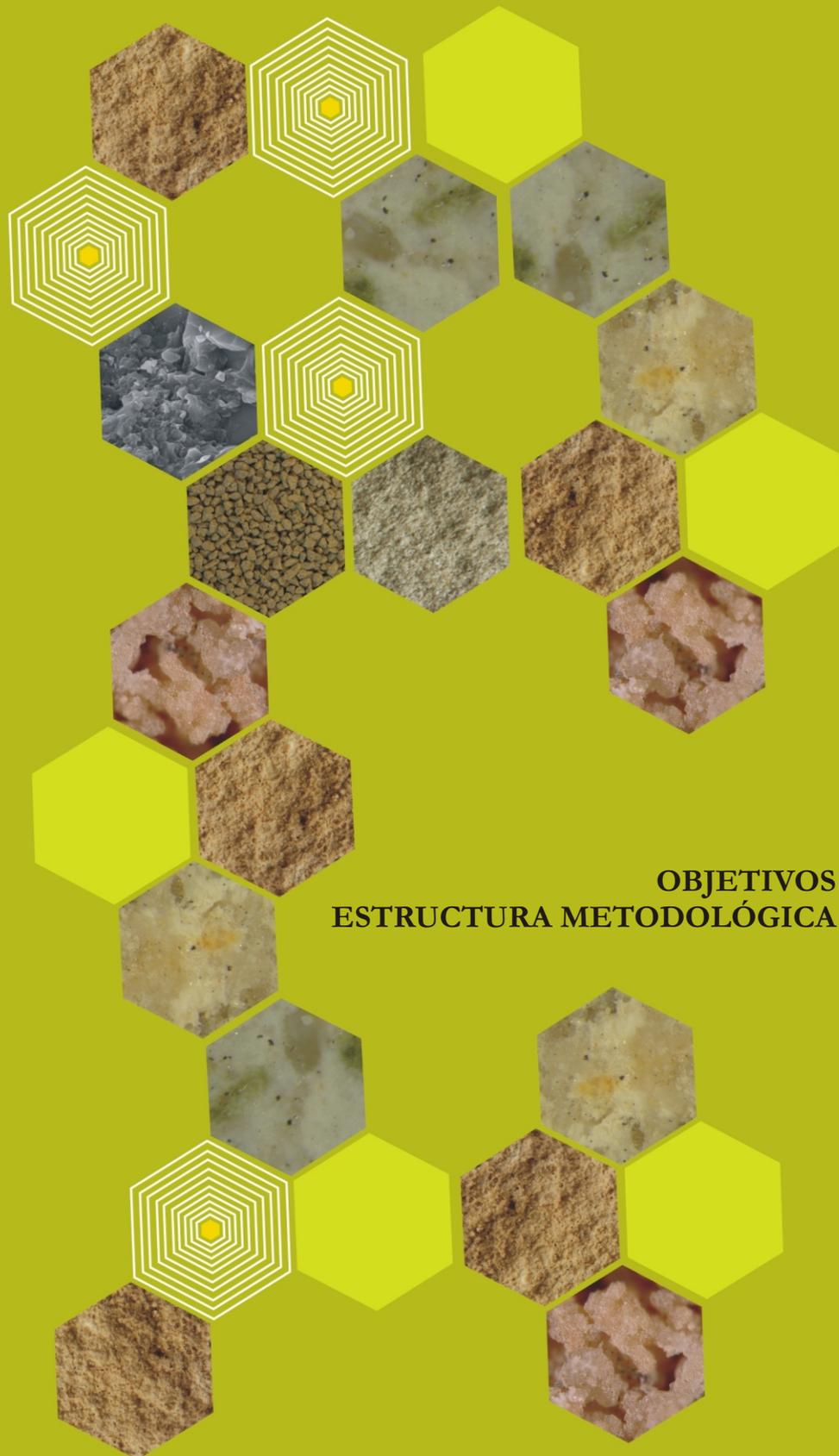
Esta investigación, prosigue los estudios y análisis desarrollados por el Dr. José Luis Roig Salom en su línea de investigación dedicada a morteros pétreos utilizados como alternativa a la piedra natural presente en el amplísimo conjunto del Patrimonio Histórico-Artístico Valenciano (Roig, 1995, 1999, 2001, 2003).

Para el desarrollo de esta tesis, se han seleccionado dos tipos de piedra, la Piedra Tosca de Rocafort y la Piedra Bateig, presentes de una forma destacada en el conjunto monumental de la comunidad valenciana, y en especial, de la ciudad de Valencia: edificios religiosos y civiles, esculturas, elementos arquitectónicos, ornamentales, etc. Por un lado, las canteras de Tosca de Rocafort fueron explotadas por los romanos a partir del siglo I, y posteriormente, hasta finales del siglo

XVIII, en que se agotaron (Garín, 1983; Latorre, 1992). Por otro, las canteras de Piedra Bateig, aún manteniéndose actualmente su explotación, presentan diferencias significativas entre las distintas variedades existentes en contraposición a su más primitiva diagénesis.

Las Piedra Tosca de Rocafort y la Bateig crema son, sin duda, material partícipe de nuestro quehacer y tradición monumental, y como tal, han sufrido la degradación causada por el paso de los años. La imposibilidad de detener este progresivo deterioro que sufren los diferentes materiales utilizados en el Patrimonio Artístico y Monumental, debido a su permanente exposición a los agentes físico-químicos y biológicos de deterioro, ha obligado a buscar nuevas soluciones de mejora y mantenimiento (Arnaiz, et al. 1977).

La realización de sellados, reposiciones y réplicas con nuevos morteros pétreos compuestos se presenta como una de estas soluciones alternativas que permitiría conservar aquellos originales (esculturas, elementos arquitectónicos, ornamentales, etc.) que presenten un avanzado estado de deterioro ubicándolos en espacios físicos (interior de edificios, museos,...) y parámetros (humedad, temperatura, etc.) más controlados.



OBJETIVOS
ESTRUCTURA METODOLÓGICA

2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA METODOLÓGICA.

La intervención sobre un monumento realizado con material pétreo, independientemente de la ubicación en que se encuentre, exige el conocimiento de toda una serie de técnicas (analíticas, instrumentales, de materiales) y métodos (de aplicación, acabado, etc.) que garanticen la preservación de la obra en si, es decir, la actuación requiere la realización de una amplia gama de pruebas analíticas que determinen la naturaleza físico-química del material, las alteraciones que sufre y la selección de materiales y métodos de aplicación.

Actualmente, el nuevo marco tecnológico ofrece al campo de la Conservación y Restauración una infinidad de materiales y herramientas que conviven con los tradicionales, llegando incluso a sustituirlos. Así, la aplicación generalizada de nuevos materiales en intervenciones de soportes pétreos, ha supuesto un detrimento para el original. Es necesario que cada tipo de pieza sea intervenida con unos criterios y unos materiales acordes a su estructura y estado de conservación.

Por tanto, las intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas aplicados a alteraciones graves del monumento que se han usado como indicadores de los deterioros que vamos a estudiar en el presente trabajo (grietas, fisuras, roturas y faltantes volumétricos), suponen el máximo esmero en la elección de los materiales, compatibles con el original, y en la puesta en obra, es decir, su maniobrabilidad.

Por esta razón, el estudio llevado a cabo se ha centrado en la caracterización de los morteros obtenidos a partir de dos tipos de material pétreo micronizados: Tosca de Rocafort y Bateig Crema Novelda combinados con diferentes conglomerantes y destinados a resolver intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas de elementos escultóricos-ornamentales del Patrimonio Valenciano.

Los objetivos del trabajo de investigación desarrollados se concretan en:

A.- Elaborar una serie de morteros compuestos susceptibles de ser utilizados en sellados, reposiciones y réplicas.

-Obtener una gama de distribuciones granulométricas de los dos materiales pétreos micronizados: Tosca de Rocafort y Bateig Crema Novelda.

-Ensayar diversos conglomerantes inorgánicos/orgánicos.

-Ensayar las dosificaciones más adecuadas a cada mortero.

B.- Demostrar la idoneidad de los morteros seleccionados respecto a las propiedades requeridas para su utilización en sellados, reposición de partes faltantes y en la realización de réplicas.

-Evaluar la resistencia y el grado de deterioro de los morteros compuestos frente a los agentes de deterioro físico-mecánico-químico y biológico.

-Determinar las características visuales de los morteros compuestos realizados.

-Estudiar el comportamiento de los morteros de matriz polimérica y micronizados pétreos frente a los de matriz inorgánica.

C.- Establecer la idoneidad de los morteros frente a los agentes de biodeterioro. Conocer los fenómenos implicados en los procesos de deterioro biológico sobre los morteros experimentales.

-Estudiar las propiedades de superficie, tanto a niveles macroscópicos como microscópicos, de los morteros elaborados.

-Conocer la resistencia de los morteros frente a los agentes de deterioro microbiológico habituales en monumentos, reproducidos in situ y en laboratorio.

D.-Aplicar los materiales estudiados a la Conservación y Restauración de materiales pétreos.

-Estudiar el tipo de mortero más idóneo para sellados, reposiciones y réplicas.

-Establecer la técnica de aplicación idónea en el proceso de Conservación y Restauración de material pétreo.

-Determinar el método de acabado superficial de los morteros a fin de conseguir un resultado estético óptimo a nivel de textura, cromatismo y pátina.

Se pretende definir una metodología experimental y práctica que de lugar a una elección acertada y objetiva de los materiales y métodos en tratamientos de sellados, reposiciones y réplicas en función del material pétreo. La investigación se ha apoyado en el análisis de diferentes textos publicados que tratan de las experiencias llevadas a cabo en intervenciones de sellados, reposición y réplicas a partir de morteros compuestos.

En la primera parte de la presente Tesis Doctoral “Estudio del material pétreo. Los morteros” se ha llevado a cabo, en primer lugar, una revisión bibliográfica con el fin de entender el material pétreo como materia, cuáles son los mecanismos que influyen en su deterioro y qué criterios son los más adecuados para emprender una intervención de sellados, reposición y réplica.

Seguidamente, y a partir de una exhaustiva documentación bibliográfica, se ha efectuado una revisión de los diferentes morteros empleados desde la Antigüedad hasta nuestros días, destacando las tipologías, características y técnicas de aplicación y usos realizados.

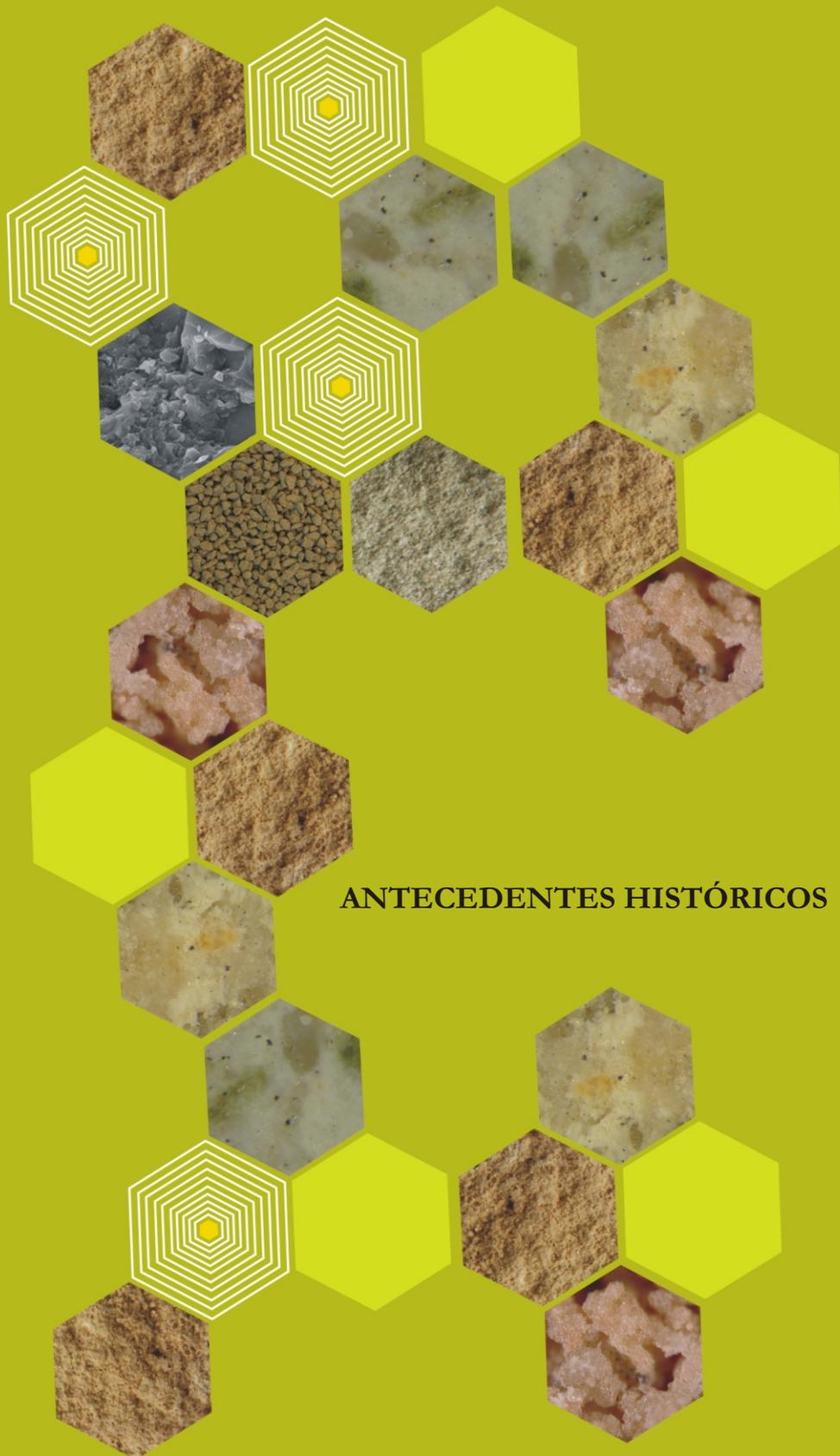
En la segunda parte “Investigación sobre materiales y realización de morteros compuestos” se han estudiado diferentes productos, materiales y métodos de aplicación. Los morteros resultantes, a partir de un estudio exhaustivo de las dosificaciones, han sido sometidos a diferentes ensayos para la simulación de procesos de alteración y de envejecimiento acelerado. Así mismo, se han empleado diferentes técnicas analíticas para su caracterización: Microscopía óptica (LM), Microscopía electrónica de barrido (SEM/EDX) y espectrofotometría-colorimetría.

La Tabla 2.1 explica esquemáticamente donde se llevó a cabo cada apartado de la Tesis Doctoral.

Tabla 2.1.

ACTIVIDAD	CENTRO
Extracción Piedra de Cantera: Tosca de Rocafort Bateig crema	Fondos del Ayuntamiento de Valencia. Cantera Bateig Novelda (Alicante).
Triturado y cribado	Centro Tecnológico AIDICO.
Realización de probetas con morteros	Laboratorio de Materiales Pétreos. Instituto de Restauración del Patrimonio (UPV).
Ensayos:	
Mecánicos	Laboratorio de Materiales de Construcción, Dpto. de Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil (UPV).
Químicos	Laboratorio Físico-Químico y Medioambiental. Instituto de Restauración del Patrimonio (UPV).
Físicos	Departamento de Física Aplicada (UPV). Laboratorio Físico-Químico y Medioambiental. Instituto de Restauración del Patrimonio (UPV). Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (UPV).
Biológicos	Dpto. de Pintura. Universidad de Granada.
Colorimetría	Laboratorio de Óptica y Colorimetría. Instituto de Restauración del Patrimonio (UPV).
Aspecto visual psicofísico y aspecto táctil.	Laboratorio de procesado de encuestas. Instituto de Ciencias de la Educación. (UPV).

Finalmente, se han extraído unas conclusiones en base a los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones efectuadas.



ANTECEDENTES HISTÓRICOS

3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

En este apartado se muestra la evolución histórica del mortero en sus diferentes manifestaciones constructivas y artísticas, desde sus orígenes hasta nuestros días, observando su proceso, técnica y evolución (Furlan et al. 1975).

Si nos remontamos a las primitivas civilizaciones, con el abandono del nomadismo, la arcilla-barro, la piedra y los entramados se toman como materiales de construcción, con los que el hombre trataba de cubrir y cerrar un espacio donde protegerse de la Naturaleza en aquellas zonas en que escaseaban los recursos de alimentos y refugios naturales. Es así que, el hombre toma los materiales tal como los encuentra a su alrededor readaptándolos para la mejora de su subsistencia.

Por tanto, con el inicio de la agricultura y la ganadería (10.000 a C.), unido todo ello a las ceremonias rituales tan arraigadas, ayudará a que las comunidades sedentarias emprendan el cultivo de vegetales con el propósito de obtener recursos estables e inicien la búsqueda de lugares estratégicos afianzando la construcción de poblados constituidos socialmente.

El origen del mortero viene ligado al descubrimiento de la cal y el yeso, no siendo claro su origen, ciertos autores lo sitúan en el comienzo de la Prehistoria junto con el descubrimiento del fuego y la posibilidad de calcinar piedras.



Figura 3.1. Figurilla de arcilla de mujer de pie, procedente de Nea Nikomidhia, Grecia. Finales del VII milenio a. de C.; altura 17 cm. (Atlas Mundos del pasado, nº 7).



Figura 3.2. Fabricación del mortero en Época Neolítica.

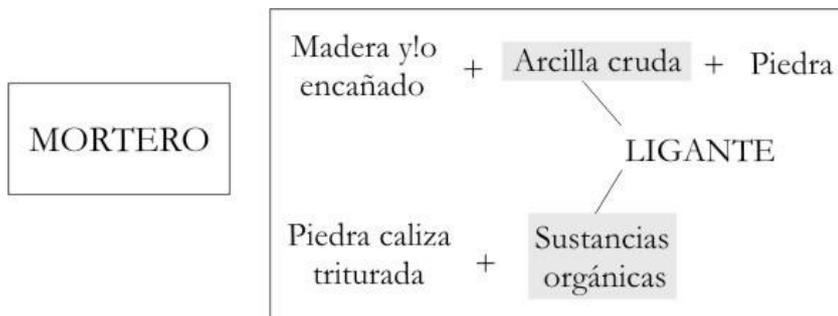


Figura 3.3. Tecnología de fabricación del mortero en Época Neolítica en Europa Central y Septentrional.

Es el caso del antiguo yacimiento de Jericó (9.000 a C.), que situado junto a un manantial de agua permanente y surgido inicialmente como santuario, es donde se hallan los primeros morteros basados en la cal. También, y debido al desarrollo de cambios en el contexto religioso (alrededor del 7.000 a C.), se han hallado cráneos con recubrimiento de yeso según modelos de antepasados venerados (Kenyon, K., 1981-82).



Figura 3.4. Cráneo de mujer joven procedente de Jericó, probablemente colocado para ser visto y usado en ceremonias rituales. Los rasgos fueron moldeados en yeso y tenía incrustaciones conchas caurí a modo de ojos. El cráneo había sido deformado intencionadamente en vida, alargándolo hacia atrás. Corresponde al VII milenio a. de C. Su altura es de 18 cm.

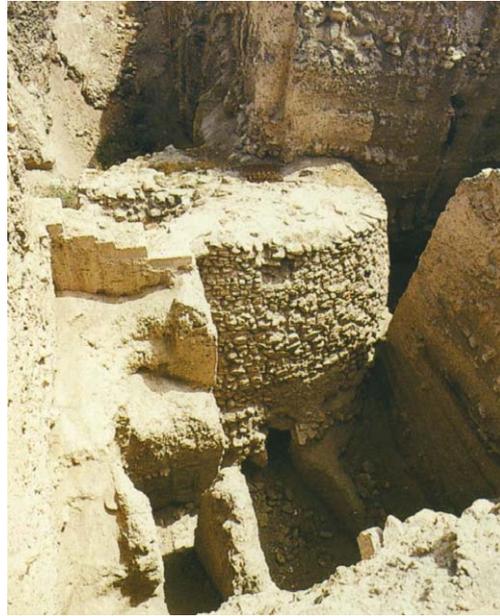


Figura 3.5. Asentamiento de Jericó: Una antigua comunidad agrícola.

En las excavaciones realizadas en el yacimiento arqueológico de la ciudad neolítica de Çatal Hüyük (7.000 a C.), a orillas del río Çarsamba, en la llanura de Konya, (la Anatolia, Turquía), además de construir las viviendas entramadas recubriendo suelos, muros y techos con adobes, revocaban éstos con yeso, sirviendo incluso de soporte a las pinturas y a las esculturas de animales moldeados de los templos (Hamblin, D. J.,1977). En este período, se usaba la “arcilla blanca” tal cual se encontraba en la zona; igualmente empleaban morteros de barro, negro y rico en cenizas y restos óseos para la construcción de muros no siendo considerada todavía como una verdadera argamasa. La función original del mortero era la de unir y rellenar las irregularidades entre los elementos que conformaban la fábrica, evitando la entrada de la luz, viento y agua. Se sabe que, el betún o alquitrán fue, después del barro, uno de los aglomerantes más antiguos encontrados en fábricas de piedra y arcilla.

Estos hallazgos de morteros en yacimientos neolíticos evidencian el conocimiento de la cal y la tecnología de fabricación: la calcinación de la cal, su apagado, la mezcla para obtener morteros y su aplicación para obtener refinados de superficies.

Por tanto, el proceso de fabricación del mortero atendiendo a las características de los materiales consistiría en añadirle a la cal, que poseía un gran contenido de restos de piedra carbonatada (apagada) pero no calcinada totalmente, una mínima cantidad de agua para el apagado y, tras su puesta en obra se sometía a un proceso de compactación consiguiendo más consistencia. Por el contrario, en zonas de Europa central y Septentrional esta forma de fabricar el mortero era menos elaborada.

En materiales de época ibérica algunos investigadores han hallado restos de yeso en aparejos o soportes de policromías (Espinosa et al, 1996).

En el período Minoico, los morteros encontrados presentan unas buenas características, eran de buena cal y áridos, pero dependiendo de las zonas, se empleaba la cal pura con variantes de mezclas, donde las capas inferiores el mortero estaba formado de cal y polvo de mármol y, aplicado en capas de hasta dos centímetros. Un rasgo similar, lo encontramos en los suelos del Palacio de Cnosos siendo de yeso endurecido con calcita como árido. También, en las paredes, una vez estucadas, aplicaban un grueso enfoscado compuesto de cal, arena y cerámica molida, dotando al mortero de ciertas características hidráulicas. Igualmente se empleó el yeso como base para pinturas murales al fresco. Los etruscos, del mismo modo, lo emplearon para decoración.

En la civilización Egipcia y Mesopotámica, conocían y fabricaban materiales conglomerantes, yesos y cales aéreas, que bien, mediante pastas o morteros de yeso y cal reforzaban los aparejos de piedra y ladrillos, y revestían y ornaban sus fábricas (Torres Balbas, 1955). Es así que, la disposición de las piedras de las pirámides egipcias, amontonadas primero y labradas y revestidas después, tienen su equivalente en los ziggurats mesopotámicos, pirámides truncadas ejecutadas con escalonamientos de fábrica de ladrillos secados al sol, a veces revestidas con ladrillos cerámicos ornamentados con bajorrelieves.

Los egipcios fueron los primeros en utilizar el yeso hemihidratado, obtenido por cocción a temperaturas de, aproximadamente, 120° C para unir los bloques de las construcciones como en la pirámide de Kheops (2.600 a C.). Los egipcios conocían bien el yeso y lo empleaban de forma indistinta como material de unión de grandes bloques de piedra, como

acabado de superficies y como material de decoración. En el templo de Amón en Karnak (2.000 a C.), los morteros de las juntas de los bloques de piedra estaban formados por anhidrita insoluble, es decir, yeso sobrecocido, mientras que los revestimientos que servían de soporte para las decoraciones estaban realizados con yeso, esto demuestra el riguroso conocimiento y, los secretos que tenían de este material por ser tan abundante en la región del Nilo (Gaspar Teba, 1995).

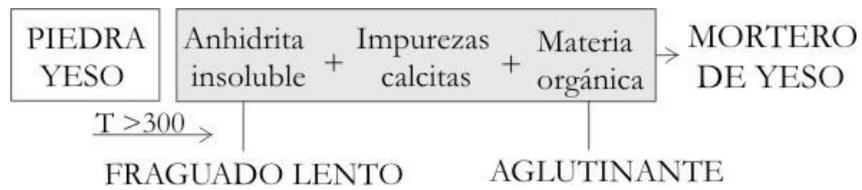


Figura 3.6. Composición y tecnología de fabricación del mortero para unión de piedras en Época Egipcia.



Figura 3.7. Composición y tecnología de fabricación del mortero de acabado en Época Egipcia.

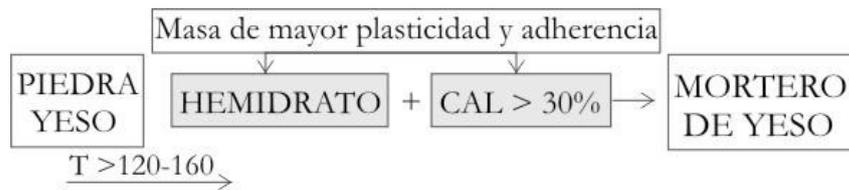


Figura 3.8. Composición y tecnología de fabricación del mortero de decoración en Época Egipcia.

También, el soporte habitual de las pinturas egipcias se preparaba con árido calizo, pajote fino o crin de caballo o asno, arcilla y 1/5 de yeso como aglutinante.

Asimismo, en diversos lugares del territorio se combinaban lechadas o morteros blancos de cal junto con morteros de betún consiguiéndose unos revestimientos armonizados de blanco y negro.

En tumbas de la época de Tutmosis III (Tebas) se aplicaba a las paredes, antes de ser decoradas con frescos un enlucido de yeso con cal.

Por otro lado, en construcciones procedentes del continente asiático, (valle de Ajanta, China, 200-600 a C.), encontramos frescos budistas pintados sobre revocos de cal en fresco directamente sobre gruesos enfoscados de cal y áridos. Así mismo, cerca de Mingoi y Astana (Asia Central, Al Norte de la Ruta de la Seda), aparecieron unas esculturas de Buda (siglos VI al X d C.), construidos a partir de una armadura previa de madera, paja y elementos fibrosos amasados, y modelados, con morteros compuestos de arcilla, procedente de granitos descompuestos en finas partículas, más caolín sedimentario (arcilla natural compuesta de Sílice y Alúmina). La forma definitiva estaba ejecutada mediante estucos compuestos de Alúmina y silicatos mezclados con paja y pelos en pastas de yeso y polvo de mármol, posteriormente pulidos y coloreados.

En la civilización griega ya se conocía casi la totalidad de materiales naturales (rocas, adobes, maderas...) y artificiales (cerámicas y conglomerantes). Ya en el siglo VII a C., utilizaron una gran variedad de rocas calizas y tobas muy apropiadas a las que les aplicaban un enlucido fino o estuco, a base de caliza calcinada, sobre el que después se daba una mano de color. En cambio, en las construcciones, utilizaban un mortero hecho simplemente de tierra y arcilla para unir las piedras.

Son los griegos los primeros en utilizar el mortero de cal propiamente dicho, encontrándose morteros fechados a finales del siglo II y principios del I a C. ,ejemplo de ello, las viviendas de Délos y de Théra. Estos morteros, conocidos como morteros helénicos, eran a base de cal, yeso y áridos de polvo de mármol; Además se ha probado que se incorporaban adiciones para hacer el mortero más duro y estable (Gaspar Teba, 1995). En Théra, se introducía en la mezcla de cal y arena, polvo volcánico o “tierra de Santorín” obteniéndose unos morteros estables al

agua y con propiedades análogas a los morteros actuales a base de aglomerantes hidráulicos (Laffarga Osteret et al. 1995). También, en estos morteros se empleó ladrillo machacado (chamota) traduciéndose en una coloración rosácea en ciertos revestimientos exteriores.



Figura 3.9. Técnicas de fabricación de los morteros griegos.

En Roma, el empleo de mortero para la construcción, “opus caementium” (mortero de cal más árido más puzolana) se desarrolla paralelamente a la construcción con ladrillo, reservándose el aparejo sin mortero para la construcción en piedra natural “opus laeticium” (gruesos bloques ajustados sin mortero) o “later crudus” (ladrillos secos ajustados sin mortero), es decir, la técnica de “piedra seca”. Así mismo, no se sabe con exactitud la fecha de la introducción del mortero de cal, pero, fueron capaces rápidamente de perfeccionar y transmitir por todo el imperio los procesos de fabricación de la cal y puesta en obra del mortero (siglos II y I a C.). En cambio, el yeso será utilizado como material secundario en la albañilería.

El Tratado de Arquitectura de Marcus Vitruvius Pollon (siglo I a C.) describe el procedimiento y la proporción de la mezcla del mortero: (una unidad de cal/tres de arena; dos unidades de cal/cinco de arena, dependiendo el tipo de arena) “Si la arena fuese de mina, á tres partes de ella se pondrá una de cal, incorporándolo todo bien; y si fuese de rio ó mar, á dos partes de arena, una de cal: esta regla es la que debe seguirse en la composición del mortero” (Libro II Cap. VI). También el autor cita en su tratado, Libro II Cap. V, las cenizas volcánicas o los ladrillos

machacados, aditivos empleados por los griegos: “Si á la arena de mar ó rio se añadiese una tercera parte de polvos cernidos de ladrillo cocido, hará una mezcla de mucho mejor calidad [...]. Si cualesquiera de estas piedras sin cocer se quebrantasen y moliesen, y con arena y agua se hiciese mortero para edificar, ni traxaria ni podria sostener el muro; pero penetradas del fuego en el horno, pierde lo rígido de su solidez primera; y consumidas y exhaladas sus fuerzas, quedan esponjosas, abiertas y vacías de poro. Extraídos de ella el agua y aire, y quedando el fuego, ahogado éste en otra agua antes que se exhale, toma vigor y fuerza, y penetrando el húmido en lo vacío de los poros [...]”.

Los romanos emplearon la arcilla cocida y, sobre todo, la puzolana o polvo de puzol, roca volcánica que se da en la región de Bayas y Pozzuoli, en las comarcas de los municipios situados cerca del volcán Vesubio, y que confieren al mortero propiedades hidráulicas. Tampoco se descarta la idea de que se hayan utilizado aditivos como la albúmina, caseína, urea y aceites.

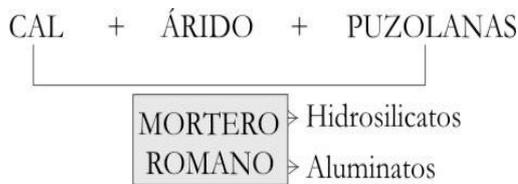


Figura 3.10. Técnicas de fabricación de los morteros griegos. Técnicas de fabricación de los morteros romanos.

El resultado era la protección de la matriz del ligante calcáreo, las reacciones de carácter puzolánico y la formación de una superficie de carbonato de calcio con una función protectora.

Pero lo extraordinario de la calidad de los morteros romanos, se debía al cuidado con el que elegían y mezclaban sus constituyentes, la perfecta cocción y apagado de la cal, la homogeneidad de la mezcla y su puesta en obra.

Con la desaparición del Imperio Romano las técnicas de fabricación se diversificaron y sus características variaron según el lugar o el edificio.

En las culturas andinas del Perú (antes de la colonización española) para los morteros de mampostería se usaba cal mezclada con asfalto, y también, con barro para estabilizar los adobes.

En España, durante el período islámico se produce un gran auge en las yeserías o estuco “andalusí”, realizado éste con mortero de cal, yeso y polvo de mármol. Ejemplo de ello, en construcciones como la Alambra, con maravillosas decoraciones derivadas de las yeserías almohades.

Por otro lado, en el período de la Edad Media, se produce un progresivo olvido de mucho de los conocimientos que dominaron sus predecesores los romanos, ya que durante este período se generalizó el empleo de la piedra de construcción. Los morteros medievales, así como cualquier otro fenómeno que afecte a este período, son poco conocidos. Tan sólo, existe un estudio realizado por Viollet-le-Duc sobre morteros medievales en la región de Francia, y observa que, la calidad de los morteros durante los siglos IX, X y XI es mediocre, así como, desfavorable el efecto que produce la adición de teja machacada. Todo ello agravado por el hecho de que la puesta en obra no presentaba el cuidado de los procedimientos romanos. En el siglo XII se homogeneiza la mezcla y se consiguen morteros de mejor calidad, a menudo, combinados con grava y carbón de madera. Pero, no será hasta bien entrados los siglos XIV y XV cuando la calidad del mortero se vea mejorada.

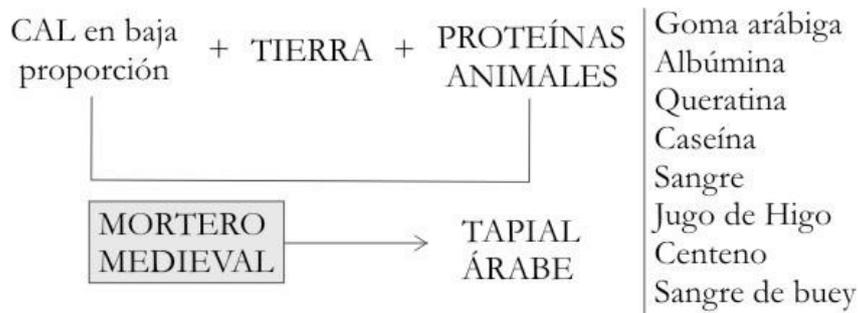


Figura 3.11. Técnicas de fabricación de los morteros griegos. Técnicas de fabricación de los morteros romanos. Técnicas de fabricación de los morteros medievales.

Por otra parte, el uso de enlucidos y estucos experimentó un gran auge, es así que, después del siglo XII el estuco complementa a la pintura y escultura. Las pastas de yeso se emplean para estucar como soporte sobre tablas, realizándose elementos en relieve moldeados con este material. Asimismo, en escultura se emplea como soporte de policromías.

En cuanto a la Edad Moderna, se siguen utilizando los mismos materiales que en siglos anteriores pero hay que destacar el invento de la escayola, atribuido al arquitecto Andrea de Verrocchio (1432-1486), un material de construcción que no se preparó hasta entonces, pese a que el yeso como material de construcción ya se conocía desde tiempos remotos.

Igualmente, en 1570, el arquitecto italiano Andrea Palladio hizo referencia a una cal extraordinaria (procedente de Padua) que resultaba al calcinar una piedra calcárea que poseía propiedades hidráulicas: "La cal obtenida de esta piedra fragua inmediatamente y puede utilizarse tanto para obras en contacto con agua como las que estén expuestas a la alteración de la intemperie". La piedra calcárea a la que Palladio aludía era una caliza margosa. Hoy en día se conoce que, la cal hidráulica también se puede conseguir mediante la mezcla de calizas y arcillas.

En España, en el siglo XVI, aparece en la construcción el uso de un nuevo aparejo, llamado aparejo toledano –alternando hiladas de piedra y fábrica de ladrillo y que, durante el siglo XVII se conseguía mediante un revoco que lo imitaba. Posteriormente, durante el período de Carlos III y Sabatini desaparecen los despieces de revocos a causa de un afrancesamiento de la arquitectura, utilizándose los colores pasteles para el revestimiento de paredes.

Asimismo, en los siglos XVII y XVIII el estuco cobra un excepcional valor como complemento de la escenografía arquitectónica pasando de decoración a esquemas más complejos con la utilización de armaduras metálicas para afianzar los atrevidos elementos decorativos.

En 1756, Smeaton estudió, durante la construcción del faro de Eddyston, las mezclas de calizas puras y de arcillas y demostró que las propiedades hidráulicas se debían a la mezcla, una vez calcinada, de ambos materiales. Estos primeros aglomerantes así obtenidos tenían a menudo las características de los cementos de fraguado rápido actuales.

Por otro lado, en edificios españoles neoclásicos (siglo XVIII) se emplean morteros a base de cal común o grasa, mezclada con arena, que a su vez podía ser de río, de mar o de mina imitándose las fábricas de piedra con el aparejo de grandes despieces de sillares. Así mismo, en los morteros de fábricas de ladrillo era normal el uso de arena de mina; determinar las proporciones de los morteros era una tarea a seguir de manera adecuada y bien estudiada, con proporciones usuales de mezcla arena:cal 5:2, si la arena era de mina, y 2:1 si la arena era de río. La fabricación de dichos morteros se realizaba a cubierto evitando la influencia de las condiciones atmosféricas. También se cita en todos los documentos que, una vez bien batida la mezcla se dejara en reposo un mínimo de quince días, siendo de un mes en período de invierno. Ya en el siglo XIX, y en construcciones de casas más nobles, en estos revestimientos con morteros de cal y yeso se labran sillares con martellina, almohadillados y plintos recreando la piedra.

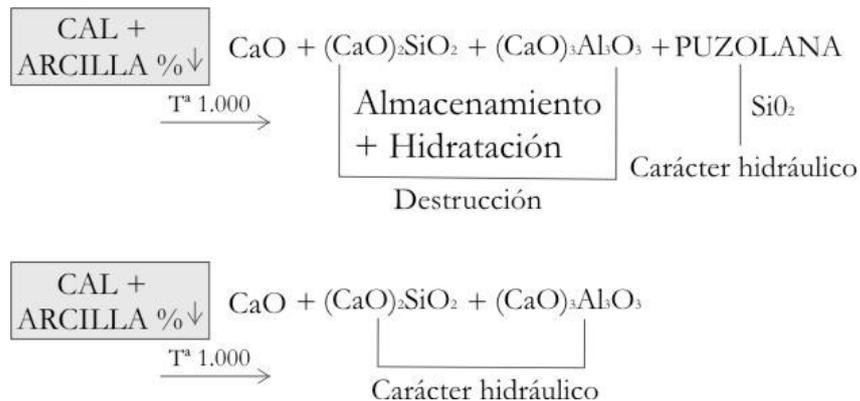


Figura 3.12. Técnicas de fabricación de los morteros griegos. Técnicas de fabricación de los morteros romanos. Técnicas de fabricación de los morteros medievales. Evolución de los morteros romanos a los modernos. El primer esquema corresponde a la fabricación de los morteros romanos y el segundo a los morteros actuales.

En 1812, L. J. Vicat fue el primero que expuso científicamente las propiedades hidráulicas de ciertas cales, y que estas propiedades se debían principalmente a la reacción del óxido de calcio con compuestos derivados de las arcillas, es decir, sílice más óxidos de hierro y aluminio,

originando silicatos cálcicos hidratados. Así, los compuestos resultantes poseían mayor o menor hidraulicidad según el contenido de arcilla, la temperatura y el tiempo de cocción.

Joseph Aspdin, en 1824, patenta el cemento que produce, y del que afirma ser “tan duro como la piedra Portland”. Este es el principio de la denominación “cemento Portland”, aunque las características difieran de las de la piedra de la cual tomó su nombre.

Pero quizá sea M. I. Brunel quien, en 1828, usara el primer hormigón a base de cemento Portland para taponar agujeros en el túnel construido bajo el río Támesis.

Ya en el 1839, L. J. Vicat fijó el término “hidráulico” para definir aquellos conglomerantes que podían endurecer bajo el agua al comprobar el éxito de un cemento ideado por él a base de cochura de mezclas de cal y arcilla, empleado en la construcción del puerto de Cherburgo.

L. C. Jonson descubre que el clínker, producto que hasta entonces se desechaba como residuo, daba mayores resultados que el cemento usual si estaba finamente triturado. Con la Exposición Universal de 1851, y a partir de finales del XIX, se perpetúa el producto consiguiéndose toda una gama de conglomerantes derivados del Portland, reemplazando al mortero de cal. En el proceso de fabricación del cemento primero se calcina la caliza, a continuación se tritura y se mezcla con arcilla. Esta mezcla se vuelve a calcinar a una temperatura entre 1300-1500 ° C, resultando el clínker. De nuevo, esta mezcla se tritura y se vuelve a calcinar hasta pérdida total del dióxido de carbono. Finalmente, a la mezcla resultante se le añade yeso para retardar el fraguado.

Actualmente, la fabricación de este cemento no ha cambiado, aunque las investigaciones a lo largo del siglo XX han sido muy significativas.

Paralelamente, se podría decir que, es el desarrollo experimentado por la Química durante los siglos XVII y XVIII el detonante de la impresionante variedad de materiales, tanto convencionales como de “nuevos”, en la búsqueda de diferentes compuestos con características preestablecidas. Surgen, así, otros materiales como el estireno en 1831, la

melamina en 1834, el cloruro de vinilo en 1835 y el poliéster en 1847, que no serán explotados realmente hasta bien entrado el siglo XX.

En el siglo XX, el desarrollo de las técnicas industriales y los mayores y mejores conocimientos científicos de los materiales, afianzados con nuevas instrumentaciones, hacía imposible e imparables todo control y crecimiento.

Debido a esta aparición incontrolada de nuevos materiales de construcción la nomenclatura se verá tergiversada. Es por eso que, por su concepción reciente, serán llamados mayormente materiales compuestos y/o “composite”, reservándose este último para definir nuevos materiales compuestos, en los que su matriz o su armadura, es de naturaleza sintética. Por esta misma concepción, son compuestos también, los adobes, bloques de barro o betún armados con fibras –paja- de cereales utilizados hace milenios en las más antiguas civilizaciones.

El inicio en el uso de estos materiales compuestos se sitúa a principios del siglo XX, cuando empiezan a obtenerse materiales resultantes de la transformación de productos de naturaleza polimérica como el caucho, resinas, almidón, colágeno, gomas...-, con estructuras no bien conocidas para el desarrollo científico de la época, pero que surgen como solución a la “necesidad industrial” imperante.

Se empieza a dar importancia a las distribuciones estructurales de unos materiales en otros (dirección de las fibras y tejidos, cargas, aditivos...) con objeto de obtener una mejora en las propiedades y en el comportamiento mecánico, ambiental y térmico.

A tal efecto, se obtuvieron las resinas fenólicas (Baekeland 1907), se lograron estructuras laminares por moldeo (O’Conor y Faber, 1913, compañía Formica Products); se desarrolló el método para fabricar elementos estructurales en la superposición de capas de material fibroso impregnado con un material ligante mediante calor y presión (R. Kemp, 1916 patente US nº 1.393.541); se desarrollaron los adhesivos a base de derivados de la celulosa -nitratos y esteres- (1920-1930); se sintetizaron las primeras resinas de poliéster (Carton Ellis, 1933), se crearon los plásticos reforzados mediante láminas de fibra de vidrio y resina de poliéster con métodos de baja presión (Período de contenedores, aplicaciones electrónicas, 1940-1941); se investigó sobre las fibras de vidrio (Owens Corning, 1930- se comercializaron en 1938), se logró la fibra continua de carbono con un módulo de 41 Gpa (Owens

Corning, 1961) y de 166 Gpa –PoliAcrilatoNitrilo-(A. Shindo, 1961), se comercializó el primer filamento de fibra de vidrio (1965); se patentaron las resinas epoxi (Pierre Castan, 1938, fabricación Ciba) comercializándose en 1946 con la marca Araldite y las resinas de melamina-formaldehído (Ciba, 1955), y por último, se introdujeron los esteres acrílicos (La Loctite Corporation, 1966).

Como materiales realmente nuevos, por no haber existido natural o artificialmente con anterioridad, se podrían citar algunos como las nuevas formulaciones de polímeros, los plásticos sintéticos resistentes a altas temperaturas, los materiales compuestos o “composites”, “cermets”, vidrios metálicos, geopolímeros...

Actualmente, el resultado de un mejor conocimiento de los materiales convencionales, permite que incluyamos otros numerosos “nuevos materiales” mediante modificaciones de sus composiciones: nuevos cementos de adición, cementos y hormigones aditivados, vidrios compuestos y blindados, placas de yeso especialmente endurecidas, maderas laminadas, ferrocementos, fibrocementos...

Por tanto, la evolución de las civilizaciones ha hecho que la industria de los morteros, ya sean naturales o sintéticos, avance extraordinariamente, y actualmente se pueda proporcionar cualquier tipo de mortero según las necesidades exigidas en la obra.

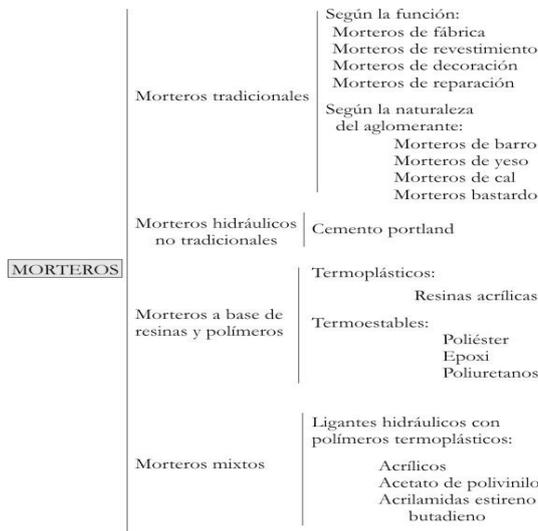
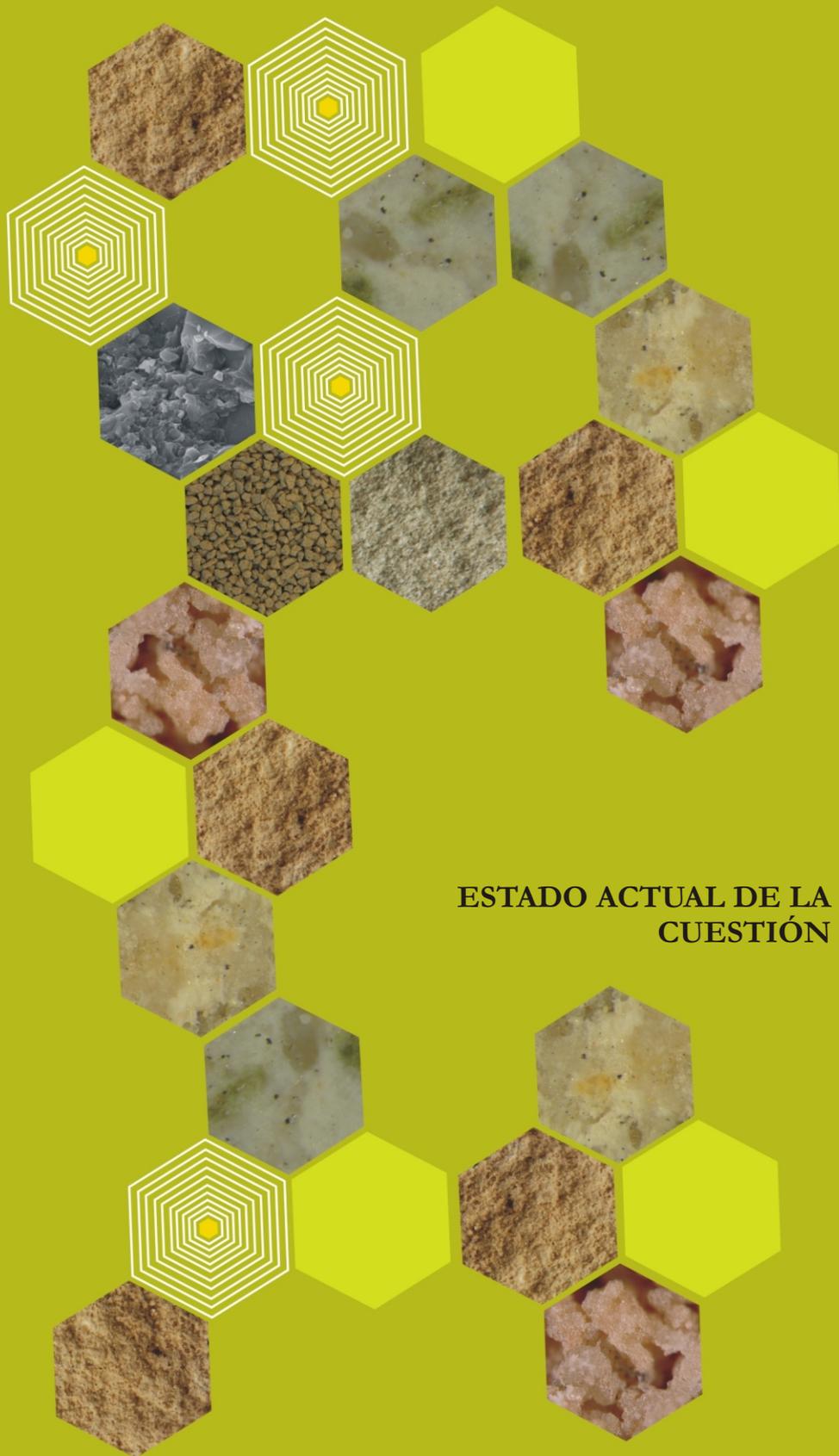


Figura 3.13. Tipos de morteros conocidos actualmente y sus derivados.



**ESTADO ACTUAL DE LA
CUESTIÓN**

4. ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN

Como se ha comentado en el apartado anterior, los morteros han formado parte de la historia en paralelo a la evolución del hombre, desde el Neolítico hasta el siglo XXI. Tierra, yeso y cal han sido los materiales fundamentales en las manifestaciones artísticas y constructivas.

La necesidad incesante de mantener los edificios y monumentos inalterados ha motivado sucesivas intervenciones de restauración con materiales de uso en cada época pero que, en muchas ocasiones, eran incompatibles con las características de los materiales originales. Ejemplo de ello, son las numerosas y recientes restauraciones donde el empleo de morteros de cemento ha provocado lamentables consecuencias en la conservación del monumento. Aunque estos morteros poseen buenas propiedades físico-mecánicas, son incompatibles con los elementos de fábrica y talla tradicionales, son bastante menos porosos y elásticos, poseen diferente comportamiento térmico y mecánico, y además, presentan un alto contenido en sales solubles, teniendo consecuencias desastrosas.

La restauración es una actividad antigua, que ha evolucionado desde las artes y los oficios, hacia una actividad técnica y científica de alta especialización. Este desarrollo ha supuesto, la introducción de nuevas técnicas instrumentales de análisis y nuevos métodos y tratamientos de intervención sobre el monumento, sin que ello suponga relegar el conocimiento y uso de los materiales que fueron empleados y transmitidos de generación en generación de forma artesanal.

Investigar la aplicación específica de dichos métodos y materiales en base a las distintas litologías a intervenir, las condiciones de labrado de la piedra, la situación medioambiental específica donde se localiza la pieza, etc., es una tarea necesaria en cualquier intervención sobre monumentos. (Alonso Matilla, 1990).

Por otra parte, los criterios esenciales para la selección de los materiales de reparación se deben de asentar en los principios básicos de la conservación: reversibilidad, mínima intervención, durabilidad y compatibilidad (Brandi, C., 1977). Esta compatibilidad entraña factores químicos, físico-químicos y mecánicos y debe proporcionar perdurabilidad en el tiempo (Ashurt, J. et al, 1990).

Estos requerimientos de compatibilidad hacen necesario que, desde el punto de vista de su composición los materiales y morteros de reparación no deben incluir compuestos capaces de reaccionar con los materiales existentes que ocasionen daños en ellos. Tampoco deben generar compuestos solubles que puedan reaccionar con el soporte de la obra a reparar. Análogamente, debe evitarse la incorporación de materiales arcillosos, ya que consiguen retener una gran cantidad de agua en su estructura ocasionando agrietamientos por la pérdida de dicha agua mediante evaporación (Grossi, G. M. et al, 1994).

Otro factor a considerar en la elección del mortero es su capacidad de adhesión al sustrato pétreo, la cual depende, a su vez, del sistema poroso del material pétreo.

Finalmente, la elección del mortero de restauración viene determinada significativamente por la función que desempeñará en el monumento, reintegración y reparación de sillares, molduras y faltantes, así como, consolidación y relleno de grietas y estructuras. Juntas y rellenos proporcionan unidad al conjunto de la edificación y/o escultura-ornamentación y participa de su buen comportamiento estructural respondiendo a su funcionalidad. Revocos y tratamientos superficiales contribuyen a su protección, actuando a veces como capa de sacrificio, al mismo tiempo que forman parte de la estética del monumento. Revocos y estucados han sido técnicas tradicionalmente aplicadas a la superficie de los monumentos, tanto de piedra como de fábricas de ladrillo. El propio paso del tiempo y, las tendencias arquitectónicas del presente siglo, buscando la estética de la piedra vista, han despojado, con cierta frecuencia, estos recubrimientos a la piedra de los edificios y elementos, esculturas y ornamentos, exponiéndolos de manera directa a la agresión ambiental.

En la presente tesis, se han tenido en cuenta todos estos aspectos que envuelven la problemática de la alteración de monumentos, más concretamente en piezas escultóricas y ornamentales, recuperando las

técnicas tradicionales de realización de morteros y, mediante técnicas más actuales, desarrollando reproducciones/restituciones que limiten, el deterioro de los originales. La solución correcta sería la sustitución de esculturas originales por buenas copias, en sus exposiciones al aire libre (Alonso Matilla, 1990).

Sentadas las premisas básicas de la intervención en monumentos, abordaremos seguidamente aquellos aspectos concretos relativos a la elección del material de reposición. Señalaremos en primer lugar, que es de suma importancia el conocimiento del material que va a ser sustituido. Para ello, será necesario una caracterización petrológica y físico-mecánica del material de la obra a intervenir (composición mineralógica, textura, porosidad...). El estudio de morteros antiguos, ya sean morteros de fábrica, de revestimiento, de decoración o de reparación, ha sido tratado por muchos autores (Jedrzejevska, H., 1960; Ashurt, J., 1986; Rota Rossi-Doria, 1986, 1990; Alessandrini et al., 1989, 1992; Cazalla Vázquez y De la Torre López, 2003) con el objetivo de uniformizar la metodología de actuación.

Rota Rossi-Doria (1986) detalla las características mínimas exigibles a la hora de elaborar un nuevo mortero, a saber, reproducción del mortero lo más similar posible al original en cuanto a textura y color, compatibilidad con el material original, porosidad igual o ligeramente superior al original, resistencia a compresión menor o igual a la del original, adecuada trabajabilidad, rapidez y seguridad en su colocación, elevada compacidad y, mínima retracción, mínimo contenido de sales solubles e iones libres, adherencia adecuada en base al material original, impermeabilidad a los fluidos y permeabilidad al vapor de agua y finalmente, durabilidad y resistencia a agentes contaminantes externos.

Diferentes tratamientos se han dado a este problema. De Luxan et al, (1997), reivindica, el uso de los morteros de cal y yeso en obras de conservación, restauración y rehabilitación, apoyados en el conocimiento y estudio de sus propiedades y características, en base al original. A partir de estos materiales de origen tradicional, proponen nuevos compuestos que poseen una acción hidrofugante, disminuyen la porosidad accesible al agua y la absorción, exhiben mayor resistencia frente a la humedad, permeabilidad elevada al vapor de agua y son totalmente ecológicos.

En contraposición a las propiedades del mortero tradicional de compatibilidad con el original y reducción de la agresividad y estrés

interno con el monumento, actualmente se ha usado de manera indiscriminada el mortero de cemento, el cual presenta una excesiva resistencia, con presencia de microporos, con un alto coeficiente de dilatación térmica, con elevada adherencia y alta densidad, con alto coeficiente de conductividad térmica y elevado contenido de sales solubles.

Por otro lado, el uso de materiales sintéticos en intervenciones de conservación y restauración de monumentos pétreos está muy extendido desde hace varias décadas (Amoroso y Fascina, 1983; Domasłowski y Strelczyk, 1986; Selwitz, 1992), diseñándose nuevos materiales acordes a la finalidad del acabado (Melo et al., 1999; Cardiano, 2003; Mazzola et al., 2003).

Carbonell de Masy (1993), a la hora de realizar una reposición con piedra artificial, diferencia entre rocas cementadas y rocas cristalinas, y especifica las características que deben de cumplir los morteros para dicha intervención:

- a) Buena trabajabilidad;
- b) Presentar una textura y color similar a los de la piedra;
- c) Mínima retracción de fraguado;
- d) Impermeabilidad al agua de lluvia igual o algo mayor al resto de la piedra sana;
- e) Permitir respirar la humedad que pueda existir en el soporte;
- f) Absorber los posibles movimientos de dilatación y contracción de cada soporte, evitando tensiones que afecten a su adherencia;
- g) Resistencia a los agentes atmosféricos igual o algo superior al resto de la piedra sana;
- h) Mínimo contenido en sales solubles;
- i) Resistencia mecánica similar a la piedra sana.

En la actualidad existe una gran variedad de morteros de reparación en el mercado. Entre los factores que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar un material de relleno para una reparación se señalan los siguientes:

- a) grado de deterioro -sus causas y evolución así como la resistencia mecánica del material a reparar-,
- b) espesor a aplicar,
- c) lugar que hay que rellenar -porque aunque habitualmente las reparaciones se llevan en la superficie, a veces la oquedad está en el interior-,

- d) condiciones de temperatura y humedad tanto del ambiente como en el soporte durante la reparación y
 e) el tiempo disponible para llevar a cabo la reparación.

Tabla 4.1. Características de los morteros según la recomendación italiana Normal 28/87.

ESTADO DEL MORTERO DE REPARACIÓN	CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR
Fresco	Trabajabilidad
	Retención de agua
	Densidad aparente
Endurecido	Sales solubles en agua
	Tendencia a la formación de eflorescencias
	Porosidad
	Densidad real y aparente
	Permeabilidad del agua
	Absorción por capilaridad
	Color
	Resistencia mecánica
	Módulo elástico
	Dilatación Térmica e hidráulica
	Retracción higrométrica
	Adherencia

Sin embargo, sólo unos pocos morteros de reparación comerciales son aptos para ser usados en esculturas y ornamentos (Ledan C30, PLM, etc.) y, prácticamente ninguno se asemeja al material original. En la mayoría de los casos, están elaborados (formulaciones, dosificaciones, etc.) para remediar problemas arquitectónicos, con unas características notablemente diferentes a las de la piedra original, comportando un rechazo entre materiales.

En este sentido señalaremos que, en el libro *Il restauro della pietra*, Lorenzo Lazzarini y Marisa Laurenzi Tabasso (1986), detallan las dosificaciones y diámetro del árido que con el ligante (inorgánico/orgánico) conformarán el mortero de reparación a imitación de la piedra original (ejemplo mármol, rojo de Verona y calcarenita de Agrigento), siempre teniendo en cuenta, los tres principios básicos de color, textura y porosidad.

En las últimas décadas del siglo XX, se ha podido observar cómo la técnica de reproducción por moldeo en caucho de silicona ha permitido salvaguardar muchas obras consiguiendo una fidelidad extraordinaria en las réplicas, tanto en la forma como en la materia que, sin embargo, por su naturaleza diferente, no difiere del original.

La reproducción representa hoy en día un papel muy importante como técnica auxiliar para la conservación. Se trata de una técnica que puede utilizarse tanto en la reproducción de piezas repetitivas, ya sean de carácter ornamental o funcional, como en la reposición de estatuaria que deba ser trasladada al interior para asegurar su conservación o, si fuese el caso, para reconstruir piezas que se hayan perdido por completo partiendo de la documentación gráfica de la época (García Gallego, J., 1994).

Finalmente, diferentes autores han descrito el proceso de elaboración de estos morteros de reparación: “se realiza usando una pasta base de una carga inerte y un conglomerante; como carga se utiliza el polvo de la misma piedra, al que se le puedan añadir pigmentos inorgánicos estables, como las tierras, para obtener el tono y color más conveniente. La granulometría de la carga se escogerá en función de la de la piedra original a rellenar, las más compactas más finas, las más porosas más gruesas y se seleccionarán mediante cribas adecuadas. Como conglomerante se usarán adhesivos orgánicos y sustancias inorgánicas” (Lorenzo Lazzarini et al, 1986; Carbonell de Massy, M., 1993; Santiago Godos, V., 1996).



MORTEROS COMPUESTOS

5. LOS MORTEROS COMPUESTOS.

5.1. Introducción.

Por mortero compuesto se entiende aquél elaborado a partir de materiales “composites”, materiales de concepción y fabricación reciente, que se denominan así por estar constituidos por más de un componente, y siempre incluyendo una matriz homogénea de origen sintético, que engloba uno o varios materiales particulados y/o mayormente de morfología fibrosa (Laffarga Osteret, J. et al, 1995).

En un sentido amplio, el mortero compuesto aparece en el momento en que el hombre no se limita, en sus construcciones, a utilizar los materiales tal y como los encuentra en la Naturaleza. Compuestos o Composites son efectivamente los adobes, bloques de barro o betún, armados con fibras –paja- de cereales utilizados hace milenios en las más antiguas civilizaciones, incluso se utilizaron para la construcción de la Torre de Babel (Laffarga Osteret, J. et al, 1995).

Olivares et al., (2003) definen material compuesto como aquél constituido por dos o más componentes cuyas propiedades son superiores a las que tienen cada uno por separado, permaneciendo todos perfectamente identificables en la masa del elemento.

Fundamentalmente, lo que se entiende por material compuesto o “composite” es un material artificial integrado por fases diferentes y diferenciadas, cuyo mayor volumen lo ocupa su “fase matriz”, componente de no muy alta densidad, de naturaleza polimérica y sintética, en la mayoría de las preparaciones, que engloba una segunda fase, “fase de refuerzo”, compuesta a base de fibras (partículas o láminas), con resistencia (a tracción, compresión, rozamiento...) muy superior a la que posee la matriz. Las partículas, fibras o láminas, englobadas dentro de la matriz, actúan como armaduras o refuerzos de la misma, pudiendo llegar a absorber la práctica totalidad de las cargas que se aplican al compuesto (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Resumen de los materiales compuestos.

MATERIALES COMPUESTOS				
		MATERIAL	MATRIZ	FIBRAS/ REFUERZO
En el Cuerpo Humano		Huesos	Cemento cálcico	Fibra de colágeno
		Adobe	Barro	Paja
Invencción Humana para la Construcción	Antigüedad	Yeso armado	Yeso	Crines de caballo
		Hormigón armado	Hormigón	Armadura de acero
	Modernas	Amianto cemento	Mortero de cemento	Amianto
		Morteros y hormigones fibrosos	Mortero	Acero, vidrio, poliméricos, carbono, vegetales
			Hormigón	
		Yeso armado	Yeso	Vidrio, poliméricas, vegetales
		Compuestos/ Composites	Resina	Vidrio, poliméricas, carbono, arámida
		Morteros poliméricos	Resina	áridos

La mayoría de los morteros compuestos están constituidos por dos fases, una sustentante o matriz, y otra, reforzante, que está inmersa y adherida a la primera.

La fase matriz del compuesto suele ser la más tenaz, aunque también aquella con menor resistencia. La fase reforzante suele ser la de mayor resistencia y con alto módulo elástico. La combinación y compensación de dureza, fragilidad y tenacidad en los compuestos bien direccionados hace que estos materiales tengan muchas aplicaciones y respondan a muy variadas exigencias constructivas. En definitiva, podemos decir que la parte reforzante (fibras, árido...) aporta rigidez y resistencia y que la matriz aglomera las fibras/áridos, les da forma y transmite los esfuerzos entre dichos refuerzos.

En el campo de los morteros compuestos se pueden establecer tres tipologías dependiendo del refuerzo utilizado y en función de las necesidades:

- a) morteros compuestos fibrosos cuyo material de refuerzo son las fibras,
- b) laminados en los que suelen alternarse las fases componentes en forma laminar, y
- c) particulados, cuyas partículas se encuentran inmersas en la matriz polimérica.

5.2. Características genéricas de un mortero compuesto.

El mortero compuesto, por su carácter de material pétreo artificial y por su capacidad para unir fragmentos y dar cohesión al conjunto, debería de poseer dos propiedades esenciales: plasticidad y capacidad de fraguado/curado, o sea, endurecimiento.

Tanto la plasticidad como la capacidad para el fraguado/curado vienen determinadas por la combinación de los diversos componentes que integran cada mortero. A continuación se describen todos ellos (Figura 5.1.).

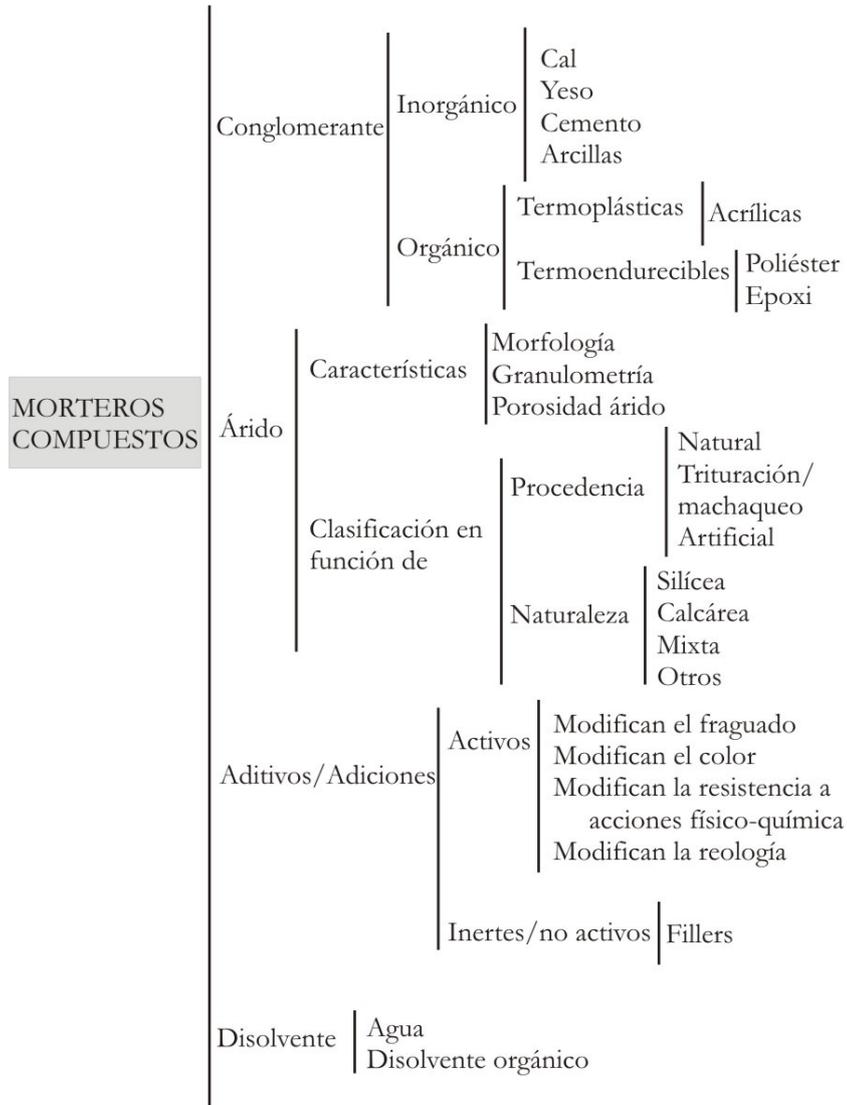


Figura 5.1. Componentes que integran los morteros compuestos.

5.2.1. Materiales que conforman un mortero compuesto.

Un mortero compuesto, en términos generales, es el resultado de la mezcla de un conglomerante (orgánico o inorgánico), un árido fino (arena), un disolvente (orgánico o agua) y unos materiales complementarios (aditivos) que mejoran su calidad, todo ello, con unas dosificaciones ajustadas a cada propósito de intervención.

5.2.1.1. Conglomerantes.

El diccionario de la Real Academia de la Lengua distingue entre aglomerante y conglomerante. El aglomerante lo define como el material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico, por ejemplo el barro; y, el conglomerante viene definido como el material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos, por ejemplo el yeso, la cal, el cemento, las resinas sintéticas, etc.

Los conglomerantes cumplen una doble función, por un lado, la función física de adherirse a la superficie de las partículas/árido a las que debe unir, así como, rellenar los huecos entre las partículas de árido, y otra, la función química de polimerizar o combinarse con el disolvente formando una serie de compuestos químicos capaces de conformar una estructura, conseguir la adherencia y desarrollar una elevada resistencia (Pitarch Roig, A. M. et al, 2003).

Para una mejor comprensión de los diferentes tipos de morteros considerados en esta tesis doctoral partiremos del estudio de los componentes principales del mortero compuesto: los conglomerantes (Tabla 5.2.).

Tabla 5.2. Tipos de conglomerantes.

CONGLOMERANTES	
Inorgánicos	Yeso $\beta + \alpha$
	Cal aérea
Orgánicos	Termoplásticos
	Termoestables
	Acrílicas
	Poliésteres

5.2.1.1.1. CONGLOMERANTES INORGÁNICOS.

5.2.1.1.1.1. EL YESO.

Con el término “yeso” se conocen dos materiales con propiedades físicas y químicas diferentes. Uno se refiere al producto natural (piedra de yeso, aljez $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y otro, al producto obtenido industrialmente a partir del primero (yeso cocido, semihidrato $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

El yeso industrial es, por tanto, un conglomerante artificial obtenido de la deshidratación parcial o total del Aljez, yeso natural o piedra de yeso. Además y como se ha indicado en los antecedentes históricos, es el conglomerante más antiguo conocido por la humanidad.

El yeso natural, aljez o piedra de yeso es una roca sedimentaria de estructura cristalina, constituida por sulfato de calcio con dos moléculas de agua de cristalización ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), designado como sulfato de calcio dihidratado. Este yeso natural puede presentarse en la Naturaleza de diversas formas, por ejemplo, alabastro, yeso de nieve, yeso sedoso, espejuelo... y, también, como sulfato de calcio anhidro (CaSO_4).

En el proceso de deshidratación, cuando la piedra se somete a la acción del calor (cocción), con temperaturas comprendidas entre 130°C y 1.000°C , pierde parte o toda el agua de cristalización obteniéndose diferentes fases y estados alotrópicos (Tabla 5.3-5).

Tabla 5.3. Tipos de yesos.

T^a ambiente	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Dihidrato, piedra de yeso, yeso natural o Aljez
$120^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	Hemihidrato o semihidrato, yeso cocido
$220^\circ\text{C} - 380^\circ\text{C}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \gamma$	Anhidrita III soluble
$380^\circ\text{C} - 1.200^\circ\text{C}$	$\text{Ca SO}_4 \cdot \beta$	Anhidrita II insoluble
$1.200^\circ\text{C} - 1.350^\circ\text{C}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \alpha$	Anhidrita I Yeso hidráulico
Superior a 1.350°C	CaSO_4	Disociación térmica

Tabla 5.4. Clasificación de los yesos según el proceso de calcinación.

Temperatura de cocción	Usos
Yesos cocidos a baja temperatura	Yeso de estuco Yeso de modelados Yeso de moldeos Yeso de alabastro
Yesos cocidos a media temperatura	Yesos de revocar Yesos de horno
Yesos cocidos a alta temperatura	Yesos de solados Yeso alúmbrico

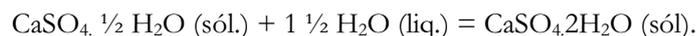
Tabla 5.5. Clasificación de la piedra yeso según la Norma UNE 102.002.

Clase	SO ₄ Ca.2H ₂ O	Utilidad
I Extra	95%	Vaciados, estucos muy finos, corridos de moldura, moldeados
I	90%	Blanqueos y estucos...
II	80%	Bóvedas tabicadas, enrasillados, tendidos...
III	70%	
IV	60%	

Las características de los productos resultantes dependerá del procedimiento de deshidratación seguido (hornos rotatorios, hornos verticales, hornos de cinta, horno de marmita, hornos artesanales...) el tamaño de la piedra de yeso triturada, el sistema de carga (espesor, distribución, etc.), así como el tiempo de tratamiento.

Tras la deshidratación, el material se somete a la molienda mediante molino de bolas (cilindro con bolas de sílex) que al girar molturan finamente el material. Una vez pulverizado el material se lleva a los silos (ensilado) donde se produce una homogeneización del producto (el yeso que por exceso de cocción –recocido- estaba deshidratado se transforma en hemihidrato al robarle agua a aquél que no se hubiese deshidratado –crudo- por defecto de cocción) y, por último, es envasado para protegerlo del medio ambiente por ser un producto perecedero.

De nuevo, en la fase de hidratación del yeso hemihidratado, éste en contacto con el agua se vuelve a hidratar, dando nuevamente al sulfato de calcio dihidratado:



Este proceso, que se conoce con el nombre de “fraguado” transcurre en tres etapas: hidratación, cristalización y endurecimiento. El proceso físico-químico del fraguado ha sido una cuestión muy debatida (Le Chatelier; Cavazzi). Durante este fenómeno de fraguado se produce un aumento de volumen (expansión 0,3-1,5%) (Arredondo y Verdú, 1991) y un desprendimiento de calor (reacción exotérmica). La rapidez del fraguado es otra de las propiedades de los yesos, siendo modificada mediante retardadores de fraguado, en detrimento de las resistencias mecánicas.

En el fraguado del yeso influyen diferentes factores, entre los que cabe destacar: relación yeso/agua, temperatura del agua de amasado, tiempo transcurrido desde su deshidratación/edad del conglomerante, tamaño de partículas/finura del molido, etc.

El tiempo de fraguado disminuye al aumentar la relación yeso/agua, y también, prolongando el amasado (Jonson, R. N.) (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Tiempo de fraguado del yeso.

Relación yeso-agua (g.:cc)	Duración del amasado	Tiempo de fraguado con la aguja de Vicat (min.)
100:80	1	10,50
100:80	2	7,75
100:80	3	5,75
100:60	1	7,25
100:45	1	3,25

Cuando más agua de amasado se emplee, mayor será la facilidad de la operación y más se retrasará el fraguado. Pero el agua que no tiene intervención ninguna en el proceso químico de hidratación, permanece en la pasta hasta que las condiciones son propicias para la evaporación. Al secarse la pasta fraguada, por evaporación del agua, el espacio que

ocupaba ésta queda vacío, quedará una masa más o menos porosa, según que el exceso de agua de amasado fuera mayor o menor.

Cuando mayor sea el grado de finura del yeso mayor cantidad de agua de amasado será necesario, no debe superarse nunca el 80% de agua; sino lo está muy molido puede bastar un 65% de agua.

Por otro lado, la resistencia a compresión y tracción de los yesos dependen de su naturaleza, de su composición, de su finura, de la cantidad de agua de amasado y del contenido de humedad en el momento de la rotura.

En la tabla 5.7. siguiente puede verse el efecto de la cantidad de agua de amasado sobre la resistencia a la compresión (Arredondo y Verdú, 1991).

Tabla 5.7. Resistencias a compresión del yeso en función del agua de amasado.

Agua de amasado %	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)
45	170
50	150
60	120
80	86
100	57

El yeso, por lo general, es de color blanco, con una dureza que oscila entre 1,5 y 3 en la escala de Mohs, por lo que se puede rayar con la uña, resiste muy bien al fuego y presenta alta adhesividad. Además, es un material ligeramente soluble en agua y poco aconsejado para emplearse en lugares expuestos a la acción del agua. Sin embargo, este efecto no es tan intenso como pudiera parecer a primera vista, ya que, para disolver un enlucido de yeso de 1 cm de espesor, sería necesario más de 1 m³ de agua por m², y esto suponiendo que el agua quedara saturada de yeso, lo cual, sucederá en rarísimas ocasiones (Arredondo y Verdú, 1991). También es soluble en ácido clorhídrico diluido en caliente.

Pero, el hecho de que el yeso sea un fracaso ante el agua, se encuentra en la rápida pérdida de resistencia que experimenta el material fraguado al absorber agua ávidamente a través de su red capilar.

Los estudios según Andrews, H. (1948) muestran que un 1% de agua produce un descenso del 52% en la resistencia de un yeso a base de hemihidrato puro amasado con un 60% de agua; mientras que una cantidad insignificante como el 0,04% la reduce en un 33%.

De estas cifras se deduce que, la resolución del problema exige una impermeabilización del material evitando que, en la medida de lo posible, el yeso fraguado absorba agua.

Estas sustancias impermeabilizantes (resinas naturales y sintéticas), aplicadas por impregnación o mezcladas con el yeso seco o agua de amasado, mejorarán las características del yeso aumentando su estabilidad frente a la temperatura e incrementando su resistencia mecánica.

Por otro lado, en el empleo del yeso para la fabricación de morteros, habrá que tener presente que las partículas de arena utilizadas no sean ni muy gruesas ni muy finas, puesto que evitaremos la elevada superficie específica que no siendo así requeriría una gran cantidad de pasta para aglutinar el compuesto.

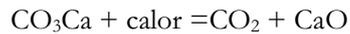
Dependiendo de la proporción de árido utilizada las características de resistencia del mortero variarán. Los morteros más usados son los dosificados a 1:1, 1:2 y 1:3 (yeso:árido a peso) que presentan unas resistencias a compresión de 140 kg/cm², 80 kg/cm² y 50 kg/cm². A medida que se duplica el contenido de árido la compresión se reduce a la mitad (Arredondo y Verdú, 1991)

5.2.1.1.1.2. LA CAL.

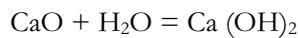
Como ya se ha comentado anteriormente, la cal es uno de los materiales aglomerantes más antiguos por excelencia, datada en el 4.000 a C.

Según Arredondo, “se llama cal a todo producto, sea cual fuere su composición y aspecto físico, que proceda de la calcinación de las piedras calizas. Después del proceso de calcinación hay que proceder a la extinción o apagado del producto anhidro, con lo cual se obtiene un material hidratado en forma pulverulenta o pastosa, según la cantidad de

agua añadida. Con una calcinación hasta unos 900-1.000 °C, se verifica la reacción:



es decir, se descompone el carbonato cálcico en óxido de calcio y anhídrido carbónico, desprendiéndose éste con los productos de la combustión. Durante el apagado se verifica:



o, lo que es lo mismo, se formará el hidróxido cálcico, el cual al ser puesto en obra, se recarbonata según la reacción:



al absorber el anhídrido carbónico de la atmósfera”.

Y sigue diciendo “cuando la piedra caliza de la que se parte contiene como impurezas sílice o alúmina y se calcina a temperatura de unos 1.200 °C, se disocia el carbonato dando óxido de calcio y anhídrido carbónico, reaccionando, entonces, el óxido de calcio con los componentes arcillosos de la piedra. Se forma así una cal hidráulica, denominación que proviene de fraguar en ambiente húmedo, e incluso bajo el agua”.

Vicart (1850-1900) ya afirmaba que “cuando la caliza tenía una cierta cantidad de arcilla cocida o se le agregaba, daba lugar por cocción a una cal hidráulica”.

Por tanto, la cal viva se obtiene mediante la operación de cocción de calizas puras (óxido de calcio, CaO), y suele presentarse en forma de terrones. Esta misma cal, al añadirsele agua se transforma en cal apagada (hidróxido de calcio), y puede presentarse en polvo o en pasta, atendiendo a la cantidad de agua añadida. Dependiendo de la cantidad de óxido magnésico (MgO) contenido, la cal aérea resultante la llamaremos cal grasa o blanca (menos del 5%) y/o cal magra/gris o dolomítica (más del 5%).

Esta cal grasa, tras el amasado con áridos y agua, se endurecerá mediante un proceso de fraguado por acción del dióxido de carbono del aire (Figura 5.2.)

En el estudio llevado a cabo en esta tesis nos centraremos solamente en la cal blanca o cal aérea, obtenida de la calcinación de rocas calizas puras, sin apenas sustancias magnesianas, obteniéndose la cal viva (CaO).

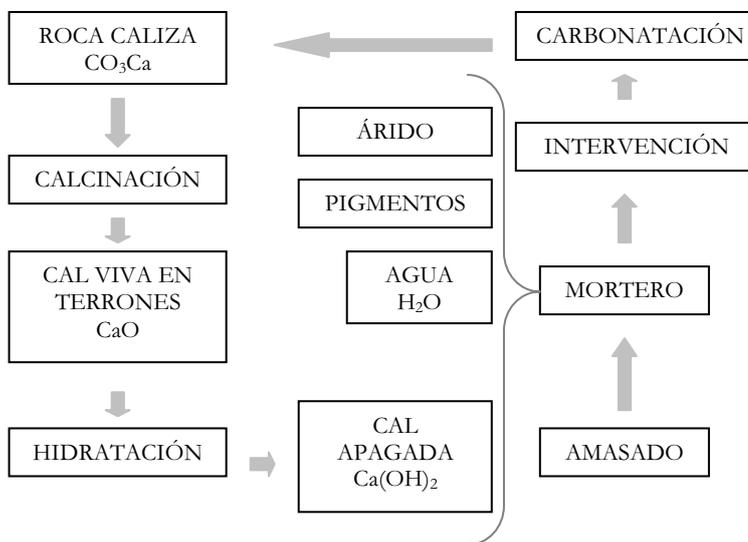


Figura 5.2. Proceso de obtención y puesta en obra de la cal.

5.2.1.1.2. CONGLOMERANTES ORGÁNICOS –MATRIZ POLIMÉRICA.

Desde hace siglos se conocen sustancias naturales con estructura polímera tomadas como conglomerantes o ligantes. Conocido era la goma de mastic por los romanos o el ámbar por los antiguos griegos.

A mediados del siglo XIX, con el desarrollo de las Ciencias Químicas, empiezan a sintetizarse nuevos materiales y polímeros naturales resultando unos polímeros de naturaleza orgánica a los que llamaron plásticos. Aunque fueron muchos los que se descubrieron e inventaron, casi todos antes del siglo XX, tuvo que pasar media centuria para que estos materiales sintéticos de laboratorio se produjeran industrialmente.

Las matrices orgánicas son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes compuestos de base (Miravete, et al. 2000).

La matriz, por su carácter aglomerante, rodea, protege y soporta al refuerzo –fibras, árido...- de las condiciones medioambientales y de los esfuerzos mecánicos. Las matrices de los morteros compuestos se pueden clasificar en termoestables y termoplásticos (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Matrices utilizadas para la fabricación de morteros poliméricos.

Conglomerantes orgánicos	
TERMOPLÁSTICOS	Polipropileno (PP) Policarbonatos (PC) Poliamida (PA) Poliésteres saturados (PET-PBC) Poliacetato Polisulfonato (PSUL) Poliéter-Éter Ketona (PEEK) Polímeros acrílicos Resinas celulósicas
TERMOENDURECIBLES/ TERMOESTABLES	Epoxi (EP) Viniléster (VE) Poliamidas (PI) Poliéster insaturado (UP) Fenólicas (PF)

Dentro del campo de la restauración de materiales pétreos, las matrices termoestables/termoplásticas más empleadas son las acrílicas, poliéster y epoxi, por lo que sólo vamos a considerar, a continuación, las características de éstas (Figura 5.3.).

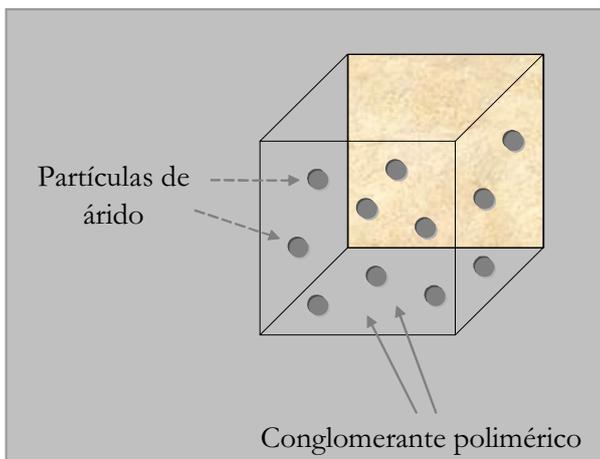


Figura 5.3.
Esquema de los componentes del mortero de matriz polimérica.

5.2.1.1.2.1. RESINAS TERMOPLÁSTICAS.

Las resinas termoplásticas, por su origen sintético, son aquellas que funden o reblandecen por calor y cuando se enfrían vuelven a su estado sólido sin que se produzcan cambios en su estructura química, por debajo de su punto de fusión (Rudolf, 1973).

Existen multitud de resinas termoplásticas clasificadas a partir de su naturaleza química, pero todas con una misma particularidad, son macromoléculas lineales.

La forma de presentarse este tipo de resinas termoplásticas es como disoluciones o dispersiones que, tras la fase de evaporación o absorción de la fase líquida se endurecen (Carbonell de Masy, 1993).

Uno de los materiales conglomerantes ensayado en esta tesis, pertenece a la familia de las resinas acrílicas. Se trata de un material termoplástico caracterizado éste por ser resultante de la polimerización del ácido acrílico, del ácido metacrílico y de sus derivados (Brusie, J.P. , 1964) (copolímero etilacrilato/metilmetacrilato, aportan flexibilidad y resistencia a tracción) (Figura 5.4.a-b). Las unidades monoméricas están enlazadas entre sí, formando cadenas lineales bidimensionales (doble enlace), lo que justifica que la sustancia sea soluble en disolventes orgánicos e inorgánicos. Secan por evaporación del disolvente y su peso molecular es de 30.000 y 100.000. Las principales ventajas que posee este tipo de polímeros son su elevada reversibilidad, elasticidad, y resistencia a determinadas sustancias químicas y a la acción de los rayos UV (De Witte, E., et al. 1977; Valle, A., et al. 1985).

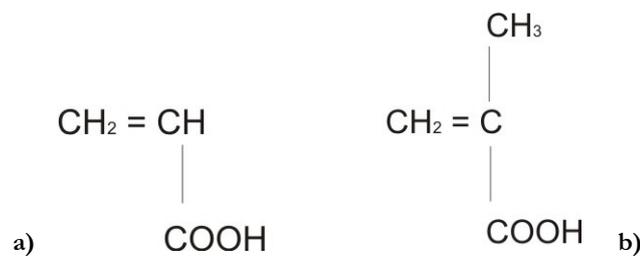


Figura 5.4. a-b. a) Ácido acrílico, b) ácido metacrílico.

5.2.1.1.2.2. RESINAS TERMOENDURECIBLES.

Las resinas termoendurecibles son aquellas que debido a un proceso de curado experimentan una transformación química y física irreversible, de manera que se hacen insolubles e infusibles. Comprenden, por un lado, polímeros de condensación y por otro, polímeros de adición, pero todos forman largas cadenas o redes tridimensionales. Es decir, a diferencia de las resinas termoplásticas, las resinas termoestables endurecen por reticulación de las macromoléculas

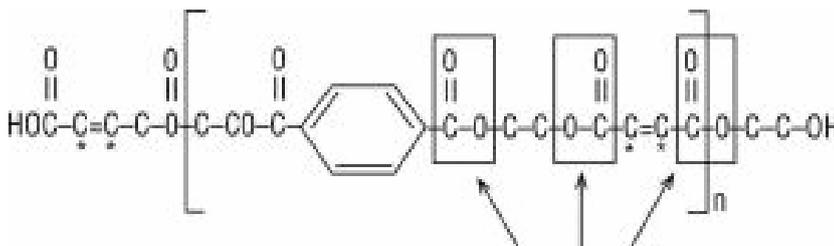
de monómeros que unidos mediante tres o más enlaces no son manipulables con altas temperaturas (Balart, et al. 2001).

Las matrices poliméricas termoestables reúnen una serie de características que, en general, son comunes a todas ellas:

- Viscosidad muy baja antes del curado.
- Estabilidad térmica.
- Resistencia química.
- Poca fluencia y relajación por tensión.
- Buena capacidad de preimpregnado.
- Facilidad de fabricación.
- Economía.

5.2.1.1.2.2.1. RESINAS DE POLIÉSTER.

Las resinas de poliéster son las más usadas en la industria, especialmente en la naval. Las más frecuentes son las insaturadas; de hecho, el término “resina de poliéster” se refiere generalmente a ellas. Hay una gran variedad de resinas de poliéster, compuestas de ácidos, glicoles y monómeros, cada una con propiedades diferentes. Las resinas de poliéster son resinas termoendurecibles caracterizadas porque en ellas los monómeros están unidos por enlaces químicos formando una red tridimensional (Figura 5.5).



* puntos reactivos n=3-6
 grupos éster

Figura 5.5. Esquema de una cadena de resina poliéster.

Las resinas de poliéster por sus características y obtención industrial dan lugar a un compuesto sólido que hay que disolver para obtener la fluidez suficiente que permita la mezcla/impregnación del refuerzo, por lo que se suministra disuelta en estireno, participante de la reticulación. Se adiciona también un iniciador y un catalizador que permiten que comience la reacción química de reticulación. Son muchos los tipos de resinas de poliéster que se comercializan (Tabla 5.9.) y que admiten muy diferentes aplicaciones. Existen los poliésteres saturados e insaturados, siendo éstos últimos los considerados por el sector de la restauración (Amoroso, G.G. et al. 1983).

Tabla 5.9. Tipos de resinas de poliéster y sus aplicaciones.

RESINAS DE POLIÉSTER	
TIPOS	APLICACIONES
Ortoftálicas	Semirrígidas: estratificados industriales...
	Rígidas: barnices, preimpregnados
Isoftálicas	Gel coats, depósitos, ingeniería química...
Tereftálicas	Estratificados con alta resistencia química...
Bisfenólicas	Aplicaciones anticorrosión...
Resistencia del ac. tetracloroftálico	Comportamiento al fuego mejorado. Ignífugas.

Los poliésteres insaturados, han sido definidos por Ramos Carpio (1988) como policondensados preparados a partir de una resina primaria lineal, obtenida por policondensación de un glicol con un ácido policarboxílico insaturado, que posteriormente se polimeriza con un monómero vinílico, con lo que se provoca una reticulación de las macromoléculas lineales a través de dos enlaces de los diácidos insaturados. Estos ácidos son el maléico y el furámico, o una mezcla de ambos, ya que, a la temperatura de la policondensación se produce una isomerización de uno en el otro. Como glicoles pueden usarse oligómeros del propilenglicol o bisfenos A; como agente reticulante se utiliza el estireno (Korshak, V. V., et al. 1965). La resina primaria suele ser líquida (peso molecular 1000 a 5000) y la polimerización con el estireno se produce a temperatura ordinaria según un mecanismo de

radicales libres, sin que se originen productos secundarios, en presencia de un catalizador. Para que el curado se realice a temperatura ambiente es necesario, además de este catalizador, la adición de un acelerador o un iniciador. Ahora bien, tanto si la polimerización se realiza en caliente o en frío en presencia de un acelerador, esta reacción produce calor, lo que denominamos “efecto exotérmico”.

Durante el proceso de endurecimiento de la resina de poliéster se pueden establecer varias etapas bien definidas:

- una primera fase líquida de la resina durante la cual se puede trabajar.

- una segunda fase, donde aumenta la viscosidad empezando el proceso de endurecimiento, lo que se conoce como tiempo de gel o solidificación.

- la última fase, el fraguado, se conoce como el tiempo de maduración o total endurecimiento del producto.

Las propiedades resultantes de los morteros compuestos realizados con las resinas de poliéster responden a:

- Buena trabajabilidad, baja viscosidad, dependiendo de la dosificación realizada.

- Tiempo de curado rápido, dependiendo de la cantidad de acelerador incorporado.

- Alta contracción de curado, dependiendo del porcentaje de carga agregada a la matriz.

- Posibilidad de curado tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas.

- Buena resistencia eléctrica, dependiendo del tipo de carga mezclada.

- Magnífica relación calidad/precio.

- Buenas propiedades del compuesto polimérico, aunque inferiores a los conseguidos con algunas otras resinas.

5.2.1.1.2.2.2. RESINAS EPOXI.

Las resinas epoxi son sistemas poliméricos que contienen dos componentes principales, que al combinarse resulta un material con unas propiedades de dureza, adhesividad y resistencia química muy elevadas.

Generalmente, la manera común de obtener la resina epoxi es la reacción de un gran número de moléculas de bisfenol A y epíclorohidrina, que da lugar a moléculas simples o a macromoléculas (Figura 5.6.). Si en la elaboración del producto hay pocas moléculas, el resultado será un producto líquido de baja viscosidad. Por el contrario, si la cantidad de moléculas unidas es muy elevado, el resultado será un producto sólido. Además, variando el peso molecular, la viscosidad, el tipo de endurecedor, etc. podemos conseguir una gama de polímeros epoxi con propiedades muy distintas, ello queda patente en la multitud de productos actualmente comercializados (Balart, et al. 2001).

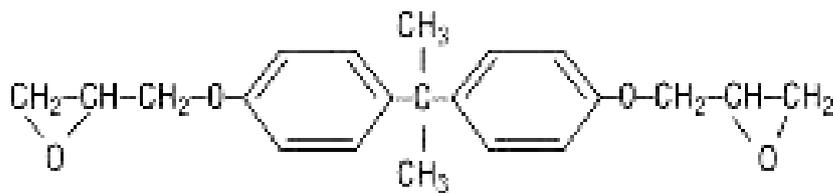


Figura 5.6. Modelo de cadena epoxídica.

Por otro lado, las resinas epoxi difieren de las resinas de poliéster por su alto costo económico, por sus inmejorables propiedades físico-químicas, por su gran capacidad para adherirse a la mayoría de las superficies, porque permiten unos niveles muy altos de refuerzo y porque exigen una preparación mucho más precisa durante su uso. Estos polímeros son menos inflamables y más tenaces que los otros considerados en esta sección al tener una alta capacidad de alargamiento.

Las propiedades resultantes de los morteros compuestos realizados con las resinas epoxi pueden resumirse del siguiente modo (Royuela, et al. 1978):

- Excelentes propiedades del mortero compuesto, en general.

-Buen comportamiento a temperaturas elevadas, hasta 180° C. No se funden con el calor, y si éste es elevado calcinan.

-Buena estabilidad y resistencia ante los agentes químicos y disolventes.

-Ausencia de compuestos volátiles durante el curado.

-Muy buenas propiedades eléctricas, dependiendo del tipo de carga mezclada.

-Buena adhesión.

-Largo tiempo de curado.

-Después de endurecer son irreversibles.

-Retracción nula en el curado y en el endurecimiento.

-Coste relativamente alto.

5.2.1.2. ÁRIDO/CARGA

Los áridos son otro de los constituyentes de los morteros, que pueden presentarse como pétreos naturales o artificiales.

El uso de las cargas en los morteros permite estabilizar el volumen de la dosificación, hacer de relleno y disminuir la retracción durante el endurecimiento del mortero.

Las cargas que se añaden a las matrices, pueden ser de dos tipos, reforzantes o no reforzantes. Las cargas reforzantes suelen tener forma esférica, huecas o macizas, para evitar las concentraciones de tensiones, ejemplo de ello son las partículas de vidrio, carbono, o poliméricas. Las no reforzantes, son de origen mineral e incorporadas a la mezcla en diferentes proporciones modifican las características del mortero en base a sus necesidades.

Estos áridos de origen mineral, además de proporcionar color y textura, deben ser químicamente inertes con el resto de componentes. El empleo de áridos contaminados puede producir alteraciones que afecten al estado final del mortero. Por ello, se aconseja utilizar áridos limpios, perdurables, duros y desprovistos de impurezas perjudiciales (minerales de arcilla, óxidos de hierro, sulfuros, sulfatos, cloruros, compuestos de magnesio, etc).

El árido, por tanto, va a ser el componente que condicione el comportamiento final del mortero. Desde el punto de vista de su morfología (lisa, vítrea, granuda, cristalina, cavernosa, porosa...) han de evitarse las formas planares de plaquetas y agujas porque influyen en la docilidad del mortero, las superficies lisas y redondeadas porque influirán en la adherencia con el aglomerante contrariamente a las superficies angulosas y rugosas que permiten una mejor acomodación y adherencia del mortero (Suárez, et al. 1994). Por otro lado, la granulometría y la distribución del tamaño del árido tienen que ser variada de forma que favorezca la compactación entre partículas. A mayor cantidad de granos finos menor será la resistencia y porosidad del mortero. Por último, el grado de porosidad del árido permitirá obtener morteros ligeros (porosidad árido alta) o altamente pesados (porosidad árido nula).

Otro de los rasgos que compete a los áridos se halla en la procedencia y naturaleza del mismo. Se distinguen entre áridos naturales (arenas y gravas procedentes de ríos y playas...), áridos de trituración o de machaqueo (obtenidos a partir de rocas naturales) y áridos artificiales (a partir de desechos industriales). En función de su naturaleza pueden ser agregados silíceos (arenas graníticas, de cuarzo tanto de ríos como de aluviones, también puzolanas y tobas volcánicas), agregados calcáreos (calizas, dolomías y materiales fosilíferos) agregados mixtos y otros agregados como arcillas, fragmentos de cerámica y restos de morteros reutilizados.

5.2.1.3. ADITIVOS/ADICIONES

Durante el amasado de un mortero o pasta, generalmente suele incorporarse unas sustancias que, en proporciones no superiores al 5%, producen una modificación en el mortero, en estado plástico o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento, mejorando la calidad de ejecución de la obra, la durabilidad y la resistencia a los agentes atmosféricos (UNE-83-200-84).

Son muchos los estudios que clasifican los diferentes aditivos en función de las modificaciones que aportan al mortero a que son incorporados (Venuat, 1972; Mascia, 1974; Sánchez, 1992; Miravete, et al. 2000; Cazalla, et al. 2003). M. Joissel propone una clasificación

“científica y lógica”, de acuerdo a aditivos insolubles en agua de amasado, aditivos solubles en agua de amasado, tensoactivos (ni completamente solubles ni totalmente insolubles y la mezcla de estos tres (Venuat, 1972). Otras veces, son los diferentes países los que establecen las listas clasificándolos según las propiedades que confieren al mortero fresco o endurecido, así existe una clasificación alemana, norteamericana, francesa...

La clasificación tomada de la RILEM (1967) se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 5.10. Tipos de aditivos.

Agentes que modifican la reología de los morteros
-reductores de agua
-inclusiones de aire
-reductores de agua y arrastre de aire
-polvos minerales finos plastificantes
-agentes floculantes o espesantes
-agentes de retención de agua
Agentes que modifican el aire ocluido en morteros
-inclusiones de aire
-desaireadores o antiespumantes
-generadores de gases
-generadores de espuma
Agentes que modifican el fraguado y el endurecimiento
-retardadores del fraguado
-aceleradores del fraguado
-aceleradores del endurecimiento
Agentes generadores de expansión en morteros
Agentes que mejoran las resistencias a las acciones físicas
-mejorando las resistencias a las heladas
-mejorando la resistencia a la congelación (anticongelantes)
-reduciendo la penetrabilidad por el agua
-hidrófugos
Agentes que mejoran la resistencia a las acciones mecánicas
Agentes que mejoran la resistencia a las acciones químicas
Agentes que mejoran la resistencia a las acciones biológicas
Agentes que modifican el color del mortero

Con la aparición de los plásticos, los morteros de matriz polimérica también precisan de una serie de adiciones/aditivos que mejoren sus cualidades. L. Mascia (1974) plantea la clasificación de los aditivos para plásticos en función de:

Tabla 5.11.

Aditivos que concurren en el proceso
-estabilizadores del proceso
-lubricantes: internos/externos
-ayudantes del proceso y acelerantes del flujo
-agentes tixotrópicos
Aditivos que modifican las propiedades mecánicas de volumen
-plastificantes o flexibilizantes
-relleno de reforzamiento
-agentes de resistencia
Aditivos usados para reducir los costos de formulación
-relleno de reforzamiento
-diluentes y diluyentes
Modificadores de las propiedades de superficie
-agentes antiestáticos
-aditivos de deslizamiento
-aditivos anti-desgaste
-aditivos anti-bloqueo
-aceleradores de adhesión
Modificadores de las propiedades ópticas
-colorantes y tintes
-nucleadores
Aditivos antienviejimiento
-antioxidantes
-estabilizadores ultravioleta
-fungicidas
Otros
-agentes fumantes
-pirorretardantes

La elección de uno u otro vendrá determinada por las cualidades exigidas en la puesta en obra y en la finalidad que desempeñe el mortero en su entorno.

5.2.1.4. DISOLVENTE/DILUYENTE.

El disolvente/diluyente dependerá del tipo de mortero orgánico o inorgánico empleado. Para el caso de los morteros de matriz polimérica, el solvente vendrá combinado con la resina que forma el conglomerante, mientras que para los morteros inorgánicos (cal, yeso...) el disolvente por excelencia será el agua.

El agua empleada para la fabricación del mortero debe ser limpia y sin partículas contaminantes. Se emplearían, por tanto, aguas destiladas, desionizadas o, en el caso de aguas marinas, de ríos o embalses se prestará atención a los contenidos de impurezas y sales.

5.2.2. DOSIFICACIONES

El término dosificación define la proporción en volumen o en masa de los diferentes materiales que componen el mortero (aglomerante/árido/aditivo/solvente) y, va a depender, de la finalidad del mortero, de su composición y de la resistencia mínima deseada (Renison, 2000).

Generalmente la dosificación viene expresada como la razón entre el aglomerante y el árido. En la mayoría de los casos, se tiende a que esta relación sea baja en cuanto a la cantidad de aglomerante (Ashurt, 1990). Normalmente, en morteros tradicionales (cal:arena), la más frecuente es (1:3) (Malinoswki, 1981; Sbordonni-Mora, 1981; Carrington, et al. 1995), aunque también se ha utilizado (1:2) y (1:10). En cambio, en morteros de matriz polimérica las dosificaciones son más dispares, desde (1:0,5) hasta (1:8) (Lazzarini, et al. 1986; Weber, et al. 1990; Carboney de Masy, 1993; Roig, 1995; Godos, 1996; Fernández, 1999; Galán, 2001; Mas, 2004).

5.3. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS COMPUESTOS

5.3.1. MORTEROS COMPUESTOS INORGÁNICOS:

5.3.1.1. Morteros de cal.

Como se ha comentado anteriormente, durante la evaporación del agua de una pasta de cal, se produce un proceso de contracción que da lugar a la aparición de grietas y fisuras. La adición de una arena/árido a la pasta reducirá el nivel de retracción dando lugar al mortero. Así, si se añade poca arena la retracción será elevada y si se añade mucha se reducirá la plasticidad y resistencia (Arredondo y Verdú, 1991).

La cal empleada en los morteros puede ser aérea o hidráulica, siendo en ésta última más resistente y pudiendo endurecer bajo el agua.

Los morteros de cal más utilizados son los 1:2 y 1:3, aunque también se conocen los 1:4, 1:6 (cal:arena), 1:2:8, 1:1:6 (cemento:cal:arena) y 1/3:2:3 (yeso:cal:arena) (Arredondo y Verdú, 1991).

Propiedades de los morteros de cal:

- Fácil trabajabilidad y elevada plasticidad del mortero fresco.
- Resistencias mecánicas bajas.
- Ausencia de sales solubles y álcalis.
- Proceso de fraguado y endurecimiento lento.
- Buena adherencia entre el mortero y las piezas.
- Buena durabilidad del mortero tras la carbonatación.
- Baja resistencia a las heladas.
- El endurecimiento se produce de modo progresivo del exterior hacia el interior, “proceso exógeno”.
- Permeabilidad al vapor de agua y al agua líquida.
- Reversibilidad.

5.3.1.2. Morteros de yeso.

El yeso se ha utilizado desde la antigüedad en obras de muy diversa naturaleza, como revocos, estucos, guarnecidos... En la mayoría de los casos, el yeso se viene preparando mediante un amasado con agua

pero, técnicamente es posible mezclarlo con áridos para la obtención de morteros.

No obstante, las propiedades de estos morteros resultantes son distintas a la de los yesos sin áridos. El tamaño de partícula de árido empleado influirá en la cantidad de agua de amasado (porosidad, tiempos de fraguado y resistencias mecánicas).

Las obras realizadas en la antigüedad en zonas de clima templado, no húmedo, demuestran el éxito del empleo del yeso, por la estabilidad del sulfato de calcio dihidrato.

El endurecimiento se produce de modo progresivo del interior hacia el exterior, se trata de un “proceso endógeno”.

Por otro lado, el yeso, coloreado o no, así como los yesos lentos a base de anhidritas, han sido utilizados en exteriores habiéndoles incorporado una serie de aditivos tales como leche desnatada –caseína-, colas...

Además, a lo largo del siglo XVIII, se empleó el yeso en construcciones de fachadas imitando la piedra y los ladrillos, para lo cual se pintaba el yeso para asegurar su perdurabilidad.

5.3.1.2.1. MORTEROS DE YESO Y CAL “MORTERO MIXTO O BASTARDO”.

Las mezclas de yeso con cales hidráulicas o cementos en presencia de agua, da lugar a un compuesto altamente expansivo al reaccionar dicho yeso con los aluminatos, la conocida, ettringita:

En una primera etapa ($3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 31-32\text{H}_2\text{O}$ <> trisulfato de calcio, aluminato tricálcico hidratado con 31-32 moléculas de agua).

Posteriormente, en determinados casos de morteros hechos con áridos impurificados con materiales arcillosos, resulta la thaumasita:

($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ <> carbonato de calcio, sulfato de calcio, silicato de calcio con 15 moléculas de agua de constitución).

La combinación de yeso y cal aérea para fabricar morteros ha demostrado propiedades muy aprovechables. Existen testimonios de este tipo de morteros en París y Versalles (s. XVIII) con una adición del 15% de cal apagada para endurecerlo.

Esta técnica del bastardeo, es decir, el mortero resultante de la mezcla de cal-yeso, hoy es una técnica casi olvidada. Se obtiene al mezclar en un mortero de cal, momentos antes de su utilización otra mezcla de yeso en pasta, dependiendo de la fluidez del mortero requerido.

Una formulación típica de mortero de yeso-cal es la siguiente (espesor mínimo 8 mm):

- yeso 40 kg.
- cal apagada 6 kg. (15% sobre el yeso).
- arena 30 kg.
- agua 25 litros.

Otra dosificación del mortero de cal y yeso solía ser de una parte de cal, tres de arena y una parte de yeso, al que se le podía añadir una cierta cantidad de pelote. En este caso se denominaba mortero trabadillo, o sea, un mortero compuesto de matriz inorgánica y refuerzo de fibras inorgánicas.

Como expone Gárate, la adición de la cal apagada, que ha estado en contacto con el aire, favorece al yeso en el endurecimiento del mortero por la carbonatación que experimenta en el transcurso del tiempo. Así, dicha carbonatación se ve reforzada por la mayor porosidad del mortero, debido a la presencia de arena.

Este proceso de carbonatación permite que el mortero se haga cada vez más estanco, al mismo tiempo que posea suficiente porosidad para permitir la evaporación del vapor de agua, es decir, el mortero “respira” (Gárate Rojas, 1999).

Según Turco, la formulación para morteros de construcción y revocos: yeso 1 parte, cal 2 a 3 partes más árido o sin él, explica la ventaja

de esta unión yeso-cal porque se consigue una mayor y rápida adherencia del mortero al soporte y una mayor dureza del conjunto por la transformación en carbonato por la acción del dióxido de carbono del aire. También especifica la proporción cuando estos materiales se usan para realizar elementos ornamentales o decorativos: yeso 6 partes y cal 1 parte. Para aumentar la dureza de dicho mortero se puede añadir una solución de gelatina, goma arábiga o emulsión de cera dotando a la mezcla de uniformidad y plasticidad.

Por otra parte, y debido a la cal hace que el combinado yeso/cal del mortero posea un $\text{pH} > 7$ evitando enmohecimientos, presencia de hongos, manchas, etc.

Otros casos estudiados en edificios de Madrid (siglos XIX principios XX), confirman la presencia de morteros a base de calcita (CaSO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y arena silíceas, en proporciones 15-20 %, 70-65 % y 15 %. Esto supone la presencia de un 13 % al 15 % de cal apagada, 70 % de yeso hemihidratado y 17 % de arena en el mortero original.

Es importante señalar que, en este tipo de morteros el tipo y cantidad de árido juega un papel esencial. La partícula idónea es la que presenta una forma angulosa y dependiendo de si disminuimos o aumentamos en exceso la cantidad de árido, el mortero resultante experimentará una retracción y/o agrietamiento o bien, perderá su trabajabilidad y ductilidad.

El empleo del mortero bastardo de cal y yeso, llamado de trabadillo, resulta muy importante en restauración de monumentos porque es frecuente actuar en viejos muros y obras de arte cuyas juntas de los elementos compositivos y de las fábricas, presentan notables faltas de sus morteros o fragmentos originales, tal vez, debido a alteraciones físicas, químicas o biológicas o de mala calidad del mismo. La reintegración con mortero de cal de esas lesiones –grietas, fisuras...- no permitirían que fueran rellenadas de una sola intervención, si fuesen profundas. La correcta aplicación de la masa del mortero de cal se efectuaría en capas que no deberían de superar los tres centímetros de espesor. Tras esperar la carbonatación superficial se aplicaría la siguiente capa. Esto supondría varios meses de trabajo. Por tanto, el empleo del mortero bastardo de yeso-cal dinamizará la trabajabilidad debido al rápido endurecimiento del yeso en contraste al lento de la cal.

Resulta muy interesante la experiencia que Ignacio Gárate describe sobre los morteros bastardos de cal y yeso. El trabajo se desarrolla en dos Museos: la Casa-Museo de el Greco en Toledo y el Museo Romántico de Madrid (Gárate Rojas, 1999). El objetivo era obtener un mortero de cal y yeso, más el árido, recuperando la técnica artesanal perdida. Los materiales empleados: yesos especiales de odontología del fabricante “Herbor Española”, carbonato de calcio, cal aérea y árido. La dosificación del mortero yeso-cal:

- yesos 3 partes.
- carbonato de calcio 1 parte.
- cal aérea 1 parte.
- árido 2 partes.

*El yeso utilizado por Gárate es una mezcla de yesos α y β , el β es un tipo de yeso cerámico utilizado por los moldeadores de cerámica. Fabrican el yeso β partiendo de los yesos de Guadalajara. La proporción es 60% de yeso β con 30% de yeso α . (La denominación comercial es “Alamo 70” sin aditivos). La mezcla de α y β dan un producto sumamente duro.

*El CO_3Ca utilizado es el convencional presentado en polvo para obtener, por ejemplo trabajabilidad.

*La cal aérea es hidróxido de calcio comercial. El hidróxido de calcio formado tras el apagado de la cal viva se carbonatará y añadirá mayor dureza al revestimiento, la elasticidad del conjunto eliminará figuraciones y otros problemas.

*El árido será de 0,3 mm. máximo y se mezclará con otros de 0,1 a 0,3 mm.

Finalmente, en estos morteros mixtos, la adición de yeso ayuda a acelerar el fraguado del mortero resultante, al igual que incrementa su dureza. Su empleo no está contemplado en la normativa vigente (Prado y Guerra, 1962; Barahona, 1992).

5.3.1.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MORTEROS DE MATRIZ INORGÁNICA.

Los morteros, tanto en estado plástico como endurecido, poseen una serie de propiedades para cubrir las tareas funcionales a las que van a ser sometidos en las diferentes operaciones.

Propiedades genéricas:

- Consistencia, plasticidad y capacidad de retención de agua de la masa plástica.
- Adherencia como resistencia al “despegue”.
- Resistencia al hielo limitada en tiempo frío, y retracción por secado limitada en tiempo caluroso. Durabilidad.
- Trabajabilidad.

Ventajas

- La mezcla de cal-yeso se adhiere mejor a cualquier soporte, que los materiales por separado.
- Rápida capacidad de cubrición, lenta carbonatación de la cal, progresivo endurecimiento.
- Los morteros pueden ser coloreados en masa o en superficie.
- El yeso tiene un coeficiente de retracción igual a cero.
- La cal grasa aporta una gran plasticidad a las pastas y morteros.

Inconvenientes

- El yeso y la cal en si no son excesivamente adherentes.
- En exteriores deben de estar protegidos de las aguas capilares y goteras.
- Estos morteros no sirven para muros con altos contenidos de humedad.
- El yeso ataca al acero y al hierro en presencia de humedad.
- La cal hace descender los colores y el yeso los sube.
- La cal tiene un elevado coeficiente de retracción.

5.3.2. MORTEROS COMPUESTOS ORGÁNICOS.

El empleo de este tipo de conglomerantes poliméricos permite la combinación de un conjunto de productos – cargas, aditivos...-que mezclados a partir de una correcta dosificación dan morteros compuestos con una cualidades muy superiores a las que podrían poseer por si solos.

El avance desarrollado en este campo de los polímeros en los últimos 50 años, permite un amplio abanico de posibilidades de uso en actividades, que en un principio quedaban reservadas a ingeniería aeroespacial y militar, y que actualmente lo abarca todo, más concretamente en trabajos de arquitectura, reposición de fragmentos, reproducción de elementos perdidos, ...

Una mezcla típica en morteros de resina epoxy es (Helmut, et al. 1990):

- 192 partes de resina epoxy
- 29 partes del catalizador
- 549 partes de arena de cuarzo
- 233 partes de polvo de cuarzo

5.3.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MORTEROS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

Las propiedades de los materiales compuestos, en general, dependen de la naturaleza de la resina, de la naturaleza del refuerzo elegido, de su presentación, así como de la elección del método de fabricación. Las propiedades que se desprenden de su estructura química y de la presencia del refuerzo son:

- Anisotropía más o menos marcada según el tipo de refuerzo.
- Baja densidad.
- Características físicas y mecánicas en función de cada uno de los constituyentes y de sus respectivas proporciones.
- Gran resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- Propiedades mecánicas elevadas.
- Posibilidad de realizar formas complejas.
- Buenas propiedades eléctricas.

Ventajas

-Ligereza, economía y facilidad de transporte, facilidad de manipulación y montaje, así como una elevada reducción de las cargas.

-Excelente comportamiento ante la corrosión ambiental.

-Elevadas propiedades mecánicas a tracción, compresión, flexión, cortante e impacto.

-Moldeabilidad de formas complejas para una fácil reproducción de elementos constructivos, escultórico-ornamentales.

-Moldeo de grandes piezas de difícil ejecución con materiales tradicionales.

-Son materiales autolimpiables por la lluvia, muy recomendables para elementos exteriores.

-Numeroso acabados, translucidez, opacidad, mates, rugosos, satinados...

-Resistentes al fuego y de baja inflamabilidad.

-Baja conductividad térmica, ideales para aislamiento eléctrico.

-Coloración en masa, al pigmentarse en el proceso de fabricación.

-Inerte al agua y a los agentes químicos.

-No son nocivos.

-Son materiales seguros y estables.

Desventajas

-Coste elevado.

-Falta de reglamentación de uso o normativa técnica.

-Falta de información sobre su durabilidad.

-Baja resistencia al calor.

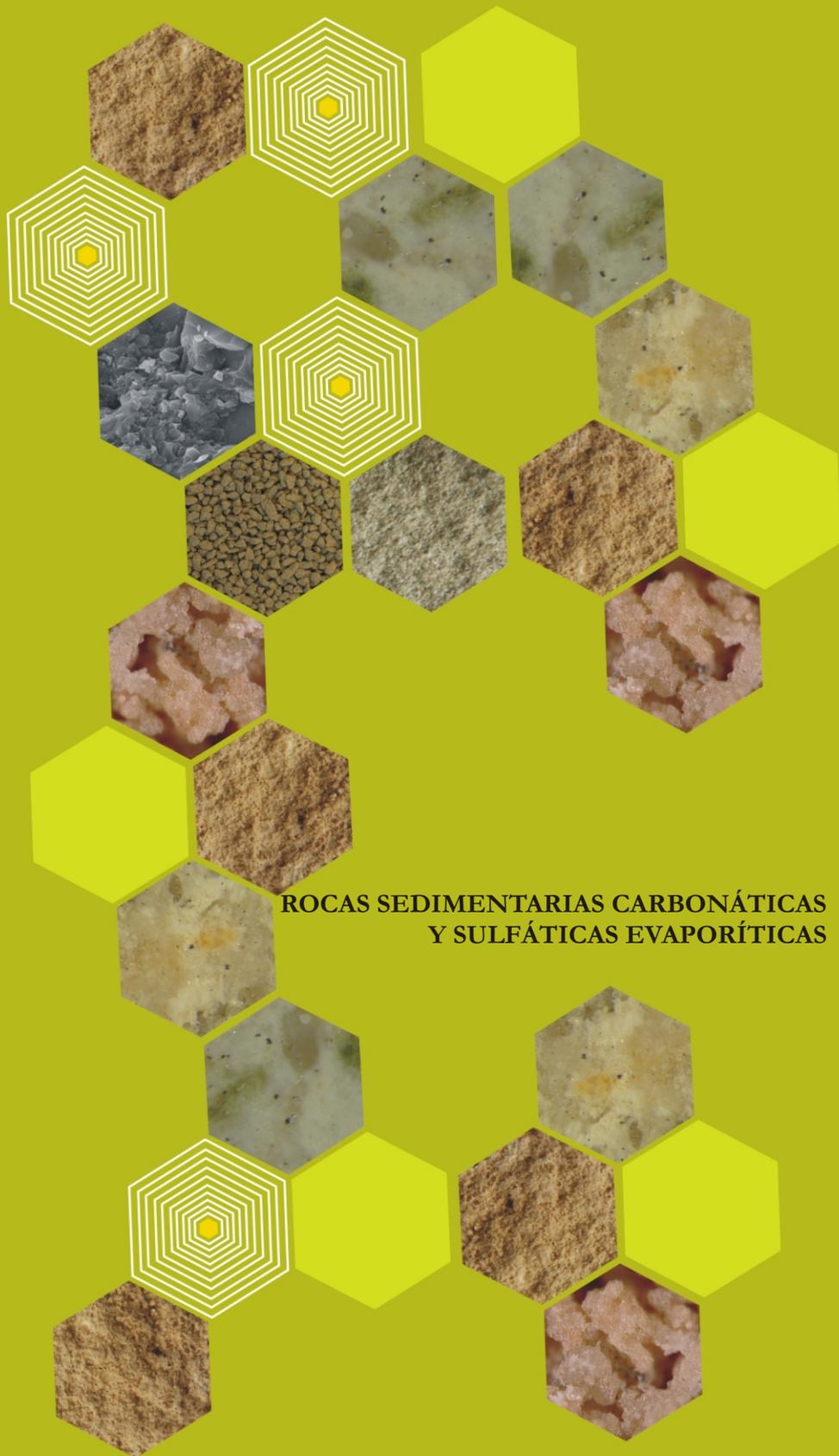
-Mal comportamiento ante los rayos UV.

-Falta de clasificación al fuego.

-Son materiales de difícil reciclaje.

-Falta de mentalización entre usuarios y técnicos.

-Conservadurismo tradicional.



**ROCAS SEDIMENTARIAS CARBONÁTICAS
Y SULFÁTICAS EVAPORÍTICAS**

6. LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CARBONÁTICAS Y SULFÁTICAS-EVAPORÍTICAS.

6.1. Tipología y caracterización.

El objetivo del presente apartado es definir desde el punto de vista petrológico, los mecanismos de formación, clasificaciones y características de las rocas sedimentarias carbonáticas, fundamentalmente las calizas, y las rocas sulfáticas-evaporíticas, o sea, el yeso, de manera que entendamos la procedencia de la materia prima, base de los conglomerantes, que más tarde desarrollaremos en la fase experimental de esta tesis doctoral.

También nos permitirá conocer las compatibilidades que existen entre los morteros experimentados y el tipo de piedra elegida en esta investigación “Tosca de Rocafort” (Valencia) y la “Bateig Crema” (Novelda, Alicante)

Las rocas desde la Antigüedad constituyen uno de los primeros materiales que emplearon nuestros más remotos antecesores al ocupar todo el entorno y caracterizar el paisaje. Está documentado que en los lugares rocosos, la evolución cultural fue diferente a la que se produjo en los grandes llanos de los ríos (Schumann, 1987).

Las rocas se encuentran en la Naturaleza, en la corteza terrestre, constituidas por la combinación de distintos minerales, los cuales se originan a partir de los elementos geoquímicos y sus asociaciones. Los distintos tipos de rocas son el resultado de los diferentes procesos, tanto exógenos como endógenos, que las han formado, y que condicionan su composición, características y propiedades. Por tanto, estos tipos de rocas se forman en función de los minerales que presentan y su modo de agregado (textura), incluyendo los espacios vacíos de poros y grietas.

Así pues, la composición mineralógica es el principal carácter que define a un tipo de roca, aunque también pueden clasificarse atendiendo a criterios tales como el origen, la composición y la textura (Velilla Sánchez, 2003).

Es común, para facilitar el estudio de los diferentes tipos de rocas, clasificarlas en tres grandes grupos de acuerdo a su génesis, resultando las rocas ígneas, las metamórficas y las sedimentarias.

Las rocas ígneas, del latín “ignis” (fuego), también llamadas rocas magmáticas, volcánicas, eruptivas o primarias, son las primeras rocas formadas por la solidificación de un fundido silicatado que se ha enfriado y cristalizado en zonas profundas originando las rocas plutónicas, en zonas próximas a la superficie resultando las rocas filoneas y en la superficie terrestre dando lugar a las rocas volcánicas o efusivas. Ejemplo de ello, granito, sienita, diorita, piedra pómez, basalto...

Las rocas metamórficas, del griego “meta” (cambio), son las derivadas de la transformación de rocas preexistentes, magmáticas o sedimentarias, que han sufrido una serie de cambios mineralógicos y/o texturales en el interior de la corteza terrestre por la acción de fuertes y elevados cambios de presión y temperatura o a esfuerzos de deformación. La clasificación de las rocas metamórficas atiende, generalmente, a la composición mineral y la textura, pero también se considera, el origen de la roca preexistente y/o el tipo de metamorfismo, bien sea, regional, de contacto o dinámico. Ejemplo de ello, los mármoles, las serpentinas y las pizarras.

Centrándonos en las rocas sedimentarias propiamente dichas, del latín “sedimentum” (asentamiento), su ciclo de formación comienza, en la mayor parte de los casos, con la transformación de una roca preexistente, ya sea ígnea, metamórfica o sedimentaria, en detrito, como

consecuencia de los procesos de hipergénesis (meteorización y alteración química y biológica de la roca) y continúa con su transporte y sedimentación en una cuenca sedimentaria, formando el sedimento. Finalmente y mediante la actuación de los procesos de litificación (compactación del sedimento, reducción de la porosidad, cementación, diagénesis y metasomatismo) el sedimento se transforma en roca, en respuesta al reajuste de las condiciones ambientales durante el enterramiento. Sin embargo, existen otros tipos de rocas sedimentarias cuya génesis no necesita de la formación de un detrimento ni de un posterior transporte, unas son rocas con un origen orgánico (formadas por restos o acumulaciones de organismos) y otras, -que son las que nos atañen-, originadas por precipitación química a partir de soluciones acuosas (Benito Soria, 1996).

Las rocas de precipitación química se forman por la precipitación de sustancias orgánicas o inorgánicas (sales como cloruros, bromuros, sulfuros, carbonatos, óxidos...) que se encuentran disueltas en el agua de la cuenca de sedimentación (lagos, mares, ríos) debido a diversas circunstancias como saturación por evaporación del agua, cambios de temperatura, presión, pH...

De entre las rocas que forman el grupo de las químicas y que nos incumben para el desarrollo de esta tesis, podríamos citar las rocas carbonáticas, por un lado, y las rocas evaporíticas-sulfatadas, por otro, aunque existen otras como las silíceas inorgánicas, las fosfáticas, y los depósitos de hierro y magnesio.

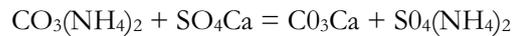
Por tanto, estos dos tipos de rocas nos competen desde dos puntos de vista, uno, como materia prima en la obtención y puesta en obra de conglomerantes para morteros, y dos, como material de fábrica y talla de monumentos, en cuanto a las carbonáticas se refiere.

Si las rocas sedimentarias ocupan aproximadamente el 75% de la superficie terrestre, las rocas carbonáticas la constituyen en la quinta parte, es decir, rocas que aún teniendo componentes poligénicos, tienen un carácter geoquímico mayoritario afín y definitorio, desde las épocas geológicas del Precámbrico hasta nuestros días (Wilson, 1975).

Las rocas carbonáticas están formadas por precipitación química y/o bioquímica de carbonatos, siendo el carbonato cálcico (CaCO_3) el más abundante y el magnésico el de menor proporción.



En otras ocasiones puede ocurrir que el carbonato cálcico se forme a partir de un carbonato de amonio combinado con un sulfato de calcio.



La roca caliza es un tipo de variedad masiva, procedente de la descomposición de los bicarbonatos, que por volatilización del anhídrido carbónico se convierten en carbonatos insolubles. Compuesta mayoritariamente por calcita (CaCO_3), el proceso de formación es lento y tiene lugar en aquellos ambientes marinos o lacustres donde se depositen en capas los carbonatos que hay en el agua, en forma de mineral, restos de organismos fósiles o la combinación de ambos. Su resistencia mecánica no supera los 500 Kg/cm^2 , sin embargo, se considera idónea para su uso en construcción, dependiendo su valor del tipo de porosidad, de los minerales y del tamaño de cristales. Tiene una dureza aproximada de 4 en la escala de Mohs, ello la convierte en una roca blanda y trabajable, aunque poco resistente a los ácidos, a la abrasión y a los agentes atmosféricos. El color se debe a la tinción de los óxidos y/o inclusiones de materia orgánica en su entorno.

Además, las rocas calizas, más o menos puras, a temperaturas de cocción de 900°C , se descomponen dando lugar a la cal viva, la cual está compuesta fundamentalmente por óxido de calcio (CaO).

Por otro lado, las dolomías están compuestas mayoritariamente por dolomita, o sea, carbonato cálcico y magnésico $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, y es característica la ausencia de fósiles. Se distingue de la caliza porque en presencia de ácido clorhídrico diluido en frío no le produce efervescencia, aunque sí en caliente. Posee un estructura granular que le confiere unas buenas cualidades para ser utilizada en construcción, incluso cuando le ataca la humedad y las atmósferas ácidas.

La clasificación de las rocas carbonáticas ha sido estudiadas por diversos autores (Grabau, 1904-1913; Cayeux, 1935; Krynine, 1948; Twenhofel, 1950; Johnson, 1951; Pettijohn, 1957; Bramkamp y

Powers, 1958) siendo la de Dunham (1962) y Folk (1959, 1962) la más utilizada y aceptada internacionalmente.

El criterio principal de la clasificación de Dunham es la textura deposicional original y la proporción de matriz micrítica a aloquímicos. Por otro lado, la clasificación de Folk contempla, además, de la proporción de ortoquímicos y/o aloquímicos, la proporción relativa entre los cuatro tipos de aloquímicos (fósiles o bioclastos, pellets, oolitos y ooides e intraclastos).

A partir de las premisas de clasificación antes citadas, podríamos agrupar las rocas carbonatadas atendiendo a su génesis, a su composición y/o a su textura (Gisbert Aguilar, J. et al., 2001) (Ver Tabla 6.1.).

Por su génesis se podrían dividir en autóctonas (formadas por acumulación directa de los precipitados carbonáticos), alóctonas (las partículas carbonáticas han sufrido cierto transporte con anterioridad a su precipitación) y recristalizadas (la roca ha perdido su textura original por recristalización de las partículas primarias).

De las autóctonas, existen dos tipos fundamentales, las calizas, que se clasifican según la cantidad y tipo de resto fósil presente y, los travertinos, que son carbonatos bandeados muy porosos de origen continental. Del primer tipo destacaremos, la caliza micrítica (tiene muy pocos restos fósiles), la caliza fosilífera (posee abundantes restos fósiles) y la caliza recifal (contiene numerosos corales entrelazados entre sí). De los travertinos destacaremos, las tobas travertínicas (con porosidades elevadísimas y frecuentes moldes de tallos vegetales) y los travertinos de caverna (menos porosos y con finos bandeados de colores vivos de gran valor ornamental). A este grupo de los travertinos pertenece una de las dos piedras a tratar en la tesis, la conocida Tosca de Rocafort, denominada genéricamente Piedra de Godella (Valencia) (Latorre Llorens, F., 1992).

Las alóctonas pueden describirse basándose en su tamaño de grano, las calcirruditas (intraclastos > 2 mm), las calcarenitas (intraclastos de 2 a 1/16 mm) y las calcilutitas (intraclastos < 1/16 mm), las de grano más fino constituyen las calizas litográficas. A este grupo pertenece el segundo tipo de piedra a tratar en esta investigación, la biocalcarenita de Novelda, conocida como Piedra de Bateig (Alicante).

Y por último, las rocas carbonatadas recristalizadas, que se describen haciendo referencia a la composición, tamaño y relaciones intercrystalinas.

Asimismo, y por su composición, podríamos clasificar las rocas carbonatadas en calizas puras (más del 95% de calcita), en calizas dolomíticas (5-40% de dolomita), en dolomías calcáreas (40-90% de dolomita) y en dolomías (más del 90% de dolomita).

También, y desde el punto de vista de la textura, las rocas carbonatadas poseen tres tipos de componentes, terrígenos (partículas de composición silicatada, inferiores al 50% en las rocas carbonáticas), aloquímicos (partículas carbonáticas de tamaño superior a 0,02 mm) y ortoquímicos (partículas que ocupan el espacio existente entre los terrígenos y los aloquímicos).

Al mismo tiempo, los aloquímicos, por su naturaleza, pueden distinguirse en fósiles y/o bioclastos (restos de esqueletos de seres vivos de composición carbonática – conchas de moluscos, de foraminíferos, fragmentos de corales, equinoideos...), en oolitos (partículas esféricas de estructura concéntrica y nucleadas por otra partícula, ya sea terrígeno o aloquímico), en pellets (agregados elípticos de fango micrítico originado por las heces fecales de organismos comedores de fango) y en intraclastos (agregados irregulares de sedimentos carbonático semiconsolidado y retrabajado, así como fragmento de fósiles rotos y redondeados por el transporte).

Por último, en los ortoquímicos podrían distinguirse la micrita (partículas de carbonato con tamaño cristalino inferior a 0,02 mm) y la esparita (cristales de carbonato de tamaño cristalino superior a 0,02 mm). Ésta última, a su vez, se clasificaría en microesparita (0,02-0,06 mm), esparita (0,06-0,25 mm), esparita gruesa (0,25-1 mm) y macroesparita (>1 mm).

Finalmente, el esqueleto de las rocas carbonáticas estaría formado por las partículas de terrígenos y/o aloquímicos, la matriz estaría formada por la micrita o dolomicrita y el cemento constituido por la esparita.

Tabla 6.1. Clasificación de las rocas carbonáticas.

ROCAS CARBONÁTICAS	Por su génesis	Autóctonas	Calizas	Micrítica	
				Fosilífera	
				Recifal	
				Tobas travertínicas	
		Travertinos	Travertinos de caverna		
				Calcirruditas	
				Calcarenitas	
	Alóctonas		Calculutitas		
			Litográficas		
		Recristalizadas o metasomáticas			
	Por su composición	Calizas			
		Calizas-dolomíticas			
		Dolomías- calcáreas			
		Dolomías			
	Por su textura	Terrígenos (menos del 50%).			
Aloquímico		Fósiles o bioclastos	ESQUELETO		
		Pelets			
		Oolitos y ooides			
		Intraclastos			
Ortoquímico		Micrita	MATRIZ		
		Dolomicrita			
		Esparita	Microesparita	CEMENTO	
			Esparita		
			Esparita gruesa		
	Macroesparita				

Paralelamente, y respecto a las rocas sulfáticas-evaporíticas, son rocas que se han formado como consecuencia de la evaporación del agua cargada de sales disueltas, tanto en ambiente marino como en continental. Se incluyen en este apartado todas las rocas compuestas a partir de yeso.

La roca llamada piedra de yeso o aljez, se encuentra frecuentemente en la naturaleza, y está formada por sulfato cálcico dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de color generalmente blanco y dureza 2 en la escala de Mohs. Esta roca es la única materia prima para la fabricación del yeso y se obtiene por deshidratación parcial de dicha roca que, sometida a temperatura no mayor de 170°C , pierde molécula y media de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), formando el sulfato cálcico hemihidrato. Se obtiene así el yeso cocido o deshidratado (CaSO_4), el cual amasado con agua, una vez pulverizado, se rehidrata formando de nuevo el dihidrato. Su verdadera importancia radica en que constituye la materia prima para la fabricación de aglomerantes como el yeso, la escayola... (Arredondo, F., 1991).

Entre las variedades que se conocen cabría citar, el yeso laminar (presenta una formación casi transparente, dura y muy pura), el yeso fibroso (formada por fibras cristalinas muy puras con aspecto sedoso), el yeso sacaroideo (aspecto cristalino semejante al azúcar), el alabastro (presencia de grano muy fino, compacto y traslúcido, empleándose para ornamentación y trabajos de escultura), la anhidrita (sulfato cálcico anhidro, roca blanca y/o grisácea en la que apenas se reconoce la cristalización)...

6.2. Materiales pétreos empleados.

En este apartado se definen los materiales pétreos empleados en el desarrollo de esta Tesis Doctoral como material de carga, es decir, el material pétreo micronizado constituyente de los morteros compuestos a estudio.

Con esta investigación se pretende establecer una metodología sistemática de intervención directa, para la Conservación y Restauración del Patrimonio Artístico (elementos escultóricos, arquitectónico-ornamentales) realizados con piedra Tosca de Rocafort (genéricamente “Pedra de Godella”) y piedra Bateig (“Pedra de Novelda”).

La intervención está basada en el empleo de los morteros compuestos resultantes de los micronizados de los dos materiales pétreos anteriormente citados y, diferentes conglomerantes, bien de tipo hídrico y/o de resinas sintéticas.

Estos materiales pétreos cuya presencia en la Comunidad Valenciana y, en especial en la ciudad de Valencia, es muy importante (Catedral, Lonja, Torres de Serranos, conjuntos escultóricos, por ejemplo homenaje a Teodoro Llorente, etc.), están sufriendo un importante deterioro causado por las alteraciones de tipo físico-mecánico, químico y biológico, sin perder de vista las de carácter antrópico.

6.2.1. TOSCA DE ROCAFORT.

La piedra Tosca de Rocafort se define, desde el punto de vista petrológico, como una roca sedimentaria carbonatada de la familia de las calizas, que posee una estructura travertínica característica a esta otra denominada caliza de Godella (Alonso, 1986). La piedra Tosca de Rocafort, ha sido denominada históricamente piedra de Godella debido a la vecindad entre ambos términos y porque Rocafort, señorío adscrito a la Batlía de Moncada, desdibujaba los lindes de su territorio. La existencia en Godella de otras canteras contribuyó a que se tomara el topónimo de Godella como zona de origen, incluso actualmente, se la denomina “pedra picada de Godella”.

Situada en el término de Rocafort, (Mapa Geológico Nacional, hoja 696, Burjassot, E. 1:50000) sus frentes se emplazan por varios puntos del término, desde el actual casco urbano hasta la urbanización de Santa Bárbara. En ésta se encuentra la Pedrera del Badall, (actualmente

en los terrenos del Club de Campo) una de las partidas más históricas y “de la que salió la piedra con la que se edificaron el Miguelete, las torres de Serranos (Martínez, et al.) y la mayor parte de las edificaciones públicas antiguas de Valencia...”. Cronológicamente, las canteras de Rocafort fueron inicialmente explotadas por los romanos para sus construcciones en Valencia en el siglo I. Así mismo, en el siglo XIII siguieron explotándose de forma masiva (la Catedral, el Miguelete, las Torres de Serranos, la Lonja, el Palau de la Generalitat, el Torreón...) hasta finales del siglo XVIII (el Temple, la Basílica de la Virgen...) en que se agotan. A partir del siglo XIX generalmente se emplea en la construcción de nuevos monumentos la piedra de Godella, una caliza más compacta que la Tosca. La zona de Rocafort, según el Mapa Geológico, hoja de Burjassot 696, está sobre terreno Terciario Mioceno Superior, no haciendo distinción entre la compacta de Godella y la tosca de Rocafort. Son característicos los estratos de zonas porosas que recuerdan el travertino. Su color es el beige claro. Actualmente, pueden observarse los frentes escalonados integrados en las construcciones y jardines de la urbanización de Santa Bárbara (Latorre, 1992).

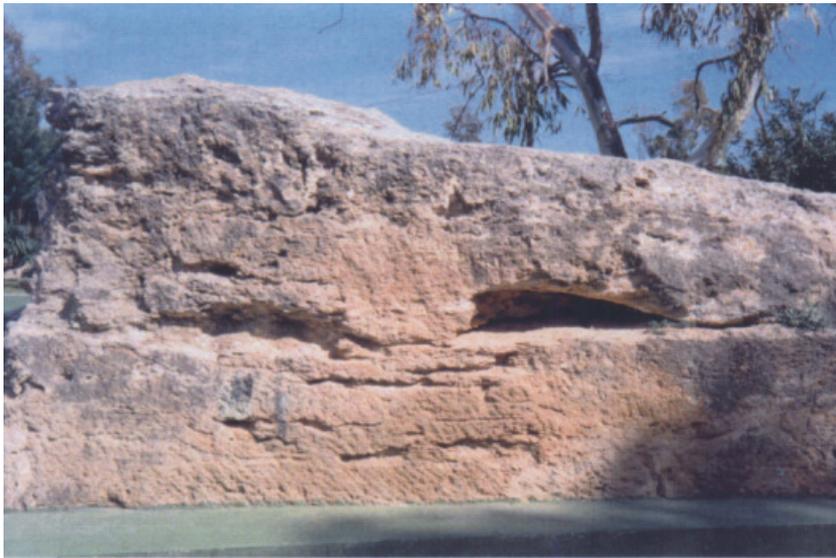


Figura 6.1. Cantera Tosca de Rocafort. Partida del Badall.



Figura 6.2. Detalle de la estructura travertínica.

Microscopía óptica.

La llamada Tosca de Rocafort corresponde a una roca caliza de tipo travertino en tonos beige claro, ligera, y que ocasionalmente contiene inclusiones localizadas de materiales arcillosos.

Por su naturaleza es una roca espárfica constituida por agregados microcristalinos cuyo desarrollo posibilita una intensa porosidad al conjunto rocoso. Los poros, con frecuencia, están intercomunicados y presentan tapizadas sus paredes de cristales transparentes de calcita de tonos claros.

A bajo aumento se observa como, en este material uniforme, se dispone aleatoriamente restos de precipitaciones orgánicas de tipo algal, y microplanos de deposición sedimentaria. Son escasos los cristales y agregados de hábito bien definido, de composición cuarzosa; así como arcillas variablemente cementadas (Figuras 6.2 y 6.3).

Al microscopio presenta además la textura de una caliza con factores organógenos escasamente diferenciales, y de precipitación química; dando una micrita con algo de "sparry" heterométrico y que con frecuencia cierran porosidades o al menos las tapizan.

Los granos de cuarzo, aunque escasos, son fuertemente angulosos; presentándose o sueltos y heterométricos o en agregados y de menor dimensionado.

No se observa linealidad ni morfología regular en el tamaño de sus poros.



Figura 6.3. Tosca de Rocafort. Lupa binocular 80x.
Fuerte porosidad.
Cristalinidad de calcita.

6.2.2. PIEDRA DE NOVELDA.

La Piedra de Novelda se define, desde el punto de vista petrológico, como una roca carbonática del tipo biocalcarenita. Se extrae del área de Vinalopó Medio, Alicante (España oriental). Conocida desde el siglo XIII como material de construcción, es utilizada desde finales del siglo XIX hasta la actualidad para la construcción de edificios y Monumentos de Madrid, Valencia y Alicante. Las principales canteras donde se extrajo dicho tipo de piedra en tiempos pasados, se localizaban en los municipios de Monóvar (Piedra Almorquí), Sax (Piedra Portazgo) y Elda (Piedra Bateig). Las características de los materiales extraídos variaban de unas canteras a otras.

Actualmente, la actividad de extracción se sitúa en las canteras de Bateig, conocida comercialmente como Piedra Bateig y con diferentes variedades (Crema, Fantasía, Diamante, Llano y Azul) (Fort, et al 2002). Los frentes de explotación de cantera son de grandes dimensiones y en

ellos se aprecian distintas tonalidades que van del beige al gris. Estos frentes presentan escasa fracturación permitiendo extraer bloques de dimensiones grandes y medias. Adquiere un aspecto mate sin brillo mediante pulido, y en exteriores admite acabados en escarfilado, abujardado, gradinado, etc.

La Piedra Bateig, gracias a su facilidad de labra, permite su uso tanto para sillería como para ornamento. Como piedra empleada en obras de restauración para sustitución de elementos alterados se pueden citar la Fachada de la Universidad de Alcalá (García de Miguel, 1992, 1994) y recientemente, la Catedral de la Almudena (1994) en Madrid. En obras nuevas, ejemplos como el Palacio de Linares (1873), el Banco de España (1891), el Monumento a Alfonso XII (1922), etc.

La Piedra de Novelda, petrológicamente, se emplaza en una zona transgresiva del terciario (Mioceno Medio-Superior) posterior a las deformaciones que generaron las Cordilleras Béticas en Alicante. Esta propiedad transgresiva se manifiesta por la alternancia de bandas netamente marinas con otras más continentales para terminar con facies lacustres. Esto explica que la piedra procedente de explotaciones antiguas no corresponda con las características específicas a las actuales de la Piedra Bateig.

Por tanto, la Piedra Bateig es una caliza con calcita de bajo contenido en magnesio, y con proporciones mínimas de detritos de dolomita, cuarzo, feldespato y filosilicatos (Ordóñez, 1994; Iglesia, 1998), así como, cristobalita y pirita, en la variedad azul. Los filosilicatos son principalmente illitas con diferente grado de cristalinidad y en menor proporción de esmectitas.

El término biocalcarenita o calcárea aloquímica se debe a la presencia de diferentes variedades de fósiles (foraminíferos y restos de briozos, moluscos y equinodermos) en la estructura de la Piedra Bateig. Por otro lado, la parte cementante de la Piedra Bateig no supera el 10%, constituido principalmente por esparita y en menor proporción por cemento silíceo.

Finalmente, el color es muy similar para todos los tipos de variantes, excepto en el Bateig Azul que, a simple vista, se diferencia por su tono más oscuro.



Figura 6.4. Frente de explotación cantera Bateig Crema, Novelda.



Figura 6.5. Detalle de superficie de una muestra Bateig Crema.

Microscopía óptica.

La Bateig crema, si bien externamente la muestra estudiada presenta una estructura que recuerda a las areniscas muy cementadas por carbonatos, al observarla a la lupa con bajo aumento, comprobamos que buena parte de sus aparentes granos no son tales ni son de cuarzo, sino restos de conchas u otros organismos de tipo bentónico.

La podríamos pues denominar como una biocalcarenita con cuarzo, aun estando este en una proporción inferior a la que en principio se podría pensar al manejar dicho material.

Por otro lado, y en esta muestra, la distribución espacial de todos sus componentes y el tono dorado derivado en parte de óxido de hierro, es uniforme. Cada familia de bioclastos o de minerales está formada por elementos equigranulares y homométricos. Si bien en cantera se observan orientaciones de algunos minerales debidas a procesos de sedimentación en las muestras estudiadas no se localizan estas, aunque si en una posible alineación, localización, o dimensionado de sus poros. Estos, abundantes, se manifiestan en dos tamaños, y se ubican en espacios intergranulares y no en alineaciones de fractura.

Al microscopio, aparte de la abundante concentración biogénica y los antes comentados óxidos de hierro se definen en proporción menor los granos angulosos y sueltos de cuarzo, y los frecuentes cristales verdes oscuros de la glauconita.

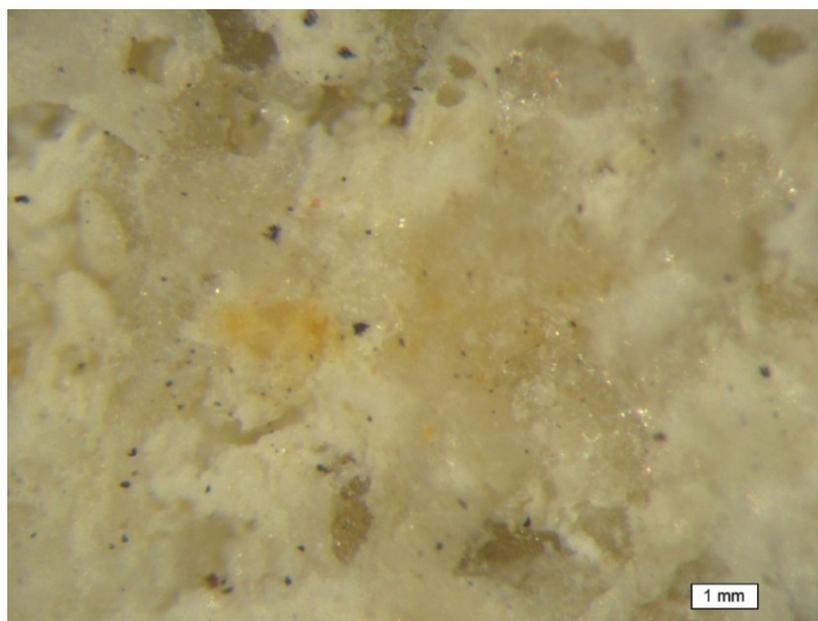


Figura 6.6. Bateig Crema. Lupa binocular 80x.

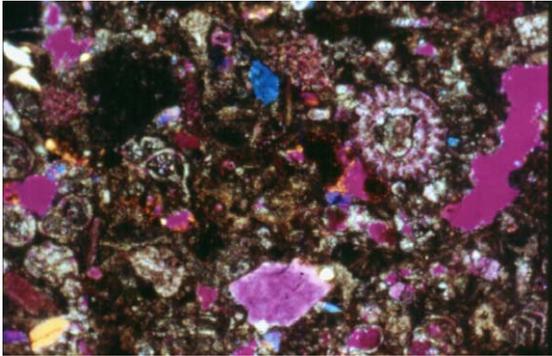


Figura 6.7. Bateig Crema. Sección delgada a 40x, Nícoles cruzados (NX) más compensador de yeso. Caliza organógena con abundantes restos de conchas y óxidos de hierro amarillentos. Roca claramente porosa.



**ALTERACIÓN DE LA PIEDRA: FORMAS
AGENTES Y MECANISMOS**

7. LA ALTERACIÓN DE LA PIEDRA: FORMAS, AGENTES Y MECANISMOS.

7.1. FORMAS DE DETERIORO: INDICADORES MACROSCÓPICOS/VISUALES DE ALTERACIÓN.

Los mecanismos de alteración en los materiales pétreos empleados en los monumentos y obras de arte son un problema extraordinariamente complejo y heterogéneo, debido al gran número de factores que intervienen en cada proceso de degradación y por la dificultad de precisar la correspondencia entre las causas y los efectos producidos.

Estos indicadores de alteración de la piedra conciernen a muchos especialistas, ya sean petrógrafos-mineralogistas, físicos, químicos, biólogos, restauradores, arquitectos, etc, todos ellos con unas ideas y terminología propia sobre alteración de la piedra y su preservación, a veces, bastante ambigua, generalizada y confusa.

La degradación de la piedra se produce como consecuencia de cambios en su composición y/o en su estructura (cambios químicos, mineralógicos, etc.) al interactuar con el medio ambiente que la rodea. Prueba de ello, es la multitud de formas de alteración características que manifiesta el estado de conservación del material.

Por tanto, el conocimiento científico del material pétreo, desde el punto de vista de la restauración es prioritario sobre todo si se tiene en cuenta que los datos obtenidos van a constituir uno de los ejes principales a partir del cual se establecerá su génesis constitutiva y permitirá determinar cual ha sido, a partir de ésta, su posterior evolución

y deterioro. En la bibliografía encontramos numerosos estudios relacionados con la caracterización del material pétreo y su estado de deterioro destacando, por su frecuencia, los relacionados con la contaminación atmosférica y con alteraciones producidas por cristalizaciones debidas a la presencia de sales contaminantes (Winkler, 1975; Schaffer, 1975; Mirwald y Zulmanzig, 1986; Altieri, et al., 1975; Rossi-Doria et al., 1978; De Gennaro, et al., 1993 y De Grado et al., 1994). Son también numerosos los estudios relacionados con el deterioro físico, en particular el producido por los efectos causados durante la extracción de la roca en la cantera, la labra y realización de la obra (Vavene, 1975 y Lazzarini, 1986), y los producidos por cambios bruscos de temperatura y humedad (Cabrera, 1979; y Mamillan, 1967). En cuanto al biodeterioro en monumentos pétreos existen numerosos estudios (Del Monte, 1990; Diakumaku, et al., 1994; Bolívar, et al. 1994-1998; Laborda, F., et al., 1994), etc., así como, sobre las pátinas de alteración (Krumbein y Warscheid, 1992).

En este apartado se presenta una relación de las distintas formas de alteración más comunes observadas en los monumentos de piedra Tosca de Rocafort y Bateig del Patrimonio Valenciano (El Miguelete, la Lonja, Torres de Serrano, Puentes de Serranos y de la Trinidad, Homenaje a Teodoro Llorente, etc). La identificación de las distintas patologías existentes sobre la superficie de la roca se ha realizado mediante una observación visual-directa en los diferentes monumentos valencianos.

En cuanto a la denominación de las formas de alteración, se han tomado como referentes para este trabajo, y a fin de evitar confusiones, la terminología adoptada por la NORMAL 1/80: Alterizioni macroscopiche dei materiali lapidei: léssico, los estudios realizados por Ordaz y Esbert (1988), Alcalde Moreno (1989), Alcalde Moreno, et al. (1990), Álvarez de Buergo et al. (1994), Alcalde Moreno (1997) y Alcalde Moreno, et al (2003). Paralelamente, se han tenido en cuenta los trabajos llevados a cabo por F. Gómez Lopera (1985), M. A. Tomás (1990), J. L. Roig Salom (1995) y M^a. J. Ferrer Graciá (2003) referidos a intervenciones en monumentos de la Comunidad Valenciana, más concretamente de Valencia y Alicante.

Las diferentes morfologías de alteración encontradas en dichos monumentos son las que se muestran en la siguiente Tabla 7.1. (Terminología tomada de Alcalde Moreno et al, 2003):

Tabla 7.1. Morfologías de alteración.

<u>MODIFICACIONES SUPERFICIALES</u>	
ALTERACIÓN CROMÁTICA	DEPÓSITOS
PÁTINA	DEPÓSITO SUPERFICIAL
DECOLORACIÓN	CONCRECIÓN
MOTEADO	EFLORESCENCIA
TINCIÓN	SUBEFLORESCENCIAS
COSTRAS	
MICROORGANISMOS/ PLANTAS	
<u>ELIMINACIÓN DE MATERIA CON FORMACIÓN DE HUECOS</u>	
ACCIONES MECÁNICAS EXTERNAS	ACCIONES FÍSICOQUÍMICAS
EXCORIACIÓN	ALVEOLIZACIÓN
ESTRIADO	PICADO
<u>ELIMINACIÓN DE MATERIA SIN FORMACIÓN DE HUECOS</u>	
ACCIONES MECÁNICAS	DESCOHESIONES
EROSIÓN	DISGREGACIÓN
	DESAGREGACIÓN
	ARENIZACIÓN
	PULVERIZACIÓN
<u>RUPTURAS</u>	
FRACTURACIÓN	
FISURACIÓN	
FRAGMENTACIÓN	
<u>DISYUNCIONES</u>	
EXFOLIACIÓN	
DESCAMACIÓN	
SEPARACIÓN DE PLACAS	

DESAGREGACIÓN/DISGREGACIÓN

La desagregación/disgregación del pétreo se corresponde con una alteración física que comporta una pérdida de las cualidades de cohesión y adherencia entre los componentes de la piedra, traduciéndose en el desmoronamiento del material separándose en pequeñas partículas de árido.

ARENIZACIÓN y PULVERIZACIÓN

Puede ocurrir que, la cohesión entre los granos minerales que conforman el pétreo se pierda y queden sueltos en forma de polvo o arena. Según el tamaño de grano de las partículas resultantes de la desagregación, hablaremos de arenización (tamaño de grano tipo arena) o de pulverización (tamaño de grano tipo polvo).

Se distingue la arenización como aquella forma de deterioro que muestra desagregación granular y desmoronamiento del material con pérdida de materia de forma homogénea y que se produce en la cara expuesta del pétreo, con mayor o menor profundidad y de manera homogénea, sin adoptar aspecto de hueco o caverna (Esbert, 1988) (Figura 7.1.).

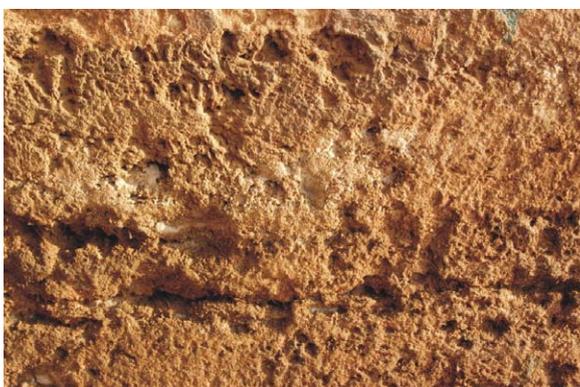


Figura 7.1. Material pétreo Tosca de Rocafort. Proceso de arenización.

EFLORESCENCIAS

Se suelen definir las eflorescencias como las manchas generalmente blancas que aparecen en la superficie externa del pétreo

resultado de la cristalización de sales. Dependiendo del nivel de desarrollo de la cristalización respecto a la superficie del pétreo, hablaremos de criptoflorescencias o criptoflorescencia (criptos=oculto), es decir, cristalización de las sales en el interior de la piedra, o subflorescencia (sub=debajo) cuando la cristalización de las sales se produce por debajo de la superficie pero muy cerca de ella, mostrando una menor profundidad que las criptoflorescencias y representando una mayor efectividad en el deterioro del material.

La presencia de las eflorescencias salina es detectable a simple vista por ser una alteración que se desarrolla en la superficie de la piedra (Figura 7.2). Suelen presentar color blanquecino y se localizan en lugares con cambios continuos de humedad-deseccación del material (Kieslinger, 1968). Por otro lado, las criptoflorescencias y las subflorescencias suelen detectarse relacionadas con otras formas de deterioro, ya sea con la disgregación del material o su descamación, y siempre en función del tipo de sal y de las condiciones ambientales (Figura 7.3.). Además, y por el hecho de estar introducidas en el material, son difíciles de detectar a no ser que su deterioro haya resultado devastador en el seno del pétreo (Iñiguez, 1967; Kieslinger, 1968).



Figura 7.2. Material pétreo Tosca de Rocafort. Eflorescencia.

Figura 7.3. Material pétreo Tosca de Rocafort. Subflorescencia.

ALVEOLIZACIÓN

La alveolización se define como una desagregación de origen físico-químico con pérdida de material en forma de pequeñas cavidades u orificios de forma más o menos globular, interconectadas o no, conocidas con el nombre de alveolos o alveolización, características de ciertas variedades rocosas granudas y porosas (Esbert, 1988, 1997). El interior de los alveolos suele albergar material disgregado, eflorescencias y microorganismos.

La alveolización se distingue de la arenización por presentar un deterioro localizado dando lugar a la formación de huecos o cavidades de diferentes tamaños y formas (Figura 7.4). M. Alcalde distingue entre las pequeñas cavidades que denomina como alveolos y, los huecos de gran tamaño a los que alude como cavernas. También, define los picados como una alteración puntiforme con eliminación de materia que se manifiesta a través de pequeñas cavidades pero que, a diferencia de la alveolización, están más localizadas y no interconectadas.

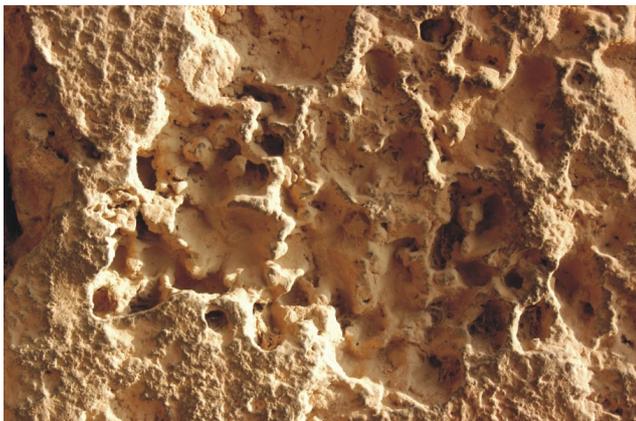


Figura 7.4.
Material
pétreo Tosca
de Rocafort.
Alveolización.

ESTRIADO

El estriado en un soporte pétreo se define como la pérdida de materia que se manifiesta por la formación de surcos horizontales e inclinados “estrías” en las zonas de menor adherencia del cemento natural. Estas estrías pueden ser ligeras y superficiales o, profundas y, más o menos paralelas. Esta alteración se observa en aquellos

paramentos sometidos a una fuerte acción eólica o fuerte humedad interna. Pueden diferenciarse dos acepciones, la acanalación, en el caso de surcos grandes y estrías vermiculares y (Figura 7.5.), la vermiculación, para el caso de surcos contorneados y sinuosos, similares a las trazas que dejan los gusanos (Figura 7.6.).



Figura 7.5. Material pétreo Tosca de Rocafort. Acanalación.



Figura 7.6. Material pétreo Tosca de Rocafort. Vermiculación.

PÁTINA

Según J. Ordaz y R. Esbert, el término genérico de “pátina” abarca diversas acepciones:

- Tonalidad o aspecto externo que produce el paso del tiempo sobre el pétreo expuesto a la intemperie.
- Decoloración debida a causas naturales o artificiales.
- Recubrimiento coloreado artificial, en este caso hablaremos de patinatura.

-Recubrimiento biológico o película de carácter orgánico de tonalidad variable.

-Capa de tinción o teñido superficial debido a diversas sustancias, el caso de residuos de oxidación de cobre (verdín), de hierro (orín), etc. (Figura 7.7.).

-Capa de enmugrecimiento o acumulación superficial de suciedad.

Por tanto, la patina se define como las capas o películas delgadas y superficiales, con gran extensión de una serie de productos depositados o desarrollados sobre la piedra, por causas de diversa índole, constituyendo modificaciones superficiales (color/tono/brillo) y no implicando necesariamente degradación o deterioro.



Figura 7.7. Material pétreo Tosca de Rocafort. Tinción por óxidos de hierro.

EROSIÓN

Según Añorbe Urmeneta (1997), considera la erosión como el deterioro ocasionado por la acción del agua de lluvia y por la acción del viento, cargados o no de partículas erosivas. Es una pérdida localizada de material debido a acciones de carácter mecánico.

ESCORIACIÓN

Alcalde Moreno (1997) define la escoriación como una intervención efectuada por una acción mecánica externa, relacionado con

un rozamiento violento de la superficie del material pétreo. Por otro lado, Álvarez de Buergo, et al. (1994) consideran que este término corresponderían con los raspaduras y rasguños producidos por el hombre como agente agresor.

DECOLORACIÓN

La decoloración se define como la pérdida de color que se produce en el pétreo por la modificación de sus pigmentos presentando la pieza una tonalidad más tenue que el original.

Este tipo de alteración suele localizarse en aquellas zonas expuestas a la acción de lavado o escorrentía del agua de lluvia. Pensemos en una escultura con amplios y caídos pliegues que recojan toda el agua a manera de cauce de desagüe.

DEPÓSITOS SUPERFICIALES

En este caso, nos referimos a productos o sustancias depositadas puntualmente sobre la piedra, tales como excrementos de aves y elementos de tipología diversa.

MICROORGANISMOS Y PLANTAS

Los materiales pétreos que están expuestos al aire libre son los más propensos a ser colonizados de formas distintas por los organismos biológicos, y ello va a depender de la composición mineralógica y de su porosidad, de la exposición y de la inclinación, del macroclima y del microclima del ambiente de conservación.

Los primeros pobladores de microorganismos (bacterias, hongos, cianobacterias y algas) (Figura 7.9.) al colonizar el sustrato pétreo facilitan el arraigo de otras especies más evolucionadas (líquenes y plantas).

El factor degradante que ejercen las plantas sobre las rocas es esencialmente de naturaleza química y mecánica, es decir, la producción de sustancias químicas agresivas para el soporte pétreo y el desarrollo de presiones debidas al crecimiento de sus raíces, traducándose en daños de distinta entidad, tales como fisuras, grietas, cambios de coloración, e

incluso, fragmentaciones y pérdida de material (Winkler, 1975; Caneva, 1985; Caneva y Roccardi, 1991) (Figura 7.8).

La acción química se explica, además de la producción de ácido carbónico, debido a la acidez de los ápices radicales, a las propiedades quelantes y a la acidez de los exudados (Williams y Coleman, 1950; Keller y Frederickson, 1952).



Figura 7.8. Material pétreo Tosca de Rocafort. Plantas superiores.

Figura 7.9. Material pétreo Tosca de Rocafort. Microorganismos.

ROTURAS, FISURAS Y GRIETAS

Se definen como fisuras o fracturas las discontinuidades planares, macroscópicas o microscópicas de orígenes diversos y con formas y dimensiones variables. Generalmente, la denominación de fisura se corresponde con una separación reducida, prácticamente imperceptible de los labios de la fractura, es decir, una fractura o rotura cerrada. En el caso de que la fractura sea abierta, que se evidencie la separación de sus bordes, se recurre a la denominación de grieta (Figura 7.11).

Alcalde Moreno (2003) distingue las disyunciones como la separación de los fragmentos con un movimiento perpendicular a la superficie de la roca, quedando las caras de la piedra situadas en distintos planos.

Finalmente, se hablará de rotura o fragmentación, en el caso en que se produzcan fracturas de la piedra con separación y desprendimiento de algunos de los fragmentos de material (Figura 7.10).

Ordaz y Esbert (1988) distinguen varios tipos de fisuras o grietas en función de su naturaleza:

-Los llamados “pelos” entre los canteros, que resultan ser microfisuras preexistentes originales de la roca.

-Las producidas durante la manipulación de la pieza: extracción, labra, transporte y colocación.

-Las inducidas por los ciclos térmicos de hielo-deshielo, humedad-sequedad, cristalización de sales, etc.

-Las generadas como consecuencia de los esfuerzos mecánicos derivados de la configuración estructural y constructiva del edificio y de la situación y función de la pieza de piedra en el mismo (por ejemplo, la colocación incorrecta de un sillar...).



Figura 7.10. Material pétreo Bateig Crema. Pérdida de material pétreo. Costras.

Figura 7.11. Material pétreo Bateig Crema. Grietas, exfoliación y pérdida de material.

DISYUNCIONES

Los accidentes de disyunción implican la separación abierta entre partes de la piedra originariamente juntas, son lesiones paralelas a la superficie de la piedra y producen porciones de distinta forma y tamaño (Figura 7.12.). La separación de placas, la exfoliación, la descamación, la separación de películas, etc. son tipos de alteraciones de disyunción que implican la separación o levantamiento de placas y/o láminas de la superficie de la piedra.



Figura 7.12. Material pétreo Tosca de Rocafort. Disyunción.

7.2. AGENTES/FACTORES Y MECANISMOS DE ALTERACIÓN

En este apartado planteamos cada uno de los agentes de alteración de la piedra tosca de Rocafort y Bateig presentes en su entorno ambiental, así como los mecanismos de degradación que se originan en la roca.

Para facilitar la exposición de los procesos de degradación de las rocas, se ha optado por estudiarlos a partir del análisis de las principales causas: Físicas, Químicas y Biológicas (Sneyers et al, 1969) (Tabla 7.2.)

Tabla 7.2. Resumen de las principales causas de alteración.

ALTERACIÓN FÍSICA
Extracción/labra/puesta en obra
Cambios térmicos
Acción del hielo
Acción del agua
Acción del viento
ALTERACIÓN QUÍMICA
Sales solubles
Contaminación atmosférica: SO ₂ /CO ₂
Costras
ALTERACIÓN BIOLÓGICA
Bacterias/Algas/líquenes/musgos
Plantas inferiores/superiores
Insectos/mamíferos/aves

7.2.1. ALTERACIÓN FÍSICA.

7.2.1.1. Deterioros tras la extracción, labra y puesta en obra de la piedra.

Los procesos de alteración que sufren los bloques de roca en su medio natural dentro de su formación geológica son relativamente escasos. Pero, bien sabido es, que los mayores deterioros son producidos cuando pasan a convertirse en piedra de construcción/obra de arte.

Los primeros deterioros son los acaecidos durante el proceso de extracción de la cantera, donde se precisa de importantes esfuerzos mecánicos.

Los sistemas tradicionales de extracción de sillares requerían del empleo de cuñas de madera y de metálicas que embutidas en la roca causaban el desgajamiento de los bloques al humedecerlas y aumentar de tamaño. Actualmente esto queda resuelto mediante el empleo de nuevas técnicas y máquinas que posibilitan el arranque (hilo diamantado, perforadoras, sierras con discos diamantados...).

El tipo de labra, también, condicionará el empleo al cual esté destinado el material pétreo. Los destinados a fines constructivos (planchas para suelos, muros...) la labra no causa daños al material. Sin embargo, los bloques destinados a trabajos ornamentales, suntuarios o artísticos provocan daños evidentes al manejar herramientas manuales y concentrar los impactos sobre zonas puntuales de la obra/bloque.

La técnica de labra manual implica, por tanto, un deterioro más acusado y dependiendo de los utensilios (puntero, bujarda, gradina, cincel plano, trinchante...) y de la intensidad de fuerza aplicada manifestará una red de microfisuras conllevando una mayor porosidad a la piedra con el contraproducente acceso de agentes dañinos (agua, sales...) (Lazzarini et al, 1986).

Importante es también elegir el tipo de piedra que debe de ocupar en una construcción u obra de arte, la disposición y la colocación del bloque. Por ejemplo, en rocas sedimentarias, las presiones de carga deben de estar colocadas perpendicularmente a los planos de sedimentación.

7.2.1.2. Cambios Térmicos.

Los cambios de temperatura en los materiales pétreos expuestos a la intemperie se traducen en una variación de su volumen (dilatación/contracción).

La conductividad térmica en las rocas es generalmente baja, a modo orientativo, la conductividad térmica en las calizas oscila entre 810 para una caliza muy dura y $200 \text{ K} \times 10^5 \text{ cal/seg/cm}$ para una caliza muy blanda; en las areniscas, entre $1.100 \text{ K} \times 10^5 \text{ cal/seg/cm}$ para una arenisca dura y $240 \text{ K} \times 10^5 \text{ cal/seg/cm}$ en una blanda, y con $310 \text{ K} \times 10^5 \text{ cal/seg/cm}$ en el caso yeso. También podemos señalar que la conductibilidad disminuye cuando mayor es la porosidad de las rocas y perpendicularmente a su dirección de estratificación.

La estructura de la piedra está sometida a fuertes variaciones de temperatura entre el día y la noche y durante las diferentes estaciones del año.

En las regiones tropicales o desérticas el efecto de la temperatura sobre las piedras es más acusado por existir grandes variaciones térmicas entre el día y la noche “salto térmico o choque térmico”, y la sucesión alternativa de los rayos solares y de la lluvia producen un efecto destructor sobre la piedra (Sneyers et al, 1969). Puesto que la piedra es un mal conductor del calor, las tensiones así generadas se acentúan entre las zonas sombreadas y las más iluminadas, y entre las capas superficiales y profundas. El resultado produce el cuarteamiento y hasta cierto punto la arenización de la piedra (Arnaiz, M. et al, 1977).

Puede ocurrir, que los coeficientes de dilatación de los minerales constituyentes de la roca difieran entre sí, e incluso dentro de un mismo componente puedan existir diferencias entre los coeficientes lineales (“comportamiento anisótropo”) originando tensiones internas, que se traducen en alteraciones tales como grietas, deformaciones, combaduras...

Los cambios térmicos provocados por procesos cíclicos de origen artificial suelen estar producidos por la actividad del hombre, con el apagado y encendido de sistemas de calefacción/aire acondicionado...

Otros mecanismos de degradación resultan al estar presente el agua en los poros de la piedra que al calentarse produce una evaporación en superficie que provoca un movimiento de líquidos del interior al exterior. Si este ciclo es rápido y repetitivo, puede causar en la piedra un deterioro superficial, como exfoliación, microfisuras o decohesión de los granos del material pétreo (Lazzarini et al, 1986).

7.2.1.3. Acción del Hielo.

La acción del hielo es una de las causas más importantes de alteración que se produce sobre los materiales pétreos. Ello se debe a la transformación, alrededor de los 0 °C, del agua en hielo, estimando un aumento del 9% que equivale a una expansión del 3%. Para materiales poco deformables, como son las piedras, esto supone graves problemas.

Si la congelación es brusca, a -5 °C, la presión que ejerce es del orden de 500 kg/cm² (Cabrera, 1979).

Así, el aumento de volumen provoca unas tensiones que al sobrepasar el valor límite de deformación el material no resiste dicha expansión y se produce la rotura. Por el contrario, puede ocurrir que en un cuerpo poroso, en el que posea un volumen de huecos bastante grande, se forme hielo sin que se produzca alteración (Mamillan, 1967).

El agua absorbida por el material no se solidifica en todos los poros al mismo tiempo. El hielo se produce primero en los poros grandes y después, cuando la temperatura disminuye, el hielo se forma en los capilares más finos (Arnaiz y Martín, 1977).

Por tanto, el hielo formado, avanza en el interior del material empujando el agua aún no solidificada, la cual, al desplazarse ejerce presiones contra los poros capilares, suponiendo elevadas presiones para los capilares más finos y extensos.

Se ha comprobado experimentalmente que las rocas que presentan una porosidad abierta superior a 5% son heladizas y que cuando su porosidad abierta no supera el 1% muestran un buen comportamiento frente a la helada.

Por tanto, la resistencia al hielo depende no sólo de la cantidad de agua susceptible de helarse a una temperatura dada, sino también de la

estructura de la red capilar y distribución, de la forma y dimensión de los poros.

7.2.1.4. Acción del agua.

La presencia de agua en cualquiera de sus formas o estados, provoca, favorece o acelera el deterioro de los materiales pétreos y morteros. La presencia de la acción del agua puede destacarse por su acción directa e indirecta facilitando la acción de otros agentes de alteración y como vehículo transportador de sustancias y elementos agresores.

Definido, por un gran número de investigaciones, como “el más importante agente de deterioro”, genera, bien por si misma o en mutua colaboración con otros factores, una amplia gama de procesos perjudiciales en la piedra.

Operando independientemente, el agua puede ejercer un efecto directo por medio de mecanismos físico-mecánicos/químicos, (es el caso de la erosión por escorrentía) o físico-químico (hidrólisis de las arcillas). Por otro lado, un efecto indirecto como catalizador, favoreciendo las reacciones químicas, y como vehículo de acceso de otros agentes de deterioro al interior del material.

Actuando con otros agentes de alteración, es el caso de la acción combinada con la temperatura, capaz de provocar la degradación de la piedra por la acción de la helada, o el efecto perjudicial de la evaporación del agua absorbida por el pétreo por la acción del viento y el efecto del soleamiento.

Al igual que los cambios térmicos, las variaciones de humedad pueden provocar modificaciones dimensionales. Es el caso de las areniscas, que por su naturaleza, resisten mucho peor que los granitos. El factor principal es la presencia de arcilla, cuya inestabilidad volumétrica frente al agua les califica de especialmente sensible a este tipo de deterioro.

Además, la presencia de agua en el material pétreo favorece el desarrollo de agentes biológicos como algas, bacterias, hongos, líquenes,

plantas... que modifican las características estéticas y funcionales del material lapídeo.

Básicamente, los fenómenos físicos que permiten el acceso de agua con la piedra de los monumentos, independientemente de que las características de la roca favorezcan o dificulten los mecanismos de penetración, son:

- PENETRACIÓN DIRECTA
- ABSORCIÓN
- HIGROSCOPIA
- CONDENSACIÓN
- CAPILARIDAD

Penetración directa.-

La penetración directa del agua en estado líquido en el monumento suele deberse a la acción del agua de la lluvia o también, por efecto del riego de los parques y vías públicas.

Absorción.-

La absorción se produce por la penetración del agua en fase líquida a través de la red porosa del material pétreo. El agua se filtra por los poros, microfisuras estructurales, grietas, roturas y discontinuidades, en general. El mecanismo de absorción se basa en la presión que ejerce el agua al intentar penetrar en los poros y fisuras frente al aire contenido en el interior del pétreo. En la absorción se tiene en cuenta el principio de los vasos comunicantes, en el que se implica la fuerza de la gravedad o la presión que ejerce el viento.

Higroscopía.-

En este caso, la penetración del agua en la red porosa se sucede en fase de vapor, tomada directamente de la humedad atmosférica en lo que compete al denominado equilibrio higroscópico del material con el medio, es decir, cada material, dependiendo de la humedad relativa que contenga intenta equilibrarse con el contenido de humedad del aire que le rodea.

Condensación.-

La condensación tiene lugar cuando el aire está húmedo y la superficie pétreo está más fría que el punto de "rocío" o de condensación del aire a la temperatura que tiene su masa en general. Este fenómeno

tiene lugar en los materiales lapídeos que tienen mayor densidad y mayor conductividad térmica.

Capilaridad.-

Este fenómeno se manifiesta por un efecto de succión del agua en materiales porosos, donde el agua absorbida por capilaridad penetra en su interior. En general, la altura o profundidad de penetración del agua dependerá del diámetro de los poros y de la evaporación que se produzca a través de la superficie externa del material (Más, 1990).

El fenómeno de capilaridad es resultado del ascenso y descenso de un líquido en el interior de los poros del material pétreo cuando éste se encuentra sumergido y, se debe, a la existencia de fuerzas en la interfase entre sustancias sólida, líquida y gaseosa en contacto. Estas fuerzas, denominadas de tensión superficial, hacen que las gotas de un líquido depositadas sobre la superficie del material pétreo presenten ángulos de contacto sólido-líquido variados en función de su naturaleza. Así, cuando el ángulo de contacto está comprendido entre 0 y 90° el líquido moja el sólido y, si por el contrario, el ángulo de contacto está comprendido entre 90° y 180° el líquido no moja el material. (Figura 7.13.).

Por tanto, el acceso del agua por capilaridad es uno de mecanismos más peligrosos para la piedra si ésta transporta en disolución sales solubles procedentes del terreno, comportando el deterioro que de ellas se traduce.

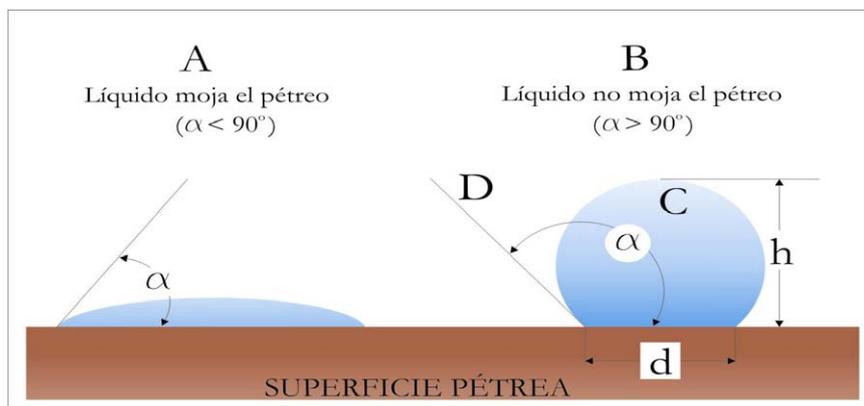


Figura 7.13. Variación en el líquido-pétreo. En el apartado (A) el líquido moja el pétreo, siendo el ángulo menor de 90° , mientras que en el caso (B) el líquido no

moja el pétreo, en cuyo caso el ángulo es mayor a 90° . Sistema de medición de los valores angulares: (C) microgota de agua, (D) tangente a la gota en el punto de contacto, (d) diámetro de la gota, (h) altura de la gota, (α) ángulo de contacto estático.

7.2.1.5. Acción del viento.

La acción del viento es puramente mecánica; Si lleva partículas sólidas en suspensión puede ejercer una erosión sobre las superficies pétreas de los monumentos.

Este desgaste del soporte lapídeo dependerá por un lado, de la dirección, fuerza y tiempo de actuación del viento y, por otro, de la génesis del material pétreo, es decir, dureza del pétreo, porosidad, composición mineralógica, resistencia mecánica, etc.

Por otro lado, la velocidad del viento puede aumentar la evaporación superficial del agua presente en el pétreo, favoreciendo la cristalización de sales solubles en el interior de la red porosa y aumentando su poder rompiente (Iñiguez, 1967).

Las corrientes de aire combinadas con otros agentes de deterioro, (agua, temperatura...) pueden producir la desintegración directa de las rocas o participar indirectamente en nuevos estadios de alteración, como la proliferación de bacterias, transporte de polución, lixiviación de componentes solubles, etc (Sneyers y Henau, 1969).

El lugar donde esté localizado el monumento influye de manera considerable la acción de erosión, es decir, hay zonas protegidas ante la acción de los vientos por medio de cinturones de árboles y vegetación y, otras desprotegidas en zonas desérticas, donde la erosión es la principal causa de destrucción de los monumentos (Coremans, 1979).

En las piedras areniscas la agresión sufrida por la acción del viento se presenta por un redondeado de los vértices salientes, mientras que en las piedras calcáreas la exposición a este tipo de meteorización provoca una tipología de alteración denominada alveolización.

7.2.2. ALTERACIÓN QUÍMICA

7.2.2.1. Sales solubles.

Las sales solubles son, sin duda, uno de los mecanismos de deterioro más drástico que sufren los materiales pétreos. Son compuestos iónicos capaces de disolverse en el agua y de cristalizar y aumentar de volumen al producirse la sobresaturación de la disolución. Suponen una alteración estética al cristalizar en la superficie del material, y dependiendo de la concentración precipitada en el interior de la red porosa, ejercen fuertes presiones mecánicas (“presiones de cristalización”) sobre las paredes de los poros hasta acabar desmoronando el soporte pétreo.

Las sales solubles más frecuentes son los sulfatos, cloruros y carbonatos de sodio, potasio, calcio y magnesio, y los nitratos de sodio, potasio y calcio. Se caracterizan por mostrar distinta solubilidad y diferente grado de hidratación en función de su tipo y de las condiciones del entorno. Su efecto destructivo dependerá de estos parámetros y de las características intrínsecas (textura, composición, porosidad...) de los pétreos (Esbert, 1997).

La cristalización de las sales se puede producir en el exterior por evaporación regular del agua que transporte las sales hasta la superficie del material, dando lugar a la formación de eflorescencias, que si son solubles podrán ser disueltas y arrastradas por el agua de lluvia (Lazzarini y Laurenzi, 1986). Si las condiciones de disolución son tales que su sobresaturación se produce en el interior del material, la cristalización tendrá lugar en el interior de la roca. Cuando la cristalización de las sales se produce dentro del material se distingue la mayor o menor profundidad a la que se produce. Por tanto, de producirse en el interior del material, pero muy cerca de la superficie se denomina subeflorescencia y si la distancia a la superficie es mayor, quedando a una cierta profundidad en el interior del material, se le denomina criptoefflorescencia. En el caso de las eflorescencias la alteración se reduce a la del aspecto blanquecino que confieren a la piedra, es decir, se limita a una cuestión estética. En el caso de las subeflorescencias i criptoefflorescencias la formación y crecimiento de un sólido en el interior de la red porosa del pétreo genera presiones, que en función de las características del material, pueden llegar a lesionarlo gravemente,

particularmente en el caso de las subeflorescencias, que pueden ser la causa de ampollas, escamas, exfoliación o alveolización del material.

La presencia de una acusada alveolización con una fuerte pérdida de material, se debe según Pauly (1976), a la presencia de una elevada porosidad, con un elevado contenido de sales solubles higroscópicas combinado con una fuerte agresión del aire en contacto con el soporte pétreo.

En el mecanismo lesivo de las sales solubles es determinante el tamaño e intercomunicación de los poros, ello se traduce en cuanto mayor sea el número de poros de pequeño tamaño mayores serán los efectos destructivos de la cristalización (Esbert y Marcos, 1987).

Correns (1949) ha establecido la expresión que permite el cálculo de la presión mecánica que ejerce el crecimiento de un cristal de sal:

$$P = RT/V_s \times \ln(C/C_s)$$

P = Presión de crecimiento del cristal en atmósferas.

R = Constante universal de los gases (= 0,082 litro atm/mol K).

T = Temperatura en absoluta (K).

V_s = Volumen molar del sólido (l/mol).

C = Concentración del soluto durante la cristalización.

C_s = Concentración del soluto a saturación.

El grado de hidratación que pueden alcanzar las sales al cristalizar depende de su naturaleza y de las condiciones de temperatura y humedad relativa que se produzca. En bajas temperaturas y elevada humedad relativa se producen altas presiones de cristalización, y una baja humedad relativa y elevadas temperaturas producen bajas presiones. Si la sal es poco soluble y la humedad ambiental es baja, las presiones de cristalización de la sal son débiles. Por el contrario, si la sal es muy soluble y la humedad relativa es alta, la cristalización de la sal se produce en la superficie del pétreo, influyendo en el carácter estético del monumento.

Un caso típico es la transformación de la anhidrita, es decir, sulfato de calcio anhidro, en yeso por adición de dos moléculas de agua. Se calcula que esta hidratación produce una presión de unas 1.100 atmósferas (Sneyers y Henau, 1969).

Podemos concluir reafirmando que las sales solubles interactúan químicamente, en forma de iones, en la estructura de la piedra produciendo un efecto degradante de tipo químico, y además, ejercen una acción destructiva de carácter físico-mecánico debido a la cristalización de las sales propiamente dichas.

7.2.2.2. Contaminación atmosférica.

La contaminación atmosférica es un factor de alteración de origen antrópico, es decir, causado por la acción desafortunada del hombre y resultado de la contaminación del aire.

Por tanto, la contaminación atmosférica, para el caso de los materiales pétreos, viene referida al conjunto de productos presentes en el aire que pueden resultar perjudiciales para la piedra.

El Consejo de Europa define en su informe del 14 de Septiembre de 1967, que existe polución atmosférica “cuando la presencia de una sustancia extraña o una variación en la proporción de sus constituyentes, es susceptible de provocar un efecto perjudicial o de crear una molestia, teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento”.

A la hora de investigar y estudiar las alteraciones que afectan a los materiales pétreos, será imprescindible el estudio de la contaminación atmosférica presente en el medio ambiente donde esté localizado el monumento. Disponemos de ejemplos de estudios realizados en monumentos de Venecia (Bertolaccini, et al. 1975) y de la catedral de Colonia (Luckat, 1975).

La cantidad y calidad de los contaminantes en una zona determinada no dependen sólo del tipo de factor de deterioro, sino también de las características topográficas y de las condiciones meteorológicas (el viento y sus turbulencias, las radiaciones solares, los cambios de temperatura y las precipitaciones de lluvia) (Anfossi, et al. 1979; Camuffo, 1979; Cagneti y Cirillo, 1985).

La acción de la polución atmosférica, está muy relacionada con la meteorología, ya que la temperatura, el viento, las radiaciones solares, la humedad y las precipitaciones, pueden minimizar o incrementar la acción de la contaminación, aportando las condiciones que favorezcan la alteración o, por el contrario, reduciendo su incidencia. También, el

microclima que se genera en las ciudades influye sobre la presencia y acción de la contaminación, ya que en estos núcleos urbanos se genera unas características ambientales propias. En las ciudades, con respecto a las zonas rurales, se aprecia un incremento de la temperatura, las precipitaciones, la nubosidad y la niebla, así como una reducción de la insolación, de la humedad relativa media y de la velocidad del viento (Gómez Lopera, 1985).

La contaminación puede resultar de la combinación de sustancias o elementos químicos o minerales (arena, polvo...), vegetales (polen, fibras...) o animales (hongos bacterias...) y ser de origen natural o generadas por acción del hombre, antrópicas.

La contaminación de carácter antrópico suele atañer a las emisiones derivadas de los procesos industriales, a la combustión de calefacciones domésticas e industriales y a los gases generados por la combustión de los motores de explosión y reacción.

En general los mecanismos que facilitan el acceso de los contaminantes atmosféricos a los materiales pétreos son la lluvia, la condensación, la fijación directa de los gases, la gravedad, la atracción electrostática, la termoforesis y el viento (Ferrer, 2003). La presencia del agua forma parte también de los mecanismos que permiten el acceso de los contaminantes a las rocas, incluso actúa químicamente sobre los gases contaminantes disolviéndolos en forma de iones de carácter ácido capaces de actuar sobre las piedras, especialmente las de tendencia básica como es el caso de los componentes carbonatados de las rocas del presente estudio.

En este apartado se abordan las características específicas de los contaminantes atmosféricos presentes en el aire que suponen un grave deterioro para los materiales pétreos: el caso del dióxido de azufre (SO₂) y del dióxido de carbono (CO₂).

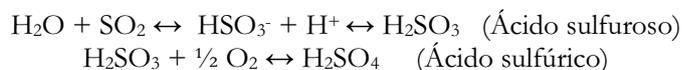
7.2.2.2.1. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

Los compuestos de azufre más frecuentes presentes en las atmósferas contaminadas son el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso y el anhídrido sulfúrico o trióxido de azufre.

El dióxido de azufre (SO₂) presente en la contaminación atmosférica procede de los combustibles empleados en la industria, en los vehículos o en las calefacciones domésticas.

El trióxido de azufre (SO₃) procede, como el dióxido, de la combustión, no obstante suele generarse en la atmósfera a partir del SO₂ por efecto de los rayos UV de la luz solar, la humedad y otros agentes (aerosoles...).

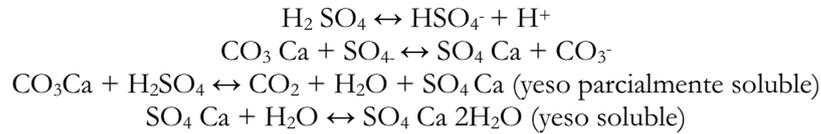
Son dos las fases en que se puede producir la reacción de oxidación del dióxido de azufre: en estado gaseoso y en estado líquido. Por un lado, la transformación en fase gaseosa de SO₂ en SO₃ se produce en presencia de luz (mecanismo fotoquímico), al precisar el dióxido de azufre la incorporación de energía de un fotón de radiación ultravioleta para unirse a la molécula de oxígeno. Por otro lado, la reacción en estado líquido se da en las partículas de agua de humedad que, combinada con la acción catalítica (mecanismo catalítico) de componentes contaminantes del polvo, cenizas... (sales de hierro y manganeso) transforman el dióxido de azufre en ácido sulfuroso (Chovin y Rousel, 1968). A partir de la oxidación del ácido sulfuroso se genera ácido sulfúrico, según la ecuación:



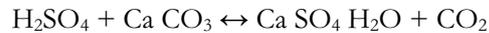
Puede ocurrir que, el trióxido de azufre gaseoso permanezca en la atmósfera si la humedad ambiental es sensiblemente reducida, y se transforme en ácido sulfúrico en estado de aerosol, constituyendo la denominada lluvia ácida, mecanismo común en ambientes contaminantes. El resultado de la formación del ácido sulfúrico a partir del SO₃ es:



El efecto lesivo del ácido sulfúrico se manifiesta de dos maneras, una, formando sulfatos insolubles y otra, como ácido fuerte. En el supuesto que atacara los carbonatos de las calizas resultaría la formación del sulfato de calcio o yeso. Este mecanismo de transformación de los materiales calcáreos (calizas, dolomías, mármoles y morteros de cal) en sulfatos, se conoce como sulfatación de la piedra. La reacción química resultante sobre el CaCO₃ es:



Por tanto, y a partir de esta ecuación, el ácido sulfúrico en presencia de humedad actúa sobre los componentes calizos de la roca descomponiéndolos y formando sulfatos de calcio. Responde a la reacción:



Así pues, la descomposición del carbonato cálcico presente en la piedra en sulfato cálcico, se debe a la polución atmosférica (con compuestos de azufre) y a la humedad ambiental.

Transformado el carbonato cálcico en yeso puede disolverse y lixiviarse por el contacto con el agua de lluvia. Dicha solubilidad se agrava cuando existe la presencia de otros tipos de sales, como cloruros, frecuentes en ambientes costeros.

La acción del ácido sulfúrico (H_2SO_4) también afecta sobre el carbonato sódico y magnésico transformándolos en sulfatos de sodio y magnesio muy solubles.

En general, la cantidad de pétreo transformado en sulfato estará en función de las características propias del ambiente (humedad, polución...) y de las características intrínsecas del material (textura, porosidad...) (Serra y Sarace. 1978).

Finalmente, señalar que el dióxido de azufre es la fuente de energía de determinados microorganismos, bacterias..., que lo transforman metabolitamente obteniendo ácido –sulfúrico o sulfhídrico-.

7.2.2.2.2. DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2).

A este apartado corresponden el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2) como los principales contaminantes que

contienen carbono en su composición. Aproximadamente, se encuentran presentes en la atmósfera en una proporción de 10%, siendo superior que la de los compuestos de azufre.

El dióxido de carbono es un compuesto que se encuentra presente de forma natural en el aire y su concentración puede variar en función de los constantes procesos industriales o por la elevada emisión causada por los motores de los vehículos.

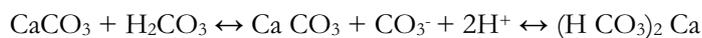
El monóxido de carbono se genera por la combustión incompleta de sustancias inorgánicas al carecer del suficiente oxígeno. Procede, en la mayor parte de los casos, de actividades antrópicas, como la calefacción y escapes de automóviles. A cierta altura, su presencia apenas se detecta. El papel fundamental de su acción sobre las piedras es que actúa como catalizador en el proceso de oxidación del SO₂ al SO₃ (Gómez Lopera, 1985).

Por otro lado, la principal alteración causada por la acción del CO₂ en los materiales pétreos, es la disolución de los carbonatos y la rápida descomposición de los silicatos. El dióxido de carbono en contacto con el vapor de agua de la atmósfera transforma los carbonatos presentes en la roca en bicarbonatos, que por la acción de lixiviación pueden ser disueltos por el agua.

Por tanto, el CO₂ combinado con la humedad atmosférica se transforma en ácido carbónico, según:



El ácido carbónico, al entrar en contacto con el carbonato cálcico (insoluble) de las rocas carbonatadas, se origina bicarbonato cálcico (soluble):



De la misma manera, el ácido carbónico puede actuar sobre el carbonato magnésico (insoluble) de las rocas dolomíticas, resultando el bicarbonato magnésico (soluble), según:



Los bicarbonatos resultantes de la transformación de los carbonatos (cálcico/magnésico) son altamente solubles en agua por lo que la lluvia y la condensación podrán disolverlos y arrastrarlos llevando a cabo el lavado de la piedra y desposeyéndola de dichos minerales.

En general, la disolución de los carbonatos cálcicos y magnésicos dependerá de dos factores, la temperatura y la concentración de CO₂ del ambiente. De ahí se deriva que, un aumento de temperatura genera una disminución del CO₂ disuelto y, una mayor concentración de CO₂ combinado con bajas temperaturas significa una fuerte acción lesiva sobre la piedra (Winkler, 1970).

7.2.2.2.3. COSTRAS.

Las costras, denominadas por Krumbeln y Pochon (1964) “enfermedad en placas” son láminas más o menos compactas de material en la superficie de la piedra debido a una transformación superficial del sustrato y con una composición y características físicas parcialmente diferentes del pétreo sobre el que se encuentran (Esbert y Marcos, 1982).

El proceso de formación de costras en rocas calizas o areniscas con cemento calcáreo se inicia con la penetración en la roca del agua de lluvia que satura la porosidad hasta cierta profundidad, disolviendo el carbonato de cálcico. Tras la evaporación, el agua retorna hacia el exterior dejando depositados los compuestos menos solubles, es decir, carbonatos de calcio, magnesio y sulfatos de calcio. Importante aquí son los continuos ciclos de humedad-sequedad “ritmos de humedad”. A partir de aquí, existe una diferencia entre la capa externa y el resto de piedra, donde los poros pequeños se colmatan y los grandes son parcialmente obstruidos por las sales cristalizadas en las paredes. De esta manera, la zona exterior de algunos milímetros se consolida y se vuelve más compacta. Por el contrario, la zona próxima ha perdido sus sales modificando la estabilidad de los agregados minerales. El resultado es la formación de una segunda capa o costra interior (Iñiguez, 1967; Kieslinger, 1968), con propiedades inversas a la precedente, es decir, con escasa adhesión y arenizada (Torraca, 1974). Esta capa arenosa intermedia, de espesor variable supone la caída de la costra exterior y evidencia una pérdida de espesor de la piedra, además de exponer a la nueva superficie ante sucesivas alteraciones. Dicho desprendimiento

puede tener lugar de diversas formas, desde grandes conchas sobre zonas amplias o bien en áreas distantes en forma de ampollas.

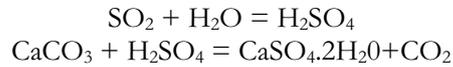
Lazzarini y Laurenzi, en *Il restauro della pietra* (1986), definen el término costra como depósitos variablemente coherentes y adheridos al soporte, de coloraciones gris a negro, de espesores y formas diversas que van desde puras estratificaciones de polvo coherente en zonas horizontales protegidas, a depósitos superficiales poco coherentes pero adheridos, así como a depósitos homogéneos fuertemente aferrados al material pétreo.

Uno de los factores que influirá en la tipología de las costras es el grado de porosidad del soporte pétreo. En presencia de poros grandes se dan lugar costras grumosas, en cambio, con poros pequeños y homogéneamente distribuidos, se dan las costras más lisas. Otras veces adoptan la forma de ampollas, que cuando se desprenden denominamos desconchados.

Mamillan (1964) define el modelo de formación de costras en la superficie de piedras calizas sulfatadas del modo siguiente:

- 1° La dureza aumenta respecto a la parte interna, incluso un 60%.
- 2° La densidad también aumenta respecto al material subyacente, llegando hasta un 25%.
- 3° La permeabilidad del agua en la superficie se reduce respecto a la roca sana hasta un 50%, no siendo totalmente impermeable.
- 4° La capacidad de evaporación disminuye hasta un 50%.
- 5° La composición química de la capa superficial indica que se ha producido una disminución en el contenido de carbonato de calcio y un aumento en el contenido de sulfato de calcio.

También, en el caso de las piedras carbonatadas, calizas y dolomías, existe la posibilidad de formación de costras en ambientes con presencia de polución, en condiciones termohigrométricas favorables y con deposición de partículas sólidas producidas por fenómenos de termoforesis (Lazzarini y Laurenzi, 1986). El agua de condensación del ambiente rica en catalizadores y en presencia del SO₂ favorece la formación del ácido sulfúrico que reacciona con los carbonatos cálcicos formando yeso. Al evaporarse el agua el yeso cristaliza y retiene las partículas de polvo, dando lugar a costras oscuras. Este fenómeno se define como costras negras.



Se ha comprobado que la costra negra es el resultado del combinado de material de la roca base, en alto porcentaje y, otra proporción es el material adherido. Estos depósitos pueden asumir espesores y formas distintas, que van desde las puras y simples estratificaciones incoherentes de polvos (superficies horizontales protegidas) hasta depósitos superficiales poco coherentes pero muy adheridos al soporte pétreo. En la mayor parte de los casos, estas costras se forman en las partes menos lavadas de la piedra y se presentan como unas películas finas y uniformes de entre 0,5- 3 mm. Con el tiempo, estas costras negras, tienden a incrementar su espesor, pudiendo llegar hasta los 20 mm, endurecerse y reducir su porosidad (Lazzarini y Laurenzi, 1986).

Estudios al microscopio electrónico de barrido muestran las distintas capas y componentes que forman las costras, observándose partículas de dimensiones y formas diversas, el resultado son:

- Productos muy porosos y gránulos bituminosos procedentes de la combustión del petróleo.
- Depósitos compactos y lisos generados por la combustión del carbón (Lazzarini y Fascina, 1979).
- En ambientes marinos es frecuente la presencia de sales de cloruro de sodio.
- En ambientes industriales: óxidos de hierro, cobre, cromo...
- Trazas de calcita, cuarzo...
- En rocas carbonatadas presencia de yeso que cementan el depósito.
- En piedras areniscas carbonatadas la superficie exterior es de color negro, la interior de color blanca, debido al yeso que contiene y a la recristalización masiva de calcita.

La costra negra, a diferencia de las pátinas oscuras formadas por hongos y líquenes, es una capa inorgánica, compuesta por yeso (estrato intermedio) y minerales de la roca soporte. Además, representa un problema estético y de deterioro, debido a la fase de arenización del soporte subyacente.

A través del microscopio óptico se puede evidenciar la distribución estratigráfica mediante coloración con una disolución alcalina de rodizonato de sodio.

7.2.3. ALTERACIÓN BIOLÓGICA

Todo material pétreo, independientemente de sus características intrínsecas y localización ambiental/física en que se halle, es susceptible de ser atacado biológicamente.

Esta alteración será más acusada en aquellas zonas donde el porcentaje de precipitaciones y temperatura entrañe un clima cálido frente a las regiones frías y gélidas.

Hablar de alteración biológica o biodeterioro es aglutinar todas aquellas alteraciones causadas por el ataque de organismos micro y macroscópicos, plantas superiores e inferiores, insectos, mamíferos y aves.

La acción de deterioro de los organismos biológicos sobre la superficie del pétreo supone una alteración tanto física (disgregación o fractura) como química (descomposición).

Los microorganismos capaces de provocar biodeterioro en los materiales pétreos son los autótrofos y los que viven en simbiosis, o sea, algunas bacterias, algas, determinados hongos, líquenes y musgos, que no necesitan de moléculas orgánicas para su nutrición, ya que a partir de sales minerales y compuestos inorgánicos sintetizan sus propios nutrientes (Vaillant, et al. 2003).

En la colonización biológica, los primeros pobladores del material pétreo, son los microorganismos bacterianos que suministran y preparan el sustrato para posteriores colonizadores más complejos, como son las algas. Éstas, microorganismos fotótrofos, son capaces de producir materia orgánica (en presencia de humedad) que permite el crecimiento de bacterias organotrofas y hongos, que a su vez, les seguirán los líquenes (simbiosis de algas y hongos), preparando el hábitat para las hepáticas y musgos (briofitos). Tanto líquenes como musgos comparten un mismo nicho ecológico. La acción combinada de estos organismos

acentúa la colonización de las plantas superiores, debido a la acumulación de humedad y suelo fértil.

Por tanto, para que todos estos grupos biológicos fructifiquen, es necesario que estén presentes toda una serie de parámetros ambientales, como la luz (esencial para los organismos fotosintéticos, función clorofílica), el oxígeno (necesario para la respiración celular), el dióxido de carbono (necesario para los microorganismos autótrofos) y, el agua (indispensable para el desarrollo de las funciones metabólicas).

Se ha estudiado la posibilidad que determinados microorganismos presentes en la piedra proporcionen un carácter consolidante y protector al material pétreo (buscar bibliografía). Frente a estos casos excepcionales, la mayoría de las veces actúan de manera lesiva oxidando la piedra (Clements y Shelford, 1939; Pochon y Coppier, 1950; Cooper y Rudolph, 1958; Henderson y Duff, 1964;

Así, los líquenes producen dióxido de carbono (CO_2) y ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), los hongos (*Aspergillum niger*, *Spicaria*, *Penicillum*) originan grandes cantidades de ácido cítrico y oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) y los sulfobacilos (en las calizas y areniscas) producen la oxidación de los sulfatos a sulfuros.

Por otro lado, las características del sustrato pétreo facilitarán o retardarán el crecimiento biológico en tanto que la rugosidad, presencia de poros, fisuras o grietas supone un anclaje y punto de introducción de microorganismos degradantes.

En general, estos organismos suponen una alteración estética resultado de la modificación cromática de la superficie de los pétreos y, además, una alteración física ocasionada por mecanismos de tipo químico y mecánico, es decir, por la secreción de sustancias ácidas y el aumento del volumen de los microorganismos que ejercen presiones en las paredes del pétreo.

Todo seguido, se tratan cada uno de los agentes de biodeterioro que afectan a los materiales pétreos a estudio en esta tesis, considerándose las características, los mecanismos de acción y los aspectos morfológicos de diferenciación. Distinguiremos los siguientes grupos:

Tabla 7.3. Tipos de agentes biológicos.

AGENTES BIOLÓGICOS		
Bacterias	Musgos	Plantas inferiores
Algas	Hepáticas	(Briofitos)
Hongos	Plantas superiores	
Líquenes	Animales	

7.2.3.1. BACTERIAS.

Las bacterias atacan la piedra por medio de agresiones químicas. Son la causa de la solubilización del pétreo al producir ácido en contacto con el ambiente derivándose la pérdida posterior del material pétreo (Caneva, et al, 1994).

Del conjunto de especies bacterianas, las que ejercen mayor influencia en el deterioro de la piedra son las correspondientes al ciclo del azufre y del nitrógeno. No efectúan la fotosíntesis pero son capaces de fijar el CO₂ del aire mediante la energía de reacciones químicas. Estas bacterias pueden actuar solas o en combinación con otros organismos transformando los carbonatos en sulfatos o la neoformación de nitratos.

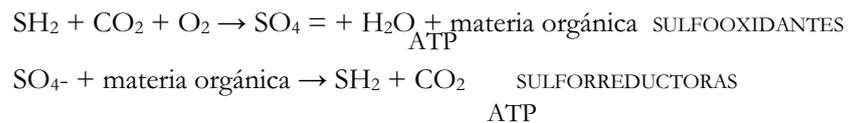
Por otro lado, a partir de la oxidación de compuestos S y N procedentes de la contaminación atmosférica o de las deyecciones de diversas aves, obtienen su energía produciendo ácido sulfúrico y nítrico lesivo para el soporte pétreo.

Las bacterias se pueden dividir en microorganismos autótrofos y microorganismos heterótrofos. De entre los primeros podemos destacar las llamadas bacterias quimioautótrofas o quimiosintéticas, que comprenden las bacterias del ciclo del azufre (sulforreductoras y sulfooxidantes), las bacterias del ciclo del nitrógeno y las ferrobacterias. Y de las segundas, las bacterias heterótrofas y los actinomicetos.

Las bacterias del ciclo del azufre transforman en sus procesos metabólicos los compuestos del azufre. Se distinguen dos tipos, las sulfooxidantes (del género *Thiobacillus*) son las generadoras del ácido

sulfúrico, y las sulforreductoras (del género *Desulfovibrio*) son las productoras del ácido sulfhídrico. Estas sustancias en contacto con el sustrato son capaces de ejercer un efecto corrosivo irreversible.

Según la ecuación:



Las bacterias del ciclo del nitrógeno o bacterias nitrificantes (especie *Nitrobacter*) y nitrosantes (especie *Nitrosovibro*) atacan a la piedra al producir ácidos nitroso y nítrico a partir del amoníaco presente en atmósferas contaminadas.

A partir de este ácido que forman, atacan a los carbonatos produciendo nitrato de calcio que puede ser eliminado por lixiviación. La roca, por tanto, se disgrega y se vuelve pulverulenta.

En cuanto a las ferrobacterias, éstas toman la energía a partir de la oxidación de iones ferrosos a iones férricos, además de poder oxidar algunos minerales férricos como la pirita (Sameño, 2003).

La morfología más frecuente de las bacterias autótrofas en los materiales pétreos son la costra negra, la pátina negra, la exfoliación y la pulverización.

Por otro lado, las bacterias heterótrofas pueden actuar mediante la secreción de ácidos orgánicos e inorgánicos, álcalis y la formación de dióxido de carbono sobre el carbonato cálcico del sustrato. En cuanto a la morfología propia de este tipo de alteración esta la costra negra, la pátina negra, la exfoliación, los cambios de color y las manchas.

Los actinomicetos son frecuentes sobre piedras en condiciones de elevada humedad y abundante materia orgánica. Su presencia en forma de pátina blanquecina suele confundirse con las eflorescencias salinas. Con los productos resultantes de su metabolismo (ácido carbónico, nítrico, sulfúrico) puede atacar la piedra calcárea y ciertos minerales (mica y ortoclasa) (Caneva, et al. 1994; Sameño, 2003).

7.2.3.2. ALGAS.

Las algas, organismos microscópicos y unicelulares, suelen desarrollarse sobre el sustrato pétreo o en su interior, agrupadas en colonias, aisladas o formando filamentos. Dos grupos claramente diferenciados, las Cianobacterias, cianofíceas o algas azules y las clorofíceas o algas verdes.

Los daños causados por las algas son esencialmente de naturaleza estética ya que macroscópicamente presentan un morfología en forma de patinas o manchas de diferentes colores y consistencias.

En países del norte de Europa es frecuente la presencia de algas en monumentos de soporte pétreo con orientación norte. El mecanismo de agresión es bipolar, por un lado la excreción de los ácidos orgánicos necesarios para solubilizar las sales inorgánicas del sustrato y, por otro lado, por la retención de humedad en superficie y de compuestos orgánicos que suponen el desarrollo de otros organismos heterótrofos.

Según la forma de colonizar el sustrato pétreo, se clasifican en recubridoras, perforadoras y corrosivas. Las algas recubridoras crecen sobre el sustrato, reteniendo humedad, esporas, suciedad y polvo, favoreciendo el asentamiento de otros microorganismos. En cambio, las perforadoras y corrosivas ejercen una acción mediante mecanismos químicos (excretan ácidos orgánicos: láctico, glicólico, acético...) y físico-mecánicos (producen micro-cavidades al contraerse y expandirse por captación o cesión de agua).

Unos autores las clasifican en epilíticas, que crecen sobre la superficie, y endolíticas, que colonizan en profundidad rocas translúcidas o semitranslúcidas (Caneva, et al. 1994).

La presencia de algas es indicador de la existencia de humedad. Requieren de la disponibilidad de calcio y magnesio por lo que muestran especial interés por las rocas calcáreas porosas. Dependiendo del pH del sustrato se desarrollarán unas u otras variedades algales, en rocas ácidas (granitos, gneis, rocas silíceas...) predominarán las silicotróficas, principalmente algas verdes, en cambio, en rocas alcalinas (mármoles, calizas...) serán colonizadas por algas calcitrófilas, principalmente algas azules (Caneva, et al. 1994).

Aunque las algas precisan de la luz del Sol para realizar la fotosíntesis, normalmente se encuentran en zonas no expuestas a los rayos ultravioletas y en lugares con abundante humedad y bajas temperaturas.

La presencia de algas sobre el material pétreo permite la proliferación de otros organismos que posean un mayor poder destructivo.

7.2.3.3. HONGOS.

Los hongos son organismos que colonizan principalmente las rocas ígneas, sin embargo existen especies que pueden desarrollarse sobre superficies salinas (eflorescencias) y otras se ven favorecida su proliferación debido a la presencia de deposiciones de aves.

Las condiciones que permiten el afloramiento óptimo de hongos son la presencia de oxígeno, la presencia de sustancias nutritivas, los altos índices de humedad relativa y las temperaturas cálidas.

Además del deterioro estético que presentan (excreción de productos, precipitación de óxidos de manganeso o hierro), también suponen una degradación química al generar CO_2 , HNO_3 y H_2SO_4 en su actividad metabólica, así como ácidos orgánicos del tipo oxálico, acético, etc. que pueden reaccionar con los cationes metálicos de las rocas. Mecánicamente, los cambios de volumen, la retención de agua, el propio crecimiento y la penetración de sus hifas provocan la progresiva disgregación del soporte pétreo.

Morfológicamente, la alteración biológica se manifiesta mediante manchas, punteaduras (pitting) y exfoliación.

7.2.3.4. LÍQUENES.

Los líquenes son organismos vegetales resultantes de la simbiosis entre hongos y algas o cianobacterias, concretamente entre un cianofito (bacteria/alga cianófila) y un ascomiceto (un hongo) que procesan los productos que aporta la atmósfera para convertirlos en alimento, segregando deshecho metabólicos que resultan agresivos para el sustrato

pétreo. Los talos superficiales contienen al alga y las hifas del hongo pueden penetrar profundamente en la piedra. Generalmente se desarrollan muy lentamente y suelen ocupar ambientes hostiles (deseccación y temperaturas extremas) para la mayoría de las demás formas de vida vegetal (García y Saiz, 1991).

El mecanismo de agresión de los líquenes concierne por un lado, a una acción química, derivada de sus productos metabólicos, fundamentalmente ácidos orgánicos (carbónicos, oxálico, cítrico, glucónico...) y liquénicos capaces de solubilizar el sustrato formando complejos quelantes (Jones y Wilson, 1985); Por otro lado, una acción mecánica disgregadora, resultante del crecimiento de la propia masa liquénica, en contacto íntimo con el sustrato, además de los cambios de volumen de sus talos en los períodos húmedo y secos, y por último, la alteración estética debida a una variación cromática del sustrato por el propio desarrollo de los líquenes.

Las variedades de líquenes que crecen sobre la piedra, líquenes saxícolas, pueden clasificarse, atendiendo a su morfología, en crustáceos, foliáceos, escumoso, y fructiculosos; y en función a su agresividad sobre el sustrato en que se asienta, en líquenes recubridores, perforadores y corrosivos. También se distinguen entre endolíticos (interior del pétreo) y epitelíticos (en superficie del pétreo) (ICR-CNR, 1985).

Los líquenes crustáceos crecen directamente sobre el sustrato, al que se sujetan firmemente con sus hifas, formando una masa compacta y adherida. Presentan un talo adherido al sustrato por la capa medular – médula-, sin córtex interior, por lo que las hifas penetran en el sustrato. Provocan un efecto degradante de carácter químico (producción de ácidos liquénicos) y mecánico (retracción y expansión de los talos). Por el contrario, protegen a la piedra del efecto perjudicial de los contaminantes atmosféricos.

Los líquenes foliáceos, a diferencia de los crustáceos, presentan córtex inferior adhiriéndose al sustrato mediante ricinas producidas por el hongo del liquen. Presentan talos ondulados y ligeramente acrecentados sobre el sustrato. La acción química es menos acusada, por el contrario, la agresión mecánica, debido a las ricinas, es mayor que la de los crustáceos (Tiano, 1986).

Los líquenes escumulosos son un caso intermedio entre los crustáceos y los foliáceos. Presentan talos con córtex poco desarrollados y poca presencia de ricinas.

Los líquenes fructiculosos tienen formas arbóreas, ramificadas con talos poco adheridos por un solo punto (disco de fijación) al sustrato, por lo que la agresión química es mucho menos acusada que en los anteriores casos. La agresión mecánica es similar a la que desarrollan los líquenes foliáceos. Las ramificaciones pueden ser cilíndricas o aplanadas.

Los líquenes crustáceos, en cuanto a su forma de anclaje al sustrato, resultan ser los más dañinos, pudiendo alcanzar grandes extensiones y profundidad en la penetración (± 10 mm) originando la decohesión de las rocas (mecánica = tensiones y química = reacciones y formación de nuevos productos).

La presencia de uno u otro biotipo dependerá de factores de tipo ambiental, como el agua, la luz, el viento, la temperatura, el tipo de sustrato y el grado de contaminación ambiental.

En general, en los sustratos calcáreos se desarrollan especies de líquenes calcícolas, mientras que en sustratos porosos aparecen especies endolíticas.

Respecto a la hipótesis defendida por algunos autores, de que la cobertura líquénica no es dañina, sino, por el contrario, protectora para la piedra, hay que observar que, en el caso de los materiales pétreos porosos, los líquenes pueden desempeñar una cierta acción protectora, reduciendo los daños producidos por el agua, el viento y los contaminantes atmosféricos.

7.2.3.5. PLANTAS INFERIORES (BRIOFITOS): MUSGOS y HEPÁTICAS

Los briofitos, que incluyen los musgos y las hepáticas, así como las plantas vasculares, crecen abundantemente cuando el sustrato y las condiciones ambientales son favorables.

Los musgos y las hepáticas precisan, para su crecimiento, unas condiciones ambientales y del sustrato óptimas, y esto es una presencia constante de agua, luz solar y un soporte previo de material disgregado

donde fijar sus primitivas rizoides (“raíces”) (García Murillo, 1995). Suelen poblar los soportes porosos permeables, generalmente morteros, donde existe un transporte de agua, sales en solución y, una superficie heterogénea que favorece la deposición de partículas de polvo, esporas, materia orgánica, etc.

Los musgos disponen, como fuente de energía nutritiva, las sales minerales y los aerosoles aportados por el agua de lluvia y las partículas de polvo precipitadas en el sustrato poroso (García Murillo, 1995). Ello se debe puesto que carecen de órganos que les permita la absorción de minerales del suelo y a que el contacto entre la planta y el sustrato está escasamente desarrollado.

Los musgos prefieren los sustratos calcáreos ya que el pH elevado de éstos ejerce una acción neutralizante frente a los contaminantes atmosféricos, al minimizar la sensibilidad de las especies calcícolas al SO₂, al ozono, fluoruros, metales pesados, etc. (Casas y Saiz, 1982).

La acción mecánica que se desprende por la presencia de musgos es mínima ya que suelen fijarse en las zonas descohesionadas siendo la penetración y las presiones mecánicas inapreciables. En cuanto a la acción química, presentan una capacidad elevada para extraer cationes debido a la mayor acidez de sus raíces. Finalmente, la alteración estética es la que se considera de mayor importancia, al presentar manchas enriquecidas de materia orgánica e inorgánica susceptibles de ser ocupadas por plantas vasculares con un poder lesivo más destructivo.

Los briofitos pueden ser clasificados a tendiendo a dos biotipos deferentes, los foliosos, que se adhieren al sustrato mediante rizoides, y los talosos, que siguiendo las mismas indicaciones que los anteriores, ejercerían una función protectora del sustrato al defenderlo de los efectos de la contaminación atmosférica (García y Saiz, 1991).

7.2.3.6. PLANTAS SUPERIORES.

El conjunto que comprende las plantas superiores se distinguen las que su ciclo corresponde a un período estacional, correspondiendo igualmente su actividad degradante con este período, y las permanentes, con crecimiento continuo y progresivo de sus raíces provocando presiones mecánicas sobre el material al cual están fijadas.

También se pueden diferenciar especies (herbáceas, arbustivas o arbóreas) en función del tamaño de sus raíces y la acción destructiva de éstas por su expansión mecánica en el soporte pétreo.

La presencia de las plantas superiores se debe, en la mayoría de los casos, al transporte de las semillas por la acción del viento y también, a la deposición de los excrementos de aves (con semillas no digeridas de los frutos) en zonas del sustrato donde se posan.

También suelen crecer, en aquellas zonas de fisuras o grietas donde quedan retenidas partículas orgánicas idóneas para alimentar la planta en su desarrollo.

El deterioro que causan las plantas superiores sobre el sustrato es, en primer lugar, de carácter mecánico debido a la presión ejercida por las raíces tanto en dirección longitudinal como radial; En segundo lugar, de carácter químico, debida al intercambio iónico producido en las raíces en contacto con el sustrato, unida a la acción quelante y ácida de las excreciones; Y en tercer lugar, una alteración de carácter estético, que impide la correcta percepción y lectura del conjunto monumental.

7.2.3.7. ANIMALES.

El principal grupo de deterioro de entre los diferentes seres del reino animal lo constituyen las aves, en particular la avifauna urbana, es decir, las palomas, siendo también frecuente, los murciélagos, las gaviotas y estorninos. Los daños son debidos principalmente a los hábitos que poseen y al elevado número de individuos que se encuentran en muchos monumentos.

Concretamente, la acción destructiva que ejercen estos seres vivos sobre el soporte pétreo se desprende de unos procesos químicos, mecánicos y estéticos. Desde el punto de vista químico, sus excrementos contienen ácidos (úrico, nítrico, forfórico, etc) y sulfatos, nitratos y fosfatos que son solubles en agua por lo que reaccionan con el sustrato generando otras sales y produciendo un efecto corrosivo para el soporte pétreo. Mecánicamente, los daños se desprenden debido a los roces, arañazos y picoteos, susceptibles de afectar a las zonas con escasa cohesión superficial. A ello se añade, la producción de nidos,

acumulación de desechos, residuos, excrementos etc. que suponen una grave alteración visual y formal.

Estudios demuestran que los excrementos de paloma funcionan como terreno de cultivo para diferentes microorganismos heterótrofos (bacterias, actinomicetos y hongos), capaces de ejercer, también, una acción perjudicial para la piedra (Bassi y Chiantante, 1976).

Por último, a través de los excrementos, las aves depositan sobre superficies pétreas afines (cornisas, estructuras, etc) las semillas no digeridas de los frutos que forman parte de su dieta. Otro camino de propagación de semillas, sería a través de las patas de las aves en las cuales quedan adheridas y transportadas a zonas donde arraigan si existe un suelo fértil.

En resumen, las superficies pétreas se pueden considerar como un sustrato donde se asientan distintas comunidades, sobre todo, cuando no se efectúan trabajos de limpieza y mantenimiento, ni se controla el crecimiento con algún tipo de biocida.



**INTERVENCIONES EN
MATERIALES PÉTREOS**

8. INTERVENCIÓN EN MATERIALES PÉTREOS.

8.1. INTRODUCCIÓN.

El deterioro de una roca comienza desde el momento en que se extrae de la cantera. Las alteraciones de los materiales pétreos expuestos a la intemperie se deben a procesos físicos, químicos y biológicos, entre los cuales figuran la disolución de carbonatos y sulfatos, la solubilización de silicatos, alteraciones por cristalización de sales y diferencias en las presiones de hidratación, y colonizaciones microbianas (Álvarez et al., 1994; Viles y Moses, 1996), y el efecto es mayor cuando estos fenómenos se dan de forma conjunta (Yates y Butlin, 1996; Warke y Smith, 1998).

La obra de arte como ente único y reflejo de una época vivida debe perdurar en el tiempo por delante de cualquier anomalía que la sucumbe a un proceso de desaparición.

La intervención de conservación y restauración en un monumento/obra de arte debe ser tratada de forma individualizada, cada obra presenta una problemática distinta que requiere unas técnicas y métodos de actuación diferentes ceñidas al estado específico de conservación.

La problemática que presenta una obra viene determinada, en la mayor parte de los casos, por el tipo de piedra utilizada, por la pátina (natural o artificial), por los recubrimientos originales y estratos de policromía, así como, por el estado de conservación que presenta.

También es importante tener presente, la localización y/o emplazamiento ocupado por el monumento/obra de arte que determinará la existencia de diferentes tipos de agresiones (contaminación ambiental: lluvia ácida, SO₂, CO₂...) alterando notablemente la pieza.

En toda intervención debe prevalecer como finalidad prioritaria el criterio de conservación. En algunos casos este principio de conservación se logrará con una mínima intervención, pero en otros casos se requerirá de una intervención de restauración más profunda llegando incluso a la sustitución de elementos y restitución de faltantes.

La intervención de restauración debe tener presente también las condiciones de funcionalidad y seguridad que se le pretende dar al monumento/obra de arte en el presente.

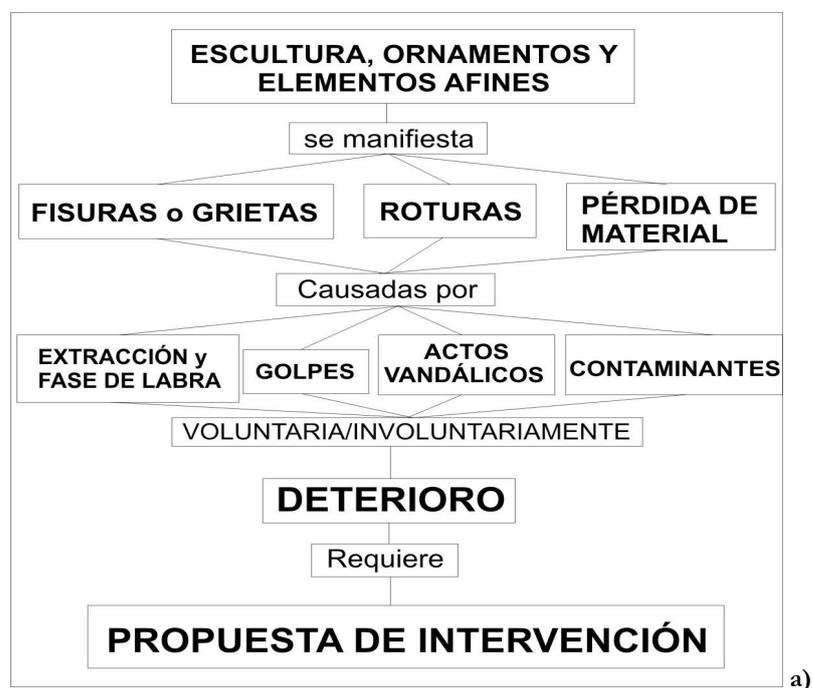
Como indica Cesare Brandi en su Teoría del Restauo, no podemos admitir un criterio único de actuación ante la obra de arte. No se puede simplificar el proceso en un decálogo de general aplicación, y pese algunas diferencias de criterio, los técnicos formados en la actualidad distan mucho de aquellos restauradores más o menos habilidosos que con anterioridad han venido actuando sobre las obras de arte apoyándose en conocimientos adquiridos de un modo meramente empírico. Actualmente, la restauración se entiende como una labor multidisciplinar, de manera que en las manos del restaurador confluyen toda una serie de trabajos previos en los que han participado químicos, físicos, geólogos, arquitectos, historiadores...

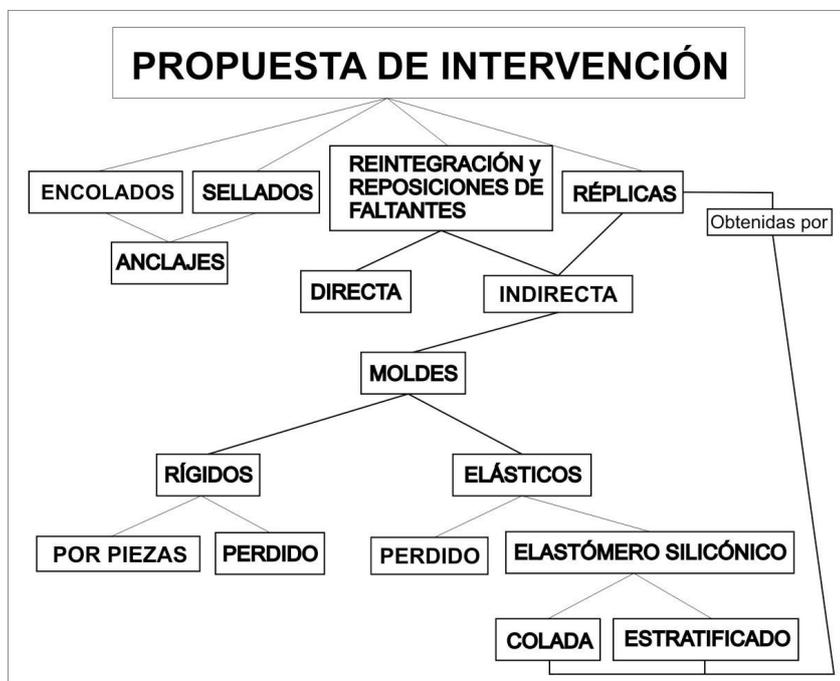
Toda restauración llevada a cabo en cualquier Monumento exige de una observación y reflexión particular que garantice la comprensión de las propiedades específicas de su deterioro, ya que, a partir del conocimiento de las causas que lo han producido y la historia material que ha atravesado (intervenciones de restauración anteriores) puede desarrollarse una actuación restauradora con garantías (García Gallego, J., 1994).

Por tanto, en la restauración de monumentos constituidos por material pétreo, además de conocer las características del material pétreo y su estado de deterioro, es necesario conocer los tratamientos, técnicas y materiales idóneos de restauración y conservación. En este campo encontramos que los trabajos más numerosos son los relacionados con el tema de limpieza de monumentos (Lazzarini, 1981; Centre Scientifique et technique de la Construction, 1978; Clarke, 1972; Vartic, 1973; Eisenberg, 1973) y consolidación/protección del material original (Marchesin y Valcanover, 1966; Benedetto, 1981; Laurenzi y Mecchi, 1985; Mora, 1969; Wheeler et al., 1984 y Oddy et al., 1976). Menos numerosos resultan los estudios relacionados con la reintegración

volumétrica de partes faltantes o colocación de estucos, fase ésta de la restauración llevada a cabo para rellenar la laguna carente de material, causante de la discontinuidad presente sobre la superficie de la piedra. De este modo, al realizar esta etapa, se reduce la posibilidad de adhesión de partículas atmosféricas contaminantes en estas zonas, de penetración de agua y de disoluciones agresivas, dotando al conjunto de una mayor coherencia e integridad que favorece su conservación óptima. La fase de estucado o reintegración volumétrica, se realiza utilizando estucos o morteros realizados con un material de carga “inerte” y un medio “ligante”. El resultado es un producto, generalmente formulado de forma empírica, con características de color, porosidad y resistencia mecánica muy similares a la piedra original. Algunos estudios basados en ensayos experimentales permiten una mayor aproximación a la idoneidad de los mismos (Rossi-Doria y Tabasso, 1982; Laurenzi y Sammuri, 1984 y Borelli et al., 1985).

8.2. TRATAMIENTOS Y MÉTODOS: Sellados/relleno de lagunas, Reposición/restitución y Réplica.





b)

Figura 8.1.(a-b). Mapa conceptual. Tratamientos y métodos.

8.2.1. SELLADOS y RELLENO DE LAGUNAS.

Cuando nos disponemos a intervenir una obra de arte de soporte pétreo, la obra en si posee, desde el principio de su creación en el trabajo de labra, toda una serie de alteraciones imperceptibles –pequeñas grietas, fisuras...- que empezarán a modificar la conservación de la piedra. Desde ese momento, la pieza sufrirá cambios de muy diversa naturaleza (ambientales, modas, ataques vandálicos, guerras, etc.) que fomentarán la degradación y perturbará la correcta lectura estética de la misma.

Por tanto, es frecuente, en esculturas, ornamentos y elementos afines, la presencia de fisuras, grietas, fracturas y lagunas de diferentes dimensiones, unas veces causadas por la vida material de la obra (golpes...) y otras veces, por la pérdida de material debido a su propio deterioro (desplacaciones, alveolización...).

El hecho de emprender la tarea de relleno de las zonas con falta de material pétreo original se debe a la posibilidad de reducir, primero, la entrada o posado de otras partículas perjudiciales y segundo, la vía de penetración de agua hacia el interior, con el consiguiente deterioro que ello conlleva.

En el caso de fracturas, puede ocurrir que exista pérdida o no de material. Si presenta una fractura de corte limpio sin pérdida de pétreo la tarea consistiría en una encoladura aplicando un adhesivo con buenas propiedades estructurales (Figura 8.2.); si por el contrario, la fractura presentara pérdida de material, se realizaría una primera encoladura y tras ello, el sellado, a partir de un mortero dosificado y rellenando las carencias de material (Figura 8.3.).

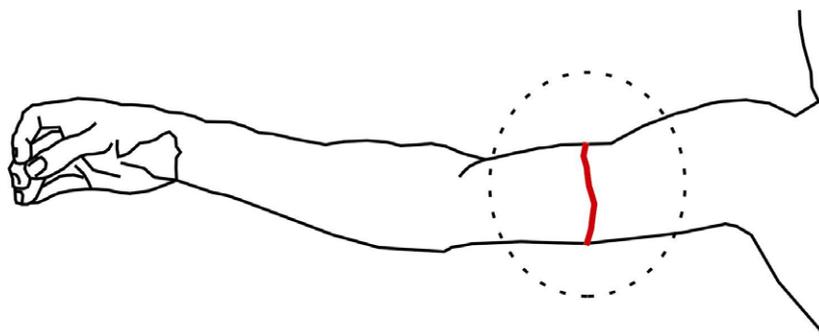


Figura 8.2. Esquema de una fractura limpia sin pérdida de material.

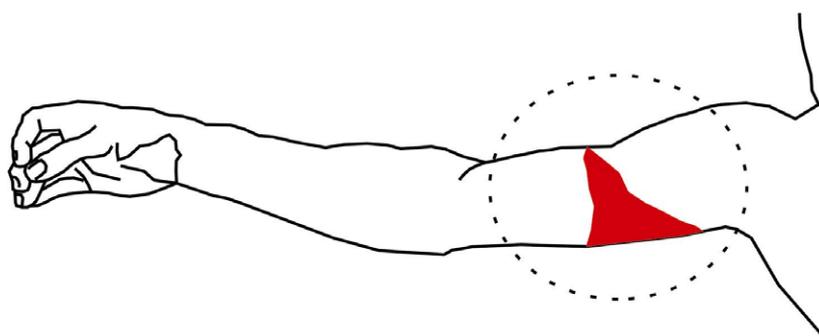


Figura 8.3. Esquema de una fractura con pérdida de material.

La finalidad de los sellados es, por tanto, de rellenar las grietas, discontinuidades, fisuras, lagunas, faltas... consiguiendo una uniformidad visual de la superficie pétreo y anulando la penetración de posibles contaminantes.

En muchos casos, es necesaria la inserción de pernos de refuerzo que mejoren la estabilidad, dureza y adherencia de la encoladura. Frente a los pernos de hierro que antiguamente se usaron con resultados poco afortunados, actualmente se pueden utilizar pernos de titanio, acero inoxidable, carbono, así como, burlones estriados de fibra de vidrio, con una amplia gama de grosores (Figuras 8.4. y 8.5.).

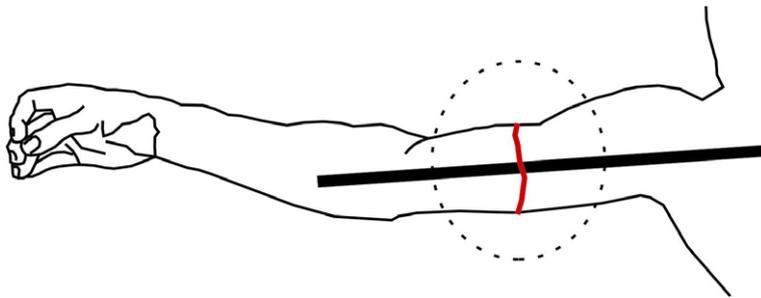


Figura 8.4. Esquema de una fractura limpia sin pérdida de material y refuerzo con perno de fibra de vidrio.

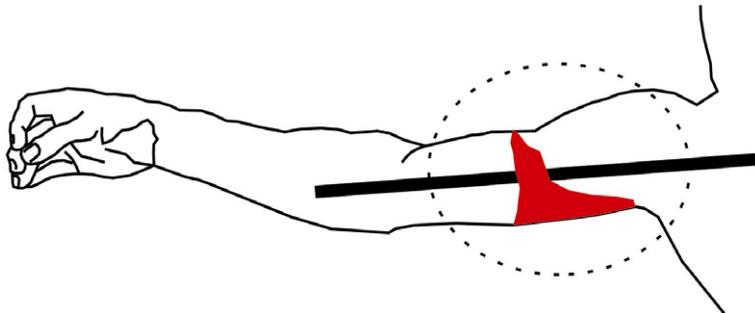


Figura 8.5. Esquema de una fractura con pérdida de material y refuerzo con perno de fibra de vidrio.

Los morteros empleados para los sellados y relleno de lagunas se obtendrán a partir de micronizados de la misma piedra o de cargas similares, combinados con el conglomerante (orgánico/inorgánico) y los

respectivos aditivos (pigmentos, retardadores, etc.). El tamaño de partícula del árido podrá variar en función de la porosidad, homogeneidad y color de la piedra, es decir, en todo momento, y dependiendo de la piedra original (porosidad, resistencias mecánicas, coeficiente de dilatación...) se tendrá en cuenta el tamaño y cantidad de micronizado incorporado para reproducir el original.

Los conglomerantes existentes son muy variados, podrán ser de matriz orgánica o inorgánica dependiendo del tipo de piedra a reproducir (textura cristalina o cementicia), así como de sus propiedades intrínsecas (color, porosidad, textura...). La relación árido-aglutinante (%) también será un parámetro a controlar. Un mortero con ausencia de porosidad, más que favorecer se convierte en un obstáculo contra el tránsito natural del vapor de agua de la piedra, evitando su "respirabilidad" (Lazzarini, et al. 1986).

La aplicación de los morteros para el sellado y relleno de lagunas se efectuará en una o dos operaciones, dependiendo del tipo de conglomerante y coeficiente de retracción del mortero elaborado. Es aconsejable que, en los sellados y relleno de lagunas que hayan de ser manipulados en acabados con textura de labra, repicado, escofinado... el nivel de relleno quede ligeramente recrecido (Figura 8.6).

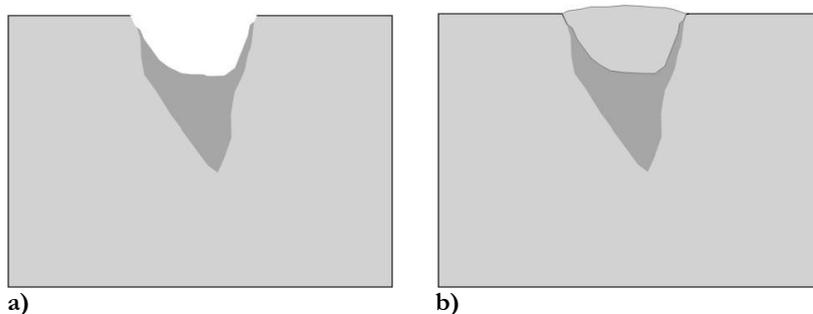


Figura 8.6.(a-b). Esquema de la aplicación de morteros para sellados y relleno de lagunas.

Como ya se indicó en el apartado 5.2.1. se tratan más exhaustivamente los diferentes componentes que conforman un mortero (conglomerantes, cargas, diluyentes, aditivos y las dosificaciones), las características de cada uno de ellos, los tipos más utilizados en

conservación y restauración, así como, las variantes realizadas para este trabajo de tesis doctoral.

8.2.2. REPOSICIÓN/ RÉPLICA.

Cuando hablamos de reposición, en términos generales, dentro del campo de los materiales pétreos, definimos la práctica que consiste en cambiar una piedra de edificación por otra, de aspecto y características petrofísicas acordes al edificio y ambiente donde se va a ubicar.

En el campo de la conservación y restauración de esculturas y ornamentos pétreos este término se teoriza mucho más. Bien es sabido, que la reposición es un tratamiento completamente reversible, que siempre permite un desmontaje posterior sin daño para el original.

La reposición de faltantes se justifica por la pérdida de material pétreo más o menos significativa que compromete seriamente la estructura formal (volumen) y la funcionalidad estética de la pieza (Roig, 1995, 2001).

En otras ocasiones, el deterioro del soporte pétreo de la obra es tan acusado que la consolidación es insuficiente o ni siquiera puede realizarse, recurriendo a una operación de sustitución. Esto será más imprescindible en aquellas zonas dañadas que ejerzan una función estructural.

Además, esta fase de reposición permite, en casos de elementos estatuarios-ornamentales deteriorados situados a la intemperie trasladarlos a zonas interiores –museos- con técnicas de acondicionamiento ambiental idóneas de conservación, y reemplazarlos por réplicas exactas.

Otras veces ocurre que, el sistema de reposición consiste en la reconstrucción de pequeños fragmentos mediante la aplicación de un mortero que se moldea y talla directamente “in situ” sobre la superficie de fractura, respetando completamente todas aquellas partes de los originales que se mantienen intactos (Figura 8.7.).

También existe la posibilidad, de reponer fragmentos de mayor tamaño mediante la técnica de la prótesis, es decir, se modela el

fragmento faltante (con arcilla, plastilina) sobre la superficie de fractura, después se realiza su positivado mediante la técnica del molde perdido (ver apartado 8.2.3. Tipos de moldes) y el mortero elegido para, finalmente, encolarlo a la zona de fractura mediante pernos de sostén (varillas de fibra de vidrio, titanio, ...) (Figura 8.8.).

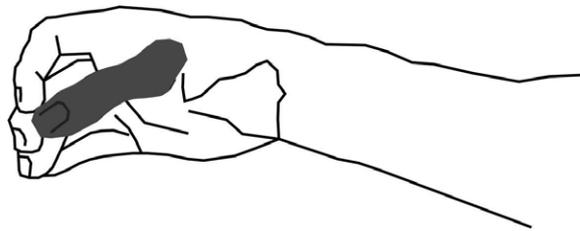


Figura 8.7.
Reconstrucción de un
fragmento de pequeño
formato.

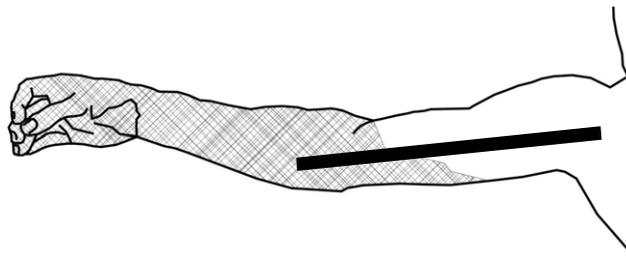


Figura 8.8.
Reconstrucción de
un fragmento de
mayor formato.
Prótesis.

Finalmente, encontramos casos en los que el deterioro es tal, debido a la exposición de la obra a la intemperie, que se requiere una fase de intervención total del monumento. (Pensemos en el deterioro sufrido por el friso oeste del Partenón desde 1802 a 1936). Es por tanto, cuando se hace imprescindible la realización de una réplica que conserve el original en condiciones controladas de preservación (Figura 8.9.).



Figura 8.9. (a-b).

a) Original;

b) Réplica total.

Se sabe que, en el Renacimiento, la tarea de realizar réplicas labradas para uso ornamental y académico se derivaba del gusto por las estatuas y bustos clásicos.

En el siglo XIX, la gran avalancha de descubrimientos arqueológicos y el abuso incipiente por el traslado de obras de antiguas civilizaciones clásicas, es el caso del Partenón, hacia museos, academias e instituciones europeas, promueve la creación de talleres de vaciados en escayola que desatan el intercambio de réplicas.

Estas réplicas se obtenían a partir de moldes de escayola por piezas, que respondían a un laborioso y delicado trabajo de artesano hecho que contribuyó a la formación de auténticos especialistas en este oficio. Sin embargo, esta técnica se descartó por el deterioro que sufrían los originales a causa del contacto directo de la escayola con ellos y, por la aparición de nuevos materiales.

No obstante, podemos reseñar los talleres de la Gipsoteca de Florencia, los talleres de vaciados de la Escuela Superior de Bellas Artes de Madrid, el taller del Museo del Louvre de París o el del British Museum de Londres, con moldes realizados sobre los frisos del Partenón considerados, hoy en día, Bienes Culturales (Giusti, et al. 1990).

La fase de réplica, reproducción, duplicado, facsímil, etc. es una operación que requiere un conocimiento exhaustivo del material del modelo, de las técnicas de reproducción, de los productos utilizados y sobretodo, de técnicos especializados en la materia.

Estas réplicas o restituciones pueden realizarse utilizando técnicas tradicionales de tallado en piedra y cantería (Figura 8.10.), o bien, mediante técnica de moldeo de elastómero silicónico y madreforma rígida de fibra de vidrio con resinas poliméricas (epoxi o poliéster).

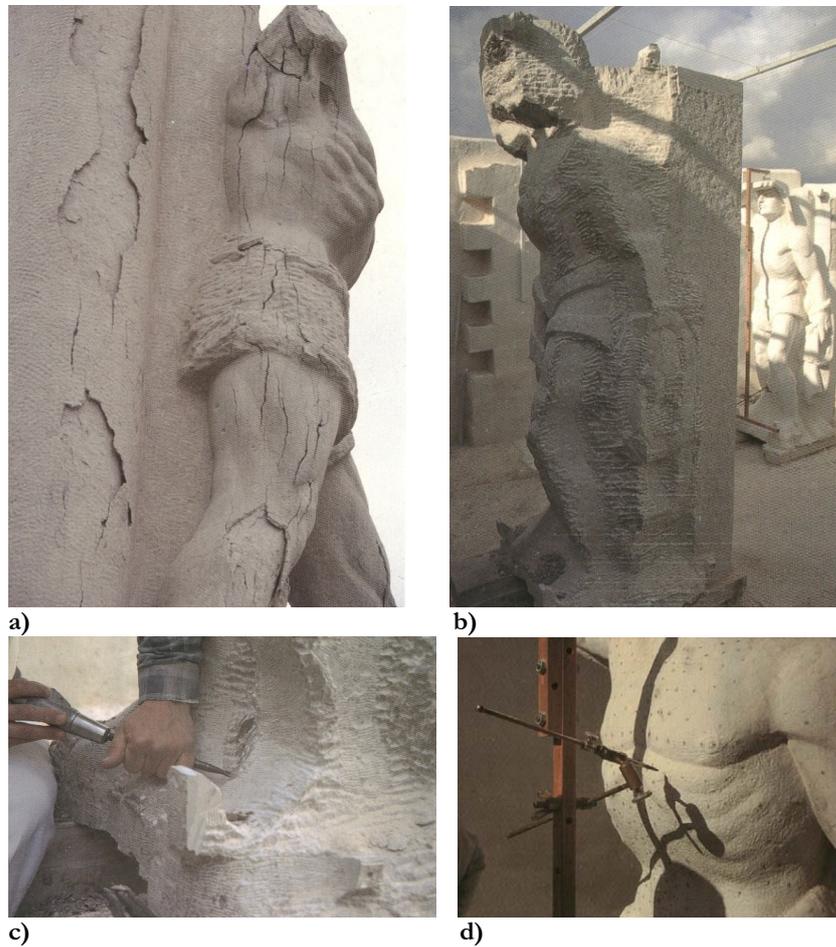


Figura 8.10.(a-d). Réplica. Técnica tradicional de talla de piedra por extracción de puntos.

Hasta hace poco tiempo venía considerándose la reproducción como una labor de segundo orden que apenas podía aportar algo al campo de la conservación-restauración, y se debía a dos poderosas razones: por un lado, el material utilizado, principalmente morteros de cal o cemento, que reproducía dada su frialdad, simplemente la forma, pero nunca la calidad expresiva del original; por otro lado, las técnicas empleadas hasta ahora, el molde tradicional de piezas de escayola o el de gelatina, entrañaban a veces, serios riesgos para los originales. Es el caso, de los desmoldeantes aplicados sobre las esculturas de piedra que frecuentemente ocasionaban manchas de grasa en superficie. Este es el porque de que no se aplicara con éxito en el campo de la conservación (García, 1994).

Actualmente, contamos con una serie de productos (elastómeros, resinas, refuerzos de fibra, etc.) cuyas características eliminan los riesgos para el original en cualquier operación de moldeo y permiten, además, alcanzar elevadas calidades en la impronta.

Los criterios que, de una manera general, ha de cumplir el material a sustituir son los que se citan a continuación (Godos, 1996):

-Completar la lectura del conjunto sin falsificaciones históricas ni reivindicaciones de nuevos elementos.

-Soluciones reversibles en la colocación de las nuevas piezas y el material, no dañinas para la obra original.

-Gran semejanza con la piedra original, en lo que respecta a color, textura y porosidad.

-Selección de piezas de calidad, tanto en piedra natural, como con morteros de reintegración pétreos. Si se estima conveniente se patinarán en superficie para alcanzar una similitud cromática con el original. Recomendable será, dejar documentación e informes de la intervención para futuras revisiones.

En ambos casos y a la hora de obtener un mortero de reparación, tanto en intervenciones de sellados, reposición y réplicas, tendremos en cuenta (Tabla 8.1.):

Tabla 8.1. Morteros de reparación.

MORTERO DE REPARACIÓN	
Según su localización	Interior
	exterior
Según su puesta en obra	In situ
	Sobre molde
Según el conglomerante principal	Cal
	Yeso
	Mixto
	Polímeros
Según el sistema de decoración	Sin color
	Pintado
	Pintado al fresco
	Tintado en masa
Según la textura	Lisa
	Rugosa: Martillina Abujardado Gradina Picado Pétreo
Según el modelo que imita	Piedras/mármoles
	Suntuarios
	Fábricas de piedra
Según el modelo de decoración	Molduras/ornamentales
	Esculturas
	Motivos en relieve

8.2.3. TIPOS DE MOLDES: RÍGIDOS y ELÁSTICOS

Son numerosos los materiales y técnicas con los que se pueden elaborar moldes en función de la intervención de conservación-restauración requerida. En esta tesis, se reseñarán solamente los moldes ensayados en las intervenciones que han posibilitado la obtención de reposiciones y réplicas a partir de los morteros compuestos experimentados. El resto de moldes se comentarán a grandes rasgos (Tabla 8.2.).

Tabla 8.2. Tipos de moldes.

TIPOS DE MOLDES			
RÍGIDOS		ELÁSTICOS	
Perdido	Por piezas	Perdido	Por piezas
Escayola	Escayola Resinas	Plastilina	Elastómero silicónico
			Colada Estratificado

8.2.3.1. MOLDES RÍGIDOS.

8.2.3.1.1. Molde perdido.

La elaboración de este tipo de molde, permite la reproducción de un único ejemplar del modelo original. Éste es modelado de antemano con materiales fácilmente destructibles (arcilla, plastilina o cera) que favorecen la íntegra impronta del molde.

Hay casos, en los que el modelo, ya sea corpóreo como relieve, presenta contrasalidas y entraña dificultades para la ejecución del molde, por lo que es necesario precisar las piezas necesarias dividiéndolo por partes y facilitando su posterior desglose.

El material por excelencia en la obtención de este tipo de molde es la escayola, puesto que permite una fácil destrucción del molde en la fase de desmoldeo tras su llenado.

8.2.3.1.2. Molde por piezas.

Existe otra técnica más sofisticada en la obtención de moldes rígidos en contraposición al molde perdido, aunque requiere de un mayor estudio del modelo y conocimiento de los materiales de moldeo. Se trata del molde por piezas, molde para no ser destruido y que permite la reproducción de varios ejemplares en función de su manipulación (Figura 8.11.a-c). Pueden utilizarse en la obtención del molde tanto materiales tradicionales (la escayola) como materiales de reciente incorporación en el mercado (resinas sintéticas, epóxi, poliéster...).



a)



b)



c)

Figura 8.11.(a-c). Modelo y su molde por piezas rígidas de escayola.

8.2.3.2. MOLDES ELÁSTICOS.

Dos son los tipos de materiales más empleados en la obtención de moldes elásticos. Por un lado, la plastilina, empleada en la obtención de moldes de pequeño formato y de rápida manipulación mediante la técnica del apretón, previa aplicación de un agente desmoldeante (talco, film, etc.) (Figura 8.12.).



Figura 8.12. Molde elástico por apretón de plastilina.

Por otro lado, el empleo de los elastómeros silicónicos, o siliconas vulcanizables, más sofisticadas en su técnica de aplicación, permiten el moldeo de cualquier tipo de modelo por medio de la técnica de colada o de estratificación. Además, requieren de personal cualificado para su manipulación sobre obra real.

Estas siliconas, se presentan en forma de pasta más o menos viscosa, que después de su vulcanización, se transforman en una masa elástica, flexible y resistente al desgarro. En función de la finalidad de aplicación, presentan diferentes colores.

Las siliconas comúnmente empleadas, en la elaboración de moldes en el campo de la Conservación-Restauración, son las que vulcanizan a temperatura ambiente por adición de un catalizador (Room Temperature Vulcanizing, RTV). Sin embargo, también las hay que vulcanizan en caliente (EVC).

Son muchas las propiedades que aconsejan el empleo de estos elastómeros (RTV), destacando su nula contracción, su viscosidad regulable y el control del tiempo de vulcanización. Además, los moldes

obtenidos pueden utilizarse a continuación de su desmoldeo, rasgo que las diferencia de los demás materiales de moldeo.

Pero, los dos aspectos a considerar y de mayor importante en la realización de un molde sobre un original serán, el conocimiento de la materia constitutiva de la obra y su estado de conservación (planteando la necesidad de cualquier intervención previa de limpieza o consolidación) y, la elección correcta del agente desmoldeante o separador en función de las características de la obra.

Finalmente, la realización del molde en una escultura corpórea u ornamento pétreos puede efectuarse a partir de dos procedimientos, por medio de la técnica de colada y, mediante la técnica de estratificación o impregnado, pero siempre en función de las características de la pieza original (tamaño, peso, tipo de material, etc.).

8.2.3.2.1. Molde por el procedimiento de colada.

Esta técnica de colada precisa previamente de la preparación de unas cajas de sostén que contengan el elastómero una vez vertido sobre el original. Dichas cajas soporte suelen fabricarse a partir de resinas sintéticas (epoxi, poliéster...) combinadas con tejidos o mats de diferentes gramajes, dotando al conjunto de resistencia, ligereza y durabilidad.

La pieza original se envuelve en su totalidad con un film protector. A continuación y dependiendo de la dificultad del elemento, se determinan las partes y juntas que formarán la totalidad del molde y contramolde. En función del número de partes delimitadas y de manera sucesiva, se irán recubriendo con placas de plastilina.

Cada una de las partes recubiertas de plastilina le corresponde una capa de material para obtener las cajas rígidas de sostén o contramolde (Figura 8.13.b) (generalmente el más utilizado es el poliéster reforzado con fibra de vidrio, aunque también puede usarse la escayola para modelos de menor tamaño).

Se aplican varias capas sobre la plastilina, intercalando entre ellas tejido o mat de fibra de vidrio (Figura 8.13.c-d). La cantidad de capas y el grosor de la fibra estarán en función del tamaño de las cajas. Para evitar

el descuelgue de la resina se aplica un aditivo en suspensión, generalmente sílice coloidal, con propiedades tixotrópicas.

Conseguidas las cajas-soporte, se abrirán sucesivamente por las juntas, en las cuales se habrán practicado unos orificios para su posterior acoplamiento (unión de unas cajas con otras mediante palometas roscadas) (Figura 8.13.e).

Una vez abierta la caja correspondiente, se retirará la plastilina y el film protector, se aplicará un agente desmoldeante/separador (vaselina, cera microcristalina, elastómeros fluorados, alcohol polivinílico, parafilms etc.) y se ajustará de nuevo la caja en su lugar, resultando un vacío entre el original y la caja soporte, sobre el que verteremos el elastómero silicónico (Figura 8.13.f-g). A cada caja de soporte le corresponde su propio vertedero, y las sucesivas coladas de elastómero tendrán lugar siempre que la anterior esté vulcanizada.

El agente separador debe reunir una serie de condiciones que no causen deterioro ni desvirtúen la lectura estética del conjunto: Absoluta reversibilidad, dúctil para extenderse con la misma consistencia y compatibilidad con el material de la obra y el elastómero.

Por sus características, se suele usar una silicona suministrada por la empresa Dow Corning, la Silastic RTV 3483/983, que combinada con el catalizador 83 al 5% crea una lechada semiespesa muy idónea para su colada. Sin embargo, también existe la firma Rhone Poulenc, que ofrece una amplia gama de productos con estas características.

Pasadas las 24 horas requeridas de vulcanización, se desmoldará, ajustando las diferentes partes de elastómero a sus correspondientes contramoldes y, montando, finalmente, el conjunto del molde (Figura 8.13.h).



a)



b)



c)



d)



e)

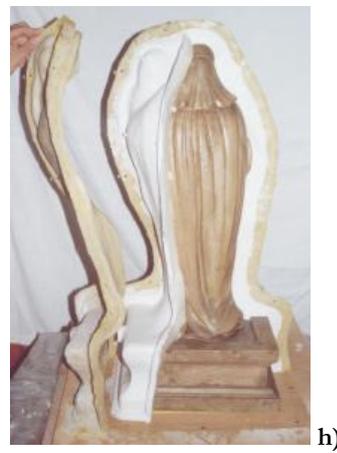


Figura 8.13.(a-h). Fases de realización de un molde elástico por el procedimiento de colada.

- a) General, Anverso de la pieza a intervenir.
- b) Fase envoltura con plastilina de la primera caja.
- c) Capa de fibra de vidrio Mat 300.
- d) Final de la segunda caja de plastilina.
- e) Estado final de las diferentes cajas de poliéster.
- f) Alisado juntura de la futura silicona.
- g) Vertido de la silicona en la primera caja.
- h) Apertura de las diferentes cajas con silicona.

8.2.3.2.2. Molde por el procedimiento de estratificación o impregnación.

La técnica de impregnación resultado de la aplicación de sucesivas capas de un elastómero de adición con propiedades tixotrópicas (antidescolgantes), supone la solución al problema derivado de la obtención de moldes in situ, en el monumento.

Las propiedades del producto manifiestan excelentes cualidades de trabajabilidad y puesta en obra, velocidad de vulcanización graduable en el tiempo, resistencia al desgarro, elasticidad, durabilidad, fidelidad en la impronta, etc.

La Rhone Poulenc ofrece una gama de productos con este tipo de propiedades, el elastómero RTV 584 y catalizador 84, la silicona de dispersión sin aceite Macro 2000, etc. También, la firma Dow Corning suministra elastómeros con semejantes propiedades tixotrópicas.

El procedimiento de impregnación o estratificación que todo seguido describiremos, se diferencia del procedimiento de colada detallado anteriormente, en que primero se aplica la silicona y a continuación se elabora el contramolde o cajas-soporte.

Este procedimiento de estratificación permite llevar a cabo la aplicación de sucesivas capas alcanzando el grosor deseado de la membrana en el tiempo de maniobra que se precise. Se pueden conseguir vulcanizaciones de hasta 1 minuto, dependiendo del tipo de catalizador adicionado.

La impregnación de la primera capa suele efectuarse con una viscosidad del elastómero baja, de manera que garantice la fidelidad de la impronta (Figura 8.15.b.) Las sucesivas impregnaciones actuarán como estrato de acoplamiento, estrato estructural (en el que podrán intercalarse refuerzos de velo o mats) y, finalmente, el estrato de nivelación, que facilitará la realización de los contramoldes o cajas soporte sobre la superficie (Matteini, et al., 1990) (Figura 8.14. y Figura 8.15.c).

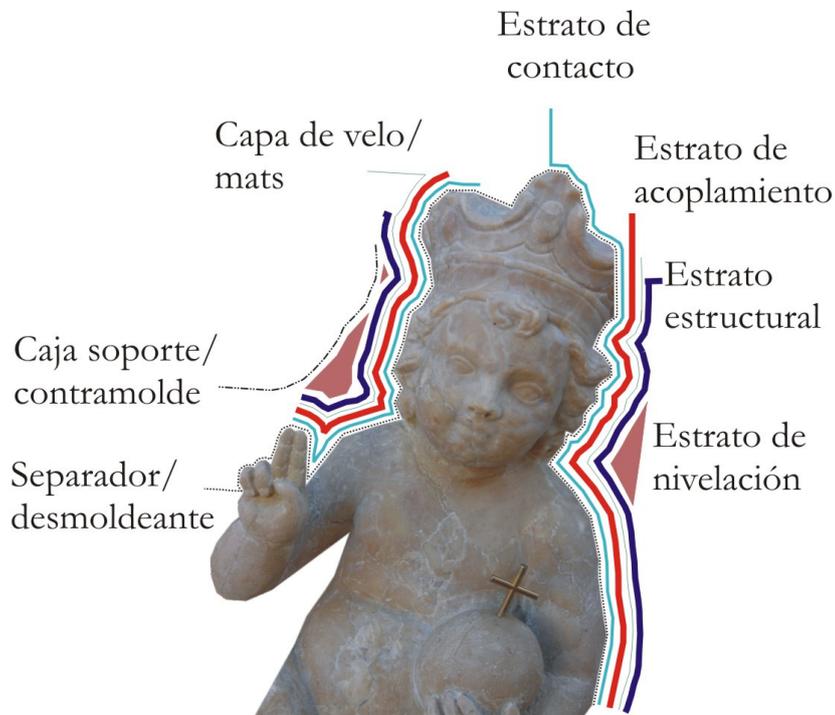


Figura 8.14. Capas que forman un molde de elastómero silicónico y caja soporte rígida de poliéster.

Las viscosidades variarán en función de los diferentes estratos y dependerán del tipo y cantidad de catalizador incorporado. En el estrato de nivelación se preparará el elastómero de manera que pueda aplicarse con espátula.

En el caso que la pieza fuese complicada en su volumetría y, requiriese 2 o más piezas, se dividiría la superficie del original con unos tabiques de plastilina en función de las juntas establecidas. Conforme fuesen vulcanizando las piezas de silicona, estos tabiques se irían retirando sucesivamente, entrando en contacto entre si las juntas de unión, previamente untadas con un agente separador (vaselina, cera microcristalina, aceites, etc).

Finalmente y antes del desmoldeo, se elaborarían las cajas-soporte o contramolde siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de los moldes por colada (Figura 8.15.d-f).



a)



b)



c)

- a) General, Anverso de la pieza a intervenir.
- b) Capa inicial de silicona tixotrópica.
- c) Capas de refuerzo de silicona tixotrópica.



d)



e)



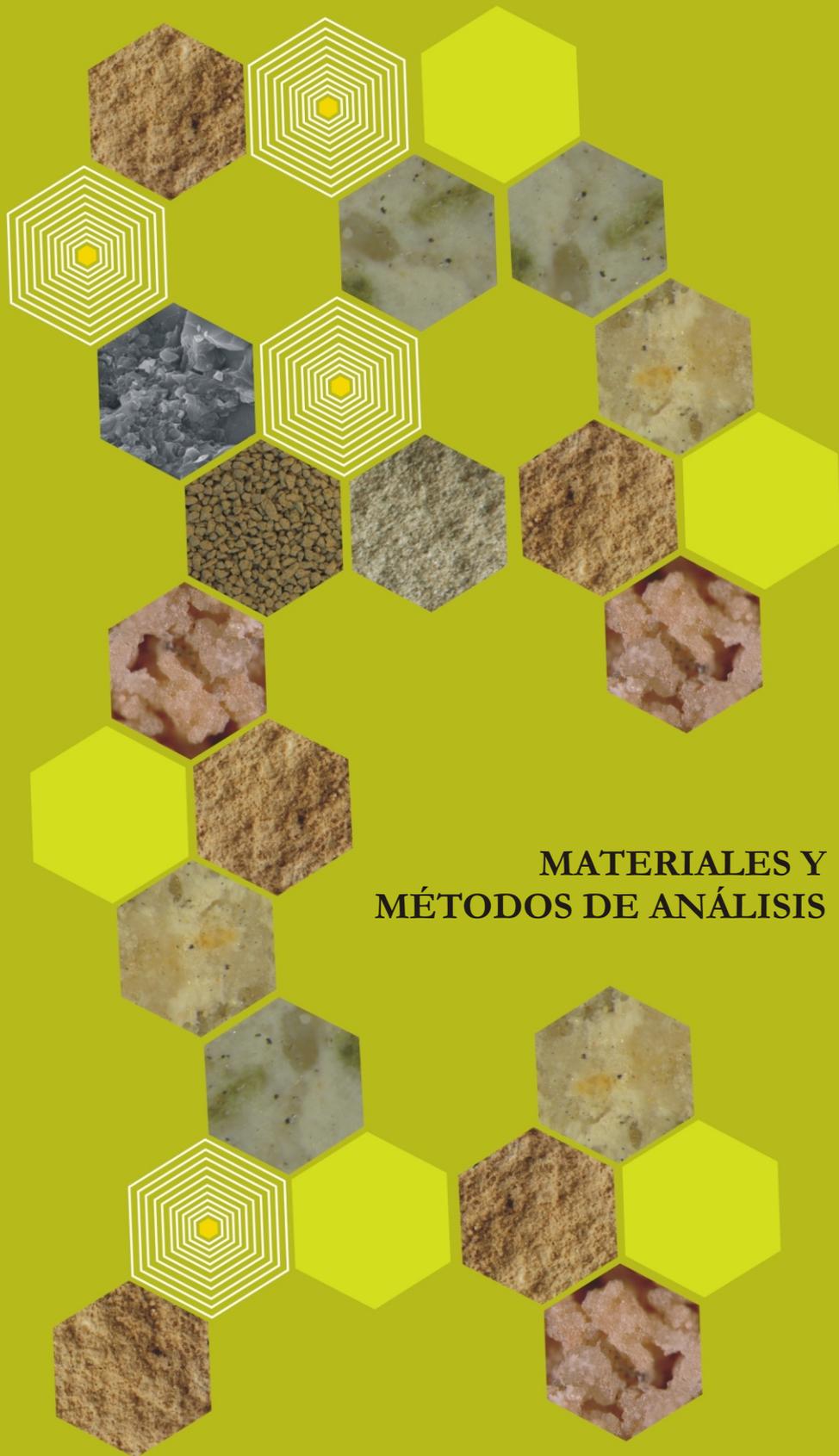
f)

d) Realización de la caja rígida de sostén de la silicona.

e) Estado final de las diferentes cajas de poliéster.

f) Apertura de las diferentes cajas con silicona.

Figura 8.15.(a-f). Fases de realización de un molde elástico por el procedimiento de estratificado.



**MATERIALES Y
MÉTODOS DE ANÁLISIS**

9. MATERIALES Y MÉTODOS DE ANÁLISIS.

9.1. Introducción.

El estudio científico de un monumento escultórico-ornamental requiere la aplicación de una serie de análisis para la caracterización de los materiales presentes en la obra y los procesos de degradación que sufren, así como de los materiales empleados en los procesos de conservación y restauración previos.

Una primera cuestión a resolver en todo estudio analítico de obras de arte es la elección de la estrategia de toma de las muestras del material a analizar ya que al ser obras únicas debe de limitarse a las partes menos significativas del objeto sin suponer una acción destructiva para el conjunto.

En el análisis de los materiales pétreos y en sus procesos de alteración se han venido aplicando una gran variedad de técnicas analíticas. La técnica más antigua, conocida como análisis por "vía húmeda", consistía en la disolución controlada de los componentes de la muestra a partir de sucesivos reactivos químicos que, por proceso de neoformación de compuestos, permitía la separación de los diferentes elementos presentes en la muestra.

A partir de los años 60 se han incorporado todo un amplio abanico de complejas técnicas de análisis como la microscopía electrónica de barrido (SEM) combinada con microanálisis de rayos X, análisis por microscopía óptica (LM), análisis por difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis térmico diferencial (ATD) y termogravimétrico (ATG), espectrofotometría, etc. que han permitido una mejor comprensión del comportamiento de los materiales empleados en los Monumentos Artísticos y sus procesos de deterioro.

Cada una de estas técnicas por separado posee unas ventajas e inconvenientes y proporciona diferente información analítica por lo que es preciso comparar los resultados obtenidos con las restantes técnicas.

En este capítulo se expone brevemente los principios y aplicaciones de las diferentes técnicas analíticas empleadas en la presente Tesis Doctoral. Estas técnicas se han empleado para caracterizar los morteros y corroborar los deterioros al someterlos a los distintos ensayos de envejecimiento artificial acelerado, así como los sometidos a envejecimiento natural. La instrumentación utilizada en este trabajo se enumera a continuación:

-Microscopía óptica (LM).

Investigación de los materiales pétreos, Tosca de Rocafort y Bateig.
Observación de la estructura porosa de las probetas de morteros ensayadas.

-Microscopía electrónica de barrido combinada con microanálisis de rayos X (SEM/EDX).

Estudio de la composición química y estructura de los pétreos, así como de los morteros ensayados.
Evaluación de ensayos de envejecimiento artificial acelerado.

-Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).

Evaluación de ensayos de envejecimiento artificial acelerado.

-Espectrofotometría-colorimetría.

Evaluación de la alteración de color en los morteros experimentales sometidos a ensayos de envejecimiento artificial acelerado.

-Tribología.

Evaluación de la cantidad de masa perdida de la probeta por acción del rozamiento o fricción en seco y en húmedo.

-Análisis de imagen.

Estudio de las propiedades del árido empleado en la preparación de las probetas de mortero.

-Viscosímetro.

Evaluación de la viscosidad (cSt) durante la preparación de las probetas de morteros.

A las técnicas analíticas previamente citadas hay que añadir una serie de instrumentos que han permitido la elaboración de los morteros y su envejecimiento artificial.

-Cámara de envejecimiento en atmósfera saturada de dióxido de azufre (SO₂).

Evaluación del comportamiento de los morteros pétreos compuestos sometidos a ensayo de envejecimiento acelerado en cámara con atmósfera saturada de SO₂.

-Cámara de envejecimiento por irradiación con luz ultravioleta.

Evaluación del comportamiento de los morteros pétreos compuestos sometidos a ensayo de envejecimiento acelerado en cámara de ultravioleta.

-Cámara de envejecimiento termohigrométrico.

Evaluación del comportamiento de los morteros pétreos compuestos sometidos a ciclos de temperatura y humedad controlada en cámara climática.

9.2. Microscopía óptica (LM).

Principios generales.

El microscopio óptico es una de las herramientas más empleadas y útiles en el campo de la Conservación y Restauración de materiales pétreos. Si se emplea la lupa binocular o microscopio estereoscópico pueden obtenerse niveles de resolución entre 6x y 80x. En el caso de microscopios con alto poder resolutivo, como es el caso del microscopio petrográfico (luz transmitida) o del metalográfico (luz reflejada o incidente), se alcanzan intervalos de 40x -600x. A estos microscopios se les puede incorporar un adaptador de cámara fotográfica, videocámara, etc.

La microscopía óptica proporciona una información general sobre el estado de conservación de los materiales pétreos, como es el tamaño de los poros, delaminaciones, grietas, presencia de heterogeneidades, etc.

Las técnicas microscópicas generalmente precisan, para su examen visual en sección de corte transversal o lámina delgada, la preparación de las muestras englobadas por medio de resinas sintéticas (Plester, 1956; Coremans y Thissen, 1959; Burlan y Pancela, 1982).

Instrumentación.

-Microscopio óptico marca Leica, modelo DMR con iluminación incidente y transmitida y sistema de polarización en ambos casos.

-Microscopio estereoscópico marca Leica, modelo GZ6, con sistema de iluminación por fibra óptica Leica CLS 100 y con zoom (6,7-40x).

-Sistema fotográfico, adaptable a ambos microscopios, Leica MPS 60.

9.3. Microscopía electrónica de barrido combinada con microanálisis de rayos X (SEM/EDX).

Principios generales

La microscopía electrónica de barrido es otra de las técnicas que pueden ser empleadas en la caracterización de los materiales pétreos, en el diagnóstico de sus procesos de deterioro y en el control de la eficacia de los tratamientos de limpieza, consolidación y protección (Lewin y Charola, 1972; Tite y Maniatis, 1975; Sabbioni, 1992).

El SEM permite obtener tanto una imagen de la superficie de la muestra con un alto rango de resolución (3,5 nm hasta 300.000x) como una información de los componentes químicos mayoritarios a través del microanálisis de rayos X por dispersión de energía.

A diferencia de la microscopía óptica, cuya fuente de iluminación es la luz visible, el SEM utiliza un haz de electrones que barren la superficie de la muestra. Este haz de electrones bombardea la superficie de la muestra, penetrando en ella a pocos micrómetros de la superficie. Durante su recorrido, los electrones interactúan con los átomos de la muestra y son dispersados.

Como consecuencia de ello, el microscopio electrónico de barrido genera diferentes tipos de señales como son los electrones retrodispersados, electrones secundarios, emisión de rayos X, etc. Estas señales revelan la topografía y la composición química del material ensayado. La profundidad de penetración de los electrones depende de la energía del haz de electrones primarios (E_0) y del número atómico (Z) de la muestra. Ello se traduce también, en el diferente contraste de las imágenes adquiridas, es decir, las zonas oscuras correspondería a los elementos con número atómico más bajo y las brillantes a los elementos con número atómico elevado (Ortega y De la Torre, 1996; Aballe y López, 1996; Barba, 1996).

En la preparación de las muestras es preferible prepararlas en forma de sección de corte pulido, englobadas a partir de resinas, como se

mencionó anteriormente, o bien, pueden ser examinadas a partir de las superficies de rotura.

Las muestras antes de su introducción al microscopio electrónico de barrido se recubren con una película conductora metálica (generalmente, oro o paladio) o de carbono, evitando con ello una baja conductividad de las muestras y obteniendo imágenes con una buena calidad y resolución. Esta película conductora debe ser continua y que recubra todas las partes de la muestra para facilitar su iluminación con el haz de electrones.

El microanálisis de rayos X es el resultado de la combinación de la microscopía electrónica de barrido con la espectroscopia de rayos X por dispersión de energía. El mecanismo de microanálisis se sintetiza en una emisión de rayos X resultante de la focalización del haz de electrones sobre la zona de la muestra a ensayar. De esta manera se identifican los componentes químicos presentes en esa área concreta de la muestra.

El empleo de esta técnica de análisis en materiales pétreos, se describe en numerosos textos de investigación, citaremos entre los más destacados los estudios de Van Grieten et al., (1990), de la Torre et al., (1992), Cereceda et al., (1992) y Alessandrini et al., (1993); también se encuentran trabajos en los que se identifican diversas alteraciones producidas en los materiales pétreos (Alonso et al., 1992; Duran et al., 1993), sustancias contaminantes presentes en monumentos (Del Monte, 1990; Sabbioni, 1992), seguimiento de tratamientos de limpieza (Kouzeli, 1992) y consolidación (De Witte et al., 1985) e identificación de microorganismos y vegetales superiores, agentes todos ellos de biodeterioro de monumentos (Laborda et al., 1994; Urzi et al., 1994).

Instrumentación

-Microscopio Electrónico de Barrido Jeol JSM 3600 con sistema de microanálisis de rayos x Link-Oxford-Isis, operando con voltaje de 20 kV, una corriente de haz de $2 \cdot 10^{-9}$ A y una distancia de trabajo de 15 mm. Las muestras se sometieron ha sombreado con oro para la obtención de imágenes y mappings y, a sombreado con carbono en la obtención de microanálisis de rayos X.

9.4. Espectrofotometría-colorimetría.

Principios generales

La colorimetría viene constituyendo desde décadas recientes una importante herramienta al servicio de la conservación y restauración de obras de arte. Antes de que se desarrollasen estos métodos instrumentales altamente sensibles y con elevado poder de resolución, las cualidades cromáticas de los materiales integrantes de objetos artísticos se determinaban de manera visual, con todas las limitaciones y carácter subjetivo que este método entrañaba.

Los actuales colorímetros y espectrofotómetros proporcionan información cromática objetiva altamente fiable, permitiendo la determinación de las coordenadas cromáticas del objeto con diversos tipos de iluminantes y pudiendo operar "in situ" con todas las ventajas que ello comporta en el estudio de materiales pétreos evitando, en la mayor parte de casos, innecesarias y destructivas extracciones de muestras.

Desde la aparición de los actuales métodos colorimétricos instrumentales, se han desarrollado todo un conjunto de métodos más o menos empíricos que han tenido aplicaciones en el campo de la conservación y restauración de obras de arte. Señalaremos, en primer lugar la NOTACION MUNSELL considerada como un lenguaje universal de colores, consistente en una nomenclatura empleada para designar sustancias coloreadas utilizadas en el Arte y en la Industria, establecida a partir del espacio de color tridimensional de Munsell. Dicho sistema espacial se divide en 267 bloques definidos por sus valores de tono, brillo y saturación. Este sistema ha sido establecido por la "Inter-Society Color Council" y el "National Bureau of Standards" de USA y aparece publicado en "Color: Universal Language and Dictionary of Names" K.L. Kelly and D.B. Judd. El nombre de color universal se establece a partir de la notación Munsell correspondiente a cada pigmento. Esta última se obtiene por comparación directa con el Munsell Book of Colors (Carta Munsell de colores). Otros sistemas de especificación del color que se viene utilizando dependiendo del objetivo con el que se realice la determinación del color son el Diagrama CIE y el Ostwald.

Las Cartas de Color y más concretamente la Carta Munsell de colores ha tenido muy interesantes aplicaciones en estudios de restauración relativos a envejecimiento de materiales polímeros utilizados como agentes protectivos y consolidantes de objetos artísticos. Mencionaremos los trabajos de Francovich (1979) que utilizan estas Cartas para la identificación de fragmentos de cerámica arqueológica procedentes de un horno medieval de Nicchio de Siena y más recientemente aplicadas a la caracterización de materiales pétreos destacaremos los trabajos de Esbert, et al. 1990.

El uso de técnicas instrumentales, sin embargo, se ha impuesto rápidamente por el mayor nivel de confianza que confieren al método, puesto que en ellas se elimina completamente la subjetividad que introduce la utilización del ojo humano en la evaluación final del color. Santini en 1955 ya aplica métodos instrumentales espectrofotométricos a la determinación de la gama cromática de diversas obras de caballete, destacando la Tabla de Giusto di Gand (Cristo Bendicente). Las medidas realizadas antes y después del proceso de limpieza hacen de este trabajo una de las primeras aplicaciones a la restauración de obra pictórica. Mencionaremos los trabajos de San Andrés y Tijero (1990) en el estudio de procesos de amarilleamiento de barnices y fijativos por exposición a la luz ultravioleta y el de Tennent y Townsend (1984) sobre procesos de alteración fotoquímica de colorantes dispersados en resinas de poliéster, acrílicas y epoxi. En el campo de la restauración de materiales pétreos señalaremos el trabajo de Tabasso y Mecchi (1992) y, el de Winkler (1978).

El interés de un estudio colorimétrico en el presente trabajo queda plenamente justificado si se considera la importancia capital que posee el impacto cromático que producirá la intervención de sellados, reposiciones y réplicas con los morteros experimentados en el monumento. De este modo, el estudio colorimétrico se ha dirigido a la determinación del impacto cromático de los morteros sometidos a un envejecimiento artificial acelerado.

Instrumentación.

Las coordenadas cromáticas obtenidas sobre la superficie uniforme de las probetas han sido obtenidas mediante un espectrofotómetro Minolta CM-2600d, eligiendo como condiciones de medidas el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de

color 6500° K) y el observador estándar 10°. Los datos se han tomado con componente especular incluida (SCI), que minimiza la influencia de las condiciones de la superficie de medida y con componente especular excluida (SCE), que corresponde más cercanamente a la evaluación visual profesional. En dicho medidor, se ha elegido el área de medida de 3 mm Ø, siendo su geometría de medida difusa ocho (d/8). La fuente de luz está formada por tres lámparas de xenón pulsante, estando su esfera integradora (de 52 mm de Ø) recubierta de BaSO₄. Su rango de longitud de onda está comprendido entre 360 y 740 nm, cada 10 nm, siendo su rango fotométrico de 0 al 175 % de reflectancia, con resolución 0,01 %. En cuanto a su repetibilidad presenta una desviación estándar de 0,1 %, en reflectancia espectral, y, 0,04 para los valores colorimétricos de ΔE^*_{ab} (CIE 76). En cuanto al espacio de color, se ha adoptado el CIELAB, por ser un sistema indicado para la medida de fuentes secundarias, así como por su uniformidad, lo que facilita enormemente la comparación de resultados.

La variación del color total (ΔE^*) se ha calculado de acuerdo con la fórmula expuesta a continuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$$\text{siendo: } \Delta L^* = L^*_{final} - L^*_{inicial}$$

$$\Delta a^* = a^*_{final} - a^*_{inicial}$$

$$\Delta b^* = b^*_{final} - b^*_{inicial}$$

9.5. Análisis de imagen.

Para caracterizar de una forma más precisa el tamaño de partícula de los áridos de Tosca de Rocafort y Bateig obtenidos, se ha efectuado una medición del área de la sección máxima de una muestra representativa correspondiente a cada una de las fracciones.

Instrumentación

El estudio estereológico se ha llevado a cabo mediante un microscopio estereoscópico Leica SME, obteniéndose imágenes que posteriormente han sido procesadas con un programa de Análisis de Imagen Leica Q 500 MC. La resolución de las imágenes fue de 512x512 píxeles con un intervalo de nivel de gris comprendido entre 0 y 255 y, un intervalo de nivel tono entre 0 y 254.

9.6. Viscosimetría.

La viscosidad del mortero es, en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, uno de los parámetros más importantes para evaluar la capacidad que posee el fluido –aglutinante- para englobar la carga de árido.

Se definen dos tipos de viscosidad, la *viscosidad dinámica*, normalmente, expresada en poise (P) o centipoise (cP, donde 1 Cp = 0,01 P), o en unidades del Sistema Internacional como pascales-segundo (Pa-s, donde 1 Pa = 10 P), y la *viscosidad cinemática*, que es la viscosidad dinámica dividida por su densidad, ambas medidas a la misma temperatura. Las unidades más comunes para expresar la viscosidad cinemática son stokes (St) o centistokes (cSt, donde 1 cSt = 0,01 St), o en unidades del Sistema Internacional como milímetros cuadrados por centímetro (mm^2/s , donde $1 \text{ mm}^2/\text{s} = 1 \text{ cSt}$).

Instrumentación

Viscosímetro rotacional Visco Star Plus R suministrado por FUNGILAB S.A. La lectura de los parámetros de medida (velocidad, tipo de husillo, viscosidad, temperatura, densidad, datalogger, etc.) se visualiza directamente en pantalla LCD.

9.7. Determinación de densidades.

Principios generales

La balanza electrónica de precisión es fundamental en la realización de cualquier tipo de ensayo que requiera un rigor de masa. En

esta Tesis ha sido esencial el empleo de la balanza de precisión, tanto en la elaboración de las probetas de mortero, como en la obtención de los resultados tras someterlas a ensayo. En tres casos en particular, en la determinación de los parámetros de densidad real, densidad aparente y porosidad abierta, se ha utilizado la balanza de precisión, y se la dotado de un dispositivo que ha permitido la pesada hidrostática, siguiendo las Recomendaciones de ensayo R.I.L.E.M.-I.2 (1980) (Bulk densities and real densities) y R.I.L.E.M.-I.1. (1980) (Porosity accessible to water) respectivamente.

Instrumentación

Balanza de precisión electrónica modelo ST-1200 suministrada por Gram Precisión SL. con capacidad máxima de 1200 g. y mínima de 500 mg; escalón de verificación de 100 mg y rango de tara de -1200g.

9.8. Tribología.

El término “tribología” fue empleado por vez primera el 9 de Marzo de 1966, en un informe de la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de Gran Bretaña. En este informe ya comenzaba a reconocerse el carácter multidisciplinar de esta ciencia, en la que, entre otras, participa la física, la química, la metalurgia, la economía, la ciencia de los materiales, la matemática y la computación.

La tribología es la ciencia y técnica que estudia la interacción entre superficies en movimiento y los problemas relacionados con ellos: desgaste, fricción, adhesión, etc.

La fricción queda definida como la resistencia al movimiento que existe cuando un objeto o partícula sólida se mueve tangencialmente con respecto a la superficie de otro sólido con el que está en movimiento.

En este apartado, con el empleo del tribómetro evaluamos el desgaste que sufre la superficie del material bajo parámetros controlados de temperatura, humedad, fuerza de fricción, tiempo, recorrido de rozamiento etc. tanto en ambiente seco como mojado (lubricado con agua). Con ello simulamos los agentes ambientales, tales como el viento, el agua y las partículas en suspensión, que someten a los materiales

pétreos a un constante estrés estructural y de superficie conllevando una modificación de sus propiedades.

Instrumentación

Conjunto tribómetro MICROTTEST tipo PIN-ON-DISK modelo MT2/60/SCM/T para medidas de fricción y rozamiento con radio friccional variable por ordenador y con sistema de lubricación. Fuerza tangencial hasta 60 N. ([www. microtest-sa.com](http://www.microtest-sa.com)). Norma ASTM International G99-03 “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus” o la DIN-50324 “Testing of Friction and Wear”.

9.9. Envejecimiento en atmósfera saturada con SO₂.

Principios generales

La contaminación atmosférica, junto con los agentes meteorológicos, multiplica enormemente la velocidad de deterioro de los materiales pétreos. Los contaminantes más peligrosos, desde ese punto de vista, son gases ácidos capaces de reaccionar con los componentes de la piedra.

Inicialmente las investigaciones se centraron exclusivamente en el anhídrido sulfuroso que, bien en la atmósfera, bien en la piedra, puede transformarse en ácidos sulfuroso o sulfúrico, que reacciona con el carbonato cálcico (Villegas et al., 1993; Rivas et al., 1997). Recientemente, se han llevado a cabo algunos ensayos en los que se estudia el efecto de otros contaminantes: ácido fluorhídrico (Cortes et al., 1979), óxidos de nitrógeno o hidrocarburos (Vale, 1982), amoníaco (Villegas, 1985), ácido nítrico (Sikiotis et al., 1994) y atmósfera oxidante con óxidos de nitrógeno, ozono y anhídrido sulfuroso (Martínez-Ramírez et al., 1996).

Las concentraciones de anhídrido sulfuroso utilizadas oscilan entre pocas partes por millón hasta 10.000, en función del grado de aceleración deseado.

En los últimos años se han desarrollado numerosas instalaciones que permiten la generación de atmósferas contaminadas, controlando

todas las variables ambientales de temperatura, humedad relativa, concentración de gases contaminantes y, permitiendo también, el empleo de radiación UV (Riecken et al., 1995; Martínez- Ramírez, 1996).

Instrumentación

Cámara de corrosión en atmósfera saturada con dióxido de azufre según DIN-50.018 (Test de Kesternich), modelo VCK-300 de DYCOMETAL.

9.10. Envejecimiento por irradiación con luz ultravioleta.

Principios generales

Los ensayos de radiación están orientados a determinar el efecto de la radiación UV sobre los materiales, especialmente los tratamientos de tipo orgánico. La radiación utilizada es exclusivamente la ultravioleta, con energía suficiente para alterar sólo determinados enlaces químicos presentes en los compuestos orgánicos.

En numerosos casos el ensayo consiste en someter las muestras a radiación UV durante períodos prolongados de tiempo, oscilando desde pocos días hasta un mes (Oliveira et al., 1996; Alessandrini et al., 1996). En otras ocasiones se combina el efecto de la radiación con los ciclos termohigrométricos (Kumar et al., 1995).

Instrumentación

Lámpara fluorescente tipo OSRAM L36/37 que emite la luz UV con la potencia de 36 w y un máximo entre 350 y 400 nm, a una distancia de 20 cm.

9.11. Envejecimiento acelerado térmico.

Principios generales

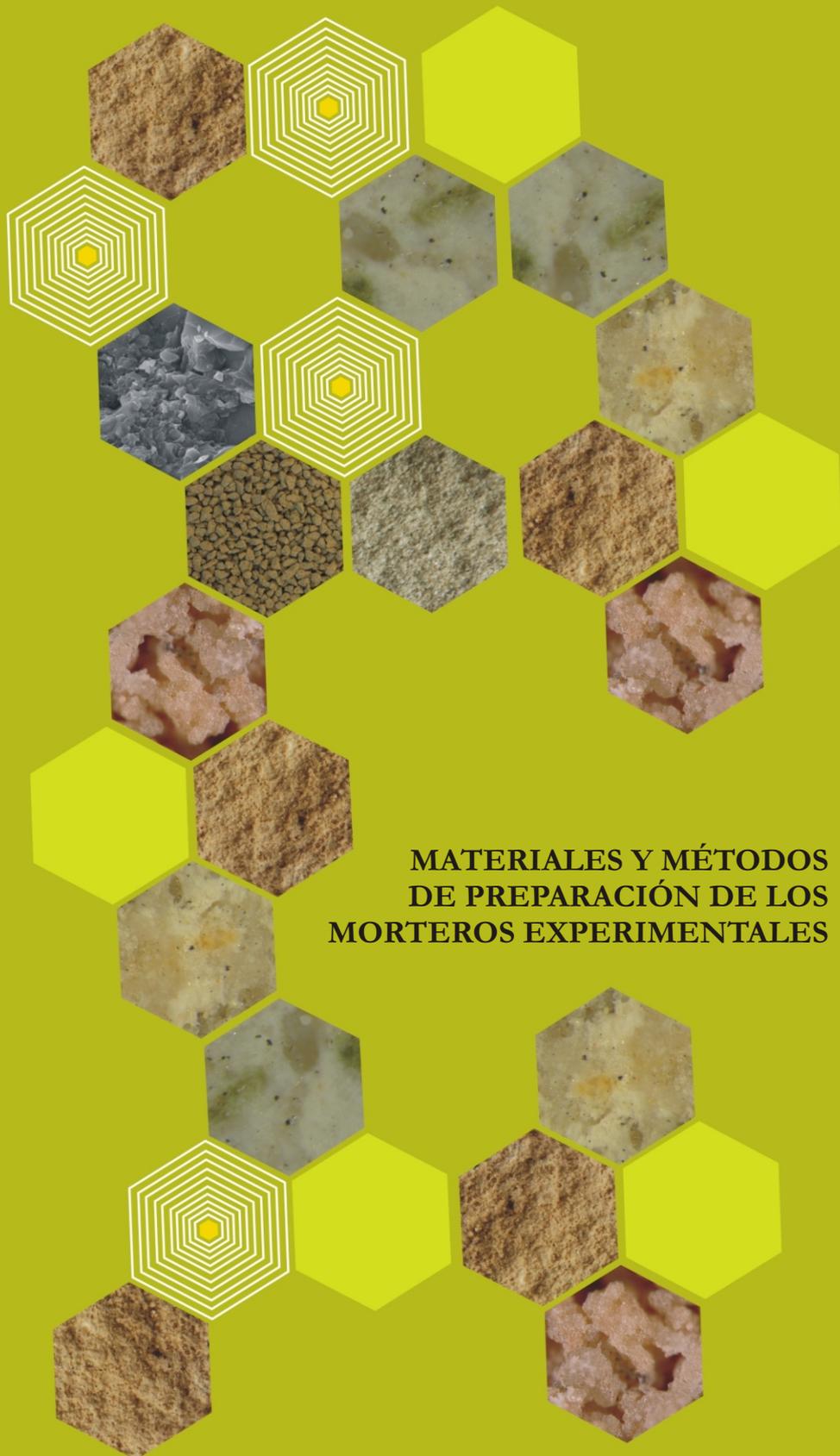
El ensayo simula las variaciones del estado de humedad de la roca con los cambios climáticos, ensayo termohigrométrico (Álvarez de Buergo, et al., 1992, 1994; Ferreira et al., 1994; Kumar et al., 1995;

Pombo et al., 1997), se realiza en el laboratorio sometiendo a los morteros a condiciones de temperatura y humedad controlada en cámara climática.

Las propiedades de los morteros (color, brillo, saturación, resistencias mecánicas, etc.) varían en función de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, radiación), siendo estos cambios más significativos en aquellas zonas con ambientes húmedos y cálidos (De Castro, 1980; Davis, et al. 1983).

Instrumentación

Cámara climática Dycometal DI-100 con rango de temperatura entre -25°C-150°C y rango de hR entre 15-98%. Gradientes de refrigeración y calentamiento de 1 y 2°C/minuto respectivamente.



**MATERIALES Y MÉTODOS
DE PREPARACIÓN DE LOS
MORTEROS EXPERIMENTALES**

10. MATERIALES Y MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE LOS MORTEROS COMPUESTOS EXPERIMENTALES.

10.1. Introducción.

En este trabajo se han utilizado tres tipos diferentes de conglomerantes, dos sintéticos u orgánicos y, uno, de origen inorgánico, combinados con dos tipos de materiales pétreos, la Tosca de Rocafort y la Bateig Crema. Además se han empleado tres tipos de aditivos, un retardador del fraguado (para el caso de los morteros cal-yeso), un reforzador-retardador (también para el caso de los morteros cal-yeso) y biocidas. En la Tabla 10.1. se resumen los tipos de morteros experimentales propuestos.

Tabla 10.1. Tipos de morteros compuestos ensayados en función del conglomerante.

MORTEROS COMPUESTOS	
Conglomerante inorgánico	Mixto o bastardo: Cal y yeso Álamo 70 + árido TR/BC
Conglomerante orgánico	Resina acrílica + árido TR/BC
	Resina poliéster + árido TR/BC

En los sucesivos apartados se presenta, de manera pormenorizada, todos los materiales empleados y los pasos seguidos en la preparación de los citados morteros.

Cabe destacar la importancia que tienen los parámetros de temperatura y humedad en la preparación de los morteros, de manera que, dependiendo de las características del lugar de trabajo, las propiedades de manipulación variarán.

10.2. Materiales componentes.

Los productos comerciales seleccionados en la presente investigación son: la resina de poliéster ESTRATIL AL 100, suministrada por la casa Cray Valley Iberica S.A., la resina termoplástica Plasticrete P-Cast a 02, suministrada por la casa Camattini spa y de reciente aparición en el mercado, la cal aérea natural a base de hidróxido

de calcio, suministrada por CTS España y, la escayola Álamo 70 proporcionada por A.G.M. valenciana (Figura 10.4.).

Resina de poliéster ESTRATIL AL 100: Se trata de una resina de tipo semirígido, con una reactividad media y que, con la adición de un acelerante (octoato de cobalto) y un iniciador de reacción (peróxido de metiletilcetona), polimeriza a temperatura ambiente. Las características de dicha resina se detallan en la Tabla 10.2.

Tabla 10.2. Propiedades de la resina de poliéster ESTRATIL AL-100.

ESTRATIL AL 100	
Contenido en monómero (estireno)	33%
Viscosidad a 25° C (PNE-53 344)	5 DPa.s.
Peso específico a 25 °C (UNE 48 098)	1,12 g/cm ³
Resistencia a la tracción (UNE 53 023)	60 Mpa
Resistencia a la flexión (UNE 53 022)	110 Mpa
Extracto seco	67 %
Contracción	7 %
Elongación a la rotura (UNE 53 023)	1,8 %
Módulo de flexión (UNE 53 022)	4500 MPa

Resina acrílica PLASTICRETE P-CAST A 02: Se trata de una resina acrílica comercializada como emulsión acuosa que al endurecer presenta muy baja contracción (0,05%), alcanzando el 50% de sus características mecánicas en poco tiempo a temperatura de 20°C. Una vez endurecida posee una baja porosidad y escasa absorción de agua (0,5%). Las características de dicha resina se detallan en la Tabla 10.3.

Tabla 10.3. Propiedades de la resina acrílica Plasticrete P-CAST A 02.

PLASTICRETE P-CAST A 02	
Color	blanco
Mecanización con herramienta	buena
Dureza Shore	D/15 82-86
Resistencia a la flexión	13-17 MN/m ²
Módulo de elasticidad	2 000-2 500 MN/m ²

Tabla 10.4. Propiedades de la escayola álamo 70.

ÁLAMO 70	
Color	Blanco
Dosificación yeso:agua	1,65-1,73:1
Principio de fraguado	10-12 min
Expansión lineal	0,20 %
Dureza Brinell	480 kg/cm ²

Por otro lado, los productos utilizados, en el desarrollo de esta tesis, como aditivos de los morteros en los ensayos biológicos son los citados a continuación: New Des, Biotin N, Biotin S y Metasol TK 100 SG. Los primeros tres productos fueron proporcionados por C.T.S. España y el cuarto por Bayer Chemical (Tabla 10.5.).

Tabla 10.5. Tipos de biocidas utilizados como aditivos en los morteros compuestos.

PRODUCTO-ADITIVO	ACTIVIDAD
New Des	Bactericida/fungicida
Biotin N	Fungicida/Algicida/Bactericida
Biotin S	Bactericida/Algicida/Fungicida
Metasol TK 100 SG	Fungicida

El New Des se presenta como una solución de sales de amonio cuaternario a base de cloruro de benzalconio (10%). Se utiliza como biocida en soluciones acuosas, la preparación más conocida en la que se emplea el New Des es la papeta de limpieza química AB-57 formulada por el I.C.R. de Roma (Tabla 10.6.)

Tabla 10.6. Propiedades físico-químicas del New Des.

NEW DES	
Aspecto	Líquido incoloro
Principio activo	10% cloruro de benzalconio
Densidad	0,95 kg/l a 20° C
pH	Neutro en soluciones acuosas al 10 %

Por otro lado, el Biotin N es un preparado concentrado líquido de sustancias activas de amplio espectro de actividad frente a líquenes, hongos, bacterias y algas. En soluciones acuosas se emplea en concentraciones variables del 0,2 al 2 %. El Biotin N es un producto de Acima Chemical Industries Ltd Inc, es el equivalente al Metatin N-5810/101 que confecciona C.T.S. S.r.l. (Tabla 10.7.)

Tabla 10.7. Propiedades físico-químicas del Biotin N.

BIOTIN N	
Aspecto	Líquido claro, amarillo pardo
Principio activo	Naftenato de Tributilestaño y sales de amonio cuaternario
Densidad	0,97 kg/l a 20° C
pH	5-6 en soluciones al 10%

Según su ficha técnica, el Biotin S, es una mezcla de biocidas de amplio espectro de actividad, soluble en disolventes orgánicos en concentraciones al 2 %; Su potente acción sobre bacterias, sobre actinomicetos y sobre algas está asociada a una actividad contra hongos y líquenes superior a la de los biocidas tradicionales. Además, el Biotin S presenta una protección duradera en el tiempo, gracias a su bajísima solubilidad en agua (20 ppm) traduciéndose en la resistencia a repetidos deslavados. El Biotin S aplicado sobre superficies u obras situadas al exterior, por su característica de ser solubles disolventes orgánicos (polares como la acetona o apolares como el white spirit) se muestra útil para la protección de superficies sensibles al agua (Tabla 10.8.)

Tabla 10.8. Propiedades físico-químicas del Biotin S.

BIOTIN S	
Aspecto	Líquido amarillo
Principio activo	Organoestañoato y carbamata
Densidad	1,14 kg/l a 20° C
Punto de ebullición	175°-185° C
pH	4-6 al 2%

Finalmente, el Metasol TK 100 SG es un compuesto a base de tiabendazol suministrado por la casa comercial Bayer Chemical. Las características físico-químicas se muestran en la Tabla 10.9.

Tabla 10.9. Propiedades del biocida Metasol TK 100 SG.

METASOL TK 100 SG	
Color	Blanco
Principio activo	Tiabendazol 2-(4-tiazoly)benzimidazol 98%
Forma	Polvo
pH	4,5-7,5 al 0,1-0,3 %

También, se ensayaron dos aditivos, el Mowilith SDM 5 y el ácido bórico, combinados con el conglomerante (cal y escayola) y el árido Tosca de Rocafort y Bateig Crema. Por un lado, el Mowilith DM 5 se trata de una dispersión acuosa de un copolímero a base de acetato de vinilo y éster acrílico, con excelentes propiedades impregnantes y resistente a las bajas temperaturas, que se traduce en un material idóneo como ligante y aditivo en morteros. Este producto es comercializado por C.T.S. S.r.l. (Tabla 10.10). Por otro lado, el ácido bórico es un producto natural que posee un 85% de H_3BO_3 sobre el producto seco y es suministrado por Carlo Erba Reagenti, Rodano, Italia (Tabla 10.11.).

Tabla 10.10. Propiedades físico-químicas del Mowilith SDM 5.

MOWILITH SDM 5	
Aspecto	Líquido lechoso blanco
Viscosidad	2000-5000 mPas
Residuo seco	$53 \pm 1\%$
Densidad	1,05 kg/l a 20 °C
pH	4-5
Temperatura mínima de película (mft)	3 °C
Temperatura de transición vítrea (tg)	5°- 11 °C

Tabla 10.11. Propiedades físico-químicas del Ácido Bórico (H_3BO_3).

ÁCIDO BÓRICO NATURAL	
Forma	Polvo cristalino
Color	blanco
Olor	inodoro
Peso molecular	61,83 g
Punto de fusión	185°C
Punto de ebullición	300°C
Presión de vapor	20°C 0 hPa
Densidad	20°C 1,435 g/cm ³
Solubilidad en agua	20°C 300 g/l
Miscibilidad con disolventes orgánicos	alcoholes

10.3. Instrumentación.

Para la preparación del árido usado en los morteros a ensayar, se hizo necesario un primer proceso de triturado de la piedra extraída de la cantera hasta obtener un tamaño de partícula idóneo.

Esta reducción de tamaño se llevó a cabo mediante un proceso de trituración y molienda que permitió obtener partículas en un rango de tamaño desde 2,5 mm hasta 0 mm.

Los instrumentos empleados se enumeran a continuación:

Molino vibratorio de discos de ágata tipo RS 100, suministrado por la empresa F. Kart Retsch GMBH & Co. KG, obteniéndose partículas finas cuyo tamaño se adecuaba a nuestras necesidades. El molino funciona con una velocidad de 700 r.p.m., y una potencia 400/700 watios. El juego de discos de molienda es de ágata.

Tamices con hilo de alambre de diferentes luces, suministradas por la empresa Filtra Vibración S. L. Los tamices empleados, que se ajustan a la norma UNE-7050-3-1997, poseían la siguiente luz de malla: 2,50 mm, 2,00 mm, 1,60 mm, 1,00 mm, 0,80 mm, 0,420 mm, 0,250 mm y 0,060 mm.

Trituradora de mandíbula F. Kart Retsch GMBH & Co. KG, con dos placas de acero de gran dureza, una fija y la otra móvil, ambas dentadas.

10.4. Preparación de probetas.

10.4.1. Metodología aplicada en la realización de los morteros pétreos compuestos

10.4.1.1. Elaboración de moldes de probetas.

La realización de las probetas con las que se han ejecutado los ensayos físico-químicos, ha exigido la realización previa de una serie de moldes que se ajustasen a las normas internacionales especificadas en el texto de los ensayos.

En la elaboración de los moldes de las probetas (Figura 10.1.) se empleó un elastómero RTV silicónico SILASTIC 3483 de la firma comercial Dow Corning. Se trata de un caucho de silicona de excelentes propiedades mecánicas, resistente y de elevada fluidez. Es un producto bicomponente, compuesto por una base fluida y un endurecedor, agente de curado SILASTIC 83, que al mezclarse catalizan a temperatura ambiente (22°-25° C), mediante una reacción de condensación, alcanzando unas propiedades mecánicas óptimas frente al desgarramiento y flexión. Las características de dicho elastómero tras la vulcanización se detallan en la Tabla 10.12. (Pardo, 1991; Chavarría, 1999; Rosier, 1998).

Las características de los moldes preparados son las siguientes:

4 moldes cúbicos con dos madre formas cada uno de dimensiones (5x5x5) cm (Comisión 25-PEM RILEM 1980).

2 moldes paralelepípedicos con tres madre formas de dimensiones (16x4x4) cm (Norma UNE-EN-196-1).

8 moldes paralelepípedicos con cuatro madre formas cada uno de dimensiones (5x2x1) cm.

3 moldes paralelepípedicos con dos madre formas de dimensiones (7x5x3) cm.

4 moldes paralelepípedicos con dos madre formas de dimensiones (1x1x0,5) cm.

Tabla 10.12. Propiedades de la silicona Silastic 3483.

SILASTIC 3483	
Mezcla de base y agente de curado	100:5 en peso
Viscosidad de la mezcla	20.000 MPa
Color	Blanco
Tiempo de aplicación de la mezcla catalizada a 24 °C	90-110 minutos
Material curado a 24 °	7 días
Dureza Shore A	13
Resistencia a la tracción MPa	3,5
Alargamiento a la rotura %	600
Resistencia al desgarro KN/ m	22
Peso específico	1,15
Contracción lineal %	0,2

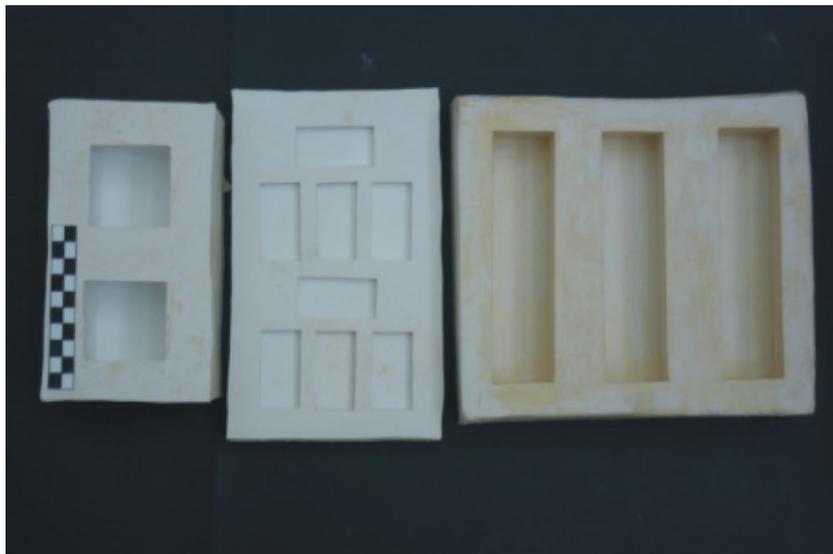


Figura 10.1. Tipos de moldes realizados.

10.4.1.2. Proceso de triturado y cribado.

Para la preparación del árido usado en los morteros a ensayar, se hizo necesario un primer proceso de triturado de la piedra extraída de la cantera hasta obtener un tamaño de partícula idóneo (Suárez y Regueiro, 1994; López, 1994).

Esta reducción de tamaño se llevó a cabo mediante un proceso de trituración y molienda que permitió obtener partículas en un rango de tamaño desde 2,5 mm hasta 0 mm. Esta fase se consiguió con el uso de la trituradora de palas regulando la distancia entre ambas (Figura 10.2.a-b).

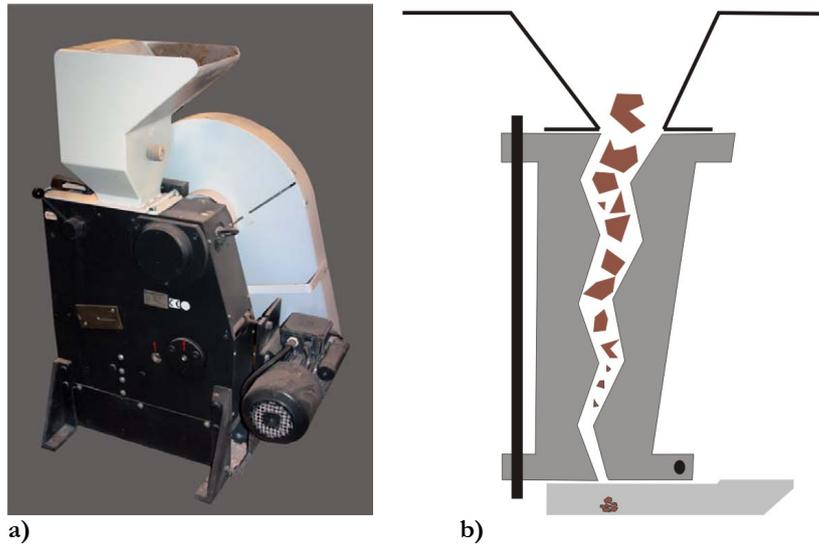


Figura 10.2.(a-b). a) Trituradora de palas. b) Sistema de trituradora de palas, una fija y la otra móvil.

Para la segunda etapa de pulverizado y homogeneización se hizo uso del molino vibratorio de discos de ágata (Figura 10.3.a-b).



Figura 10.3.(a-b). a) Juego de discos de molienda de ágata. b) Detalle del proceso de manipulación y puesta en marcha.

Una vez molturado el material pétreo, se procedió a seleccionarlo por tamaños, obteniendo diversas fracciones de micronizado lítico. El procedimiento utilizado para la separación por tamaños fue el tamizado mediante tamices con hilo de alambre de diferentes luces, suministradas por la empresa Filtra Vibración S. L. Los tamices empleados, que se ajustan a la norma UNE-7050-3-1997, poseían la siguiente luz de malla: 2,50 mm, 2,00 mm, 1,60 mm, 1,00 mm, 0,80 mm, 0,420 mm, 0,250 mm y 0,060 mm. Las figuras 10.5-6 muestran los distintos áridos obtenidos en los que el intervalo de tamaño de partícula se ha reducido considerablemente. La tabla 10.13. resume los valores de tamaño de partícula máximo y mínimo correspondiente a cada una de las fracciones de material lítico micronizado que se obtuvieron tras el proceso de cribado y tamizado (Figura 10. 4.).



Figura 10.4. Torre de tamices durante el proceso de tamizado de los áridos.

Tabla 10.13. Valores del intervalo de tamaño de partícula máximo y mínimo del micronizado tras el proceso de cribado y tamizado.

Fracción	Intervalo de tamaño de partícula (mm)
1	0-0,06
2	0,06-0,25
3	0,25-0,42
4	0,42-0,80
5	0,80-1,00
6	1,00-1,60
7	1,60-2,00
8	2,00-2,50

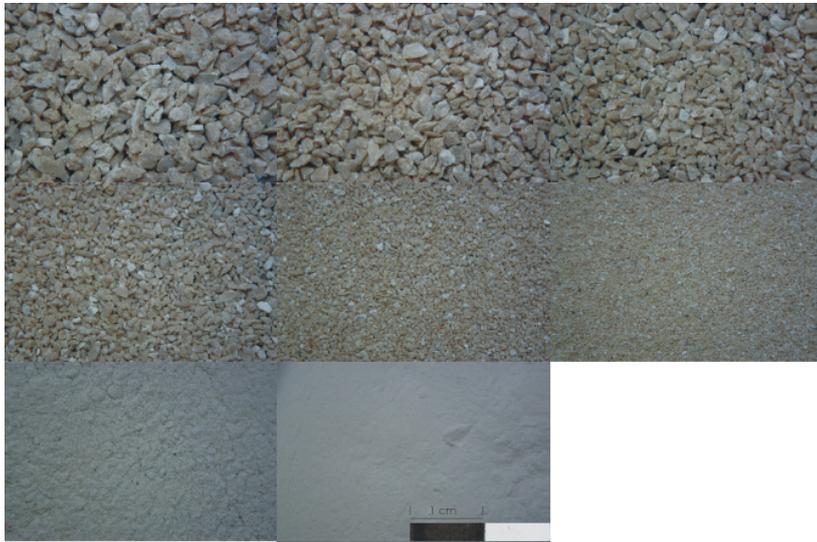


Figura 10.5. Distintos tipos de micronizado de Tosca de Rocafort resultantes de la trituración, molienda y cribado.

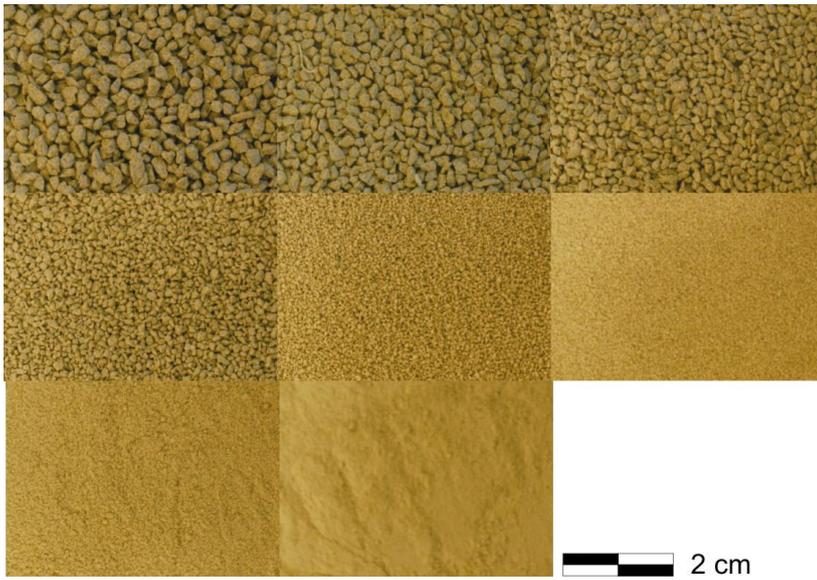
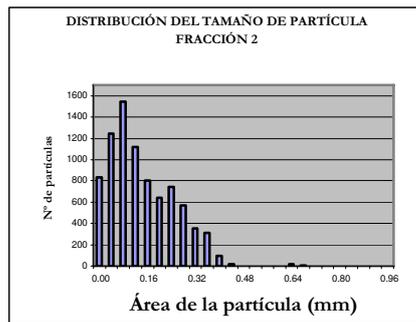


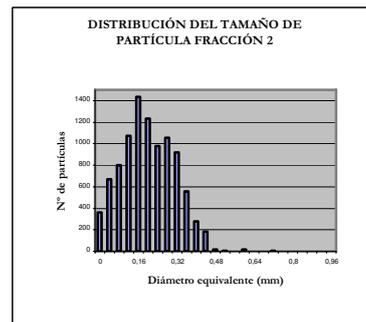
Figura 10.6. Distintos tipos de micronizado de Bateig Crema resultantes de la trituración, molienda y cribado.

10.4.1.3. Análisis de imagen.

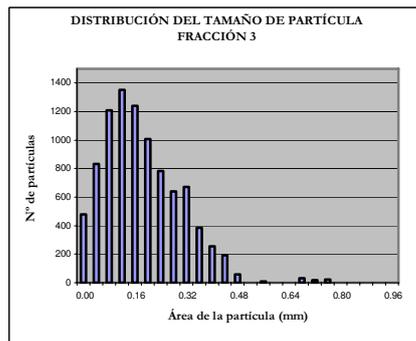
Para caracterizar de una forma más precisa el tamaño de partícula del árido obtenido, se ha efectuado una medición del área de la sección máxima de una muestra representativa correspondiente a cada una de las fracciones. El estudio estereológico se ha llevado a cabo mediante el microscopio estereoscópico Leica SME, obteniéndose imágenes que posteriormente han sido procesadas con un programa de Análisis de Imagen Leica Q 500 MC. La figura 10.7.(a-h), muestra el resultado de este estudio. Se observa que, en general, en todos los casos la distribución de las partículas por tamaños exhibe un comportamiento próximo al gaussiano, con valores de desviación estándar comprendidos entre 0,03 y 0,33 (ver Tabla 10.14.), lo cual pone de manifiesto el carácter homométrico de las fracciones obtenidas con el método de trabajo propuesto.



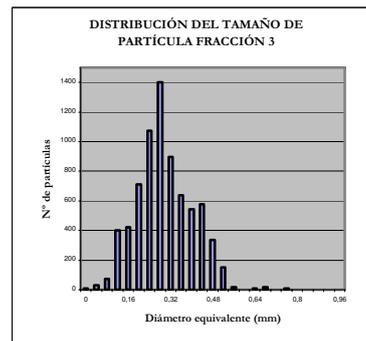
a)



b)



c)



d)

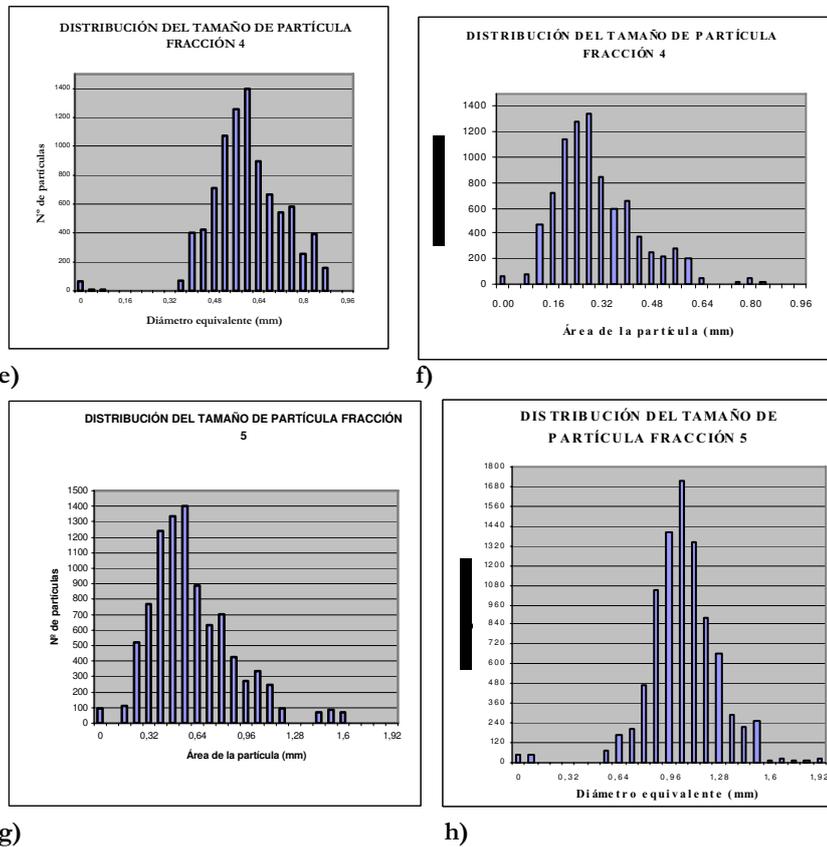


Figura 10.7.(a-h) Distribución del tamaño de partícula de las diferentes fracciones de árido de la piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema.

Tabla 10.14. Comparación entre los diámetros equivalentes de cada tipo de fracción de micronizado y sus áreas.

Fracción	ÁREA (mm)				Ø equival. (mm)			
	Max.	Min.	Med	Std dev. (S)	Max	Min.	Med.	Std dev. (S)
2	0,60	0,01	0,07	0,08	0,60	0,01	0,12	0,03
3	0,75	0,02	0,18	0,10	0,78	0,04	0,25	0,09
4	0,86	0,02	0,30	0,13	0,85	0,02	0,58	0,16
5	1,68	0,1	0,54	0,33	1,98	0,06	1,08	0,17

10.4.1.4. Preparación de probetas. Dosificación de los morteros compuestos ensayados.

Como indicamos anteriormente, uno de los objetivos de esta tesis doctoral era conseguir unos morteros que sirviesen como material de reintegración en la intervención de sellados, reposiciones y réplicas en elementos escultóricos ornamentales pétreos del Patrimonio Artístico. Se pretendía obtener una piedra artificial con un aspecto, color, brillo y textura igual a la piedra a imitar. A tal fin, se llevó a cabo un estudio previo en el que se ensayaron morteros con diferente porcentaje de áridos, conglomerantes, aditivos, etc hasta un total de 428 permitiendo una primera clasificación en tres grupos que permitió encauzar la investigación posterior. A partir de estas pruebas previas, se eligieron los morteros compuestos con los que se ha llevado a cabo el estudio presentado en esta Tesis Doctoral.

Las probetas de morteros se obtuvieron mediante un proceso de moldeado directo. Los diferentes componentes del morteros se mezclaron homogéneamente para, a continuación, verter la masa plástica obtenida en el molde silicónico apropiado.

En la elaboración de los morteros, los parámetros temperatura y humedad relativa son muy importantes, porque en función de ellos la viscosidad del compuesto varía y, por tanto, la eficacia en la mezcla con el árido. Temperaturas de trabajo superiores a 22 °C aumentan el tiempo de fraguado y el endurecimiento de los morteros e inferiores a 12 °C, lo retardan.

Para la realización de las probetas se ha utilizado piedra procedente de cantera, una, de Tosca de Rocafort y, la otra, de Bateig Crema.

Para calcular el porcentaje del componente de árido y del conglomerante, se ha tenido en cuenta la bibliografía documentada y los valores usados en diferentes intervenciones (Réplica del soporte de las pinturas de Altamira, réplicas de escudos de armas alaveses, prótesis extremidades de las esculturas de Vallada, sellados en el monumento Homenaje a Teodoro Llorente en Valencia, anastilosis de la Virgen del tímpano de la Catedral de Castellón, etc.).

Estudios previos.

Las Tablas 10.15. a 10.20. resumen el rango de dosificaciones ensayado en el estudio previo llevado a cabo para seleccionar la composición de los morteros sobre los que se centró esta Tesis. En su realización se han tenido en cuenta los parámetros de color, textura y aspecto final con respecto a las muestras originales a imitar.

Tabla 10.15. Rango de dosificaciones del mortero cal-yeso Tosca de Rocafort ensayados en los estudios previos.

MORTERO CAL-YESO (20 °C/60 HR)				
TOSCA DE ROCAFORT				
ÁRIDO (% peso)		CONGLOMERANTE (% peso)		ADITIVO (% peso)
0,25-0,42 (mm)	0,42-0,80 (mm)	Cal Aérea	Yeso Álamo 70	Pigmentos Bayer
39,5	-	7,9	52,6	-
38,8	19,4	19,4	19,4	2,9 ocre 920
41,1	13,7	13,7	27,4	4,1 ocre 920
59,1	-	18,2	13,6	6,4 ocre 920 2,7 sombra calcinada
40,9	18,2	18,2	13,6	6,4 ocre 920 2,7 sombra calcinada
36,4	22,7	18,2	13,6	6,4 ocre 920 2,7 sombra calcinada
32,8	-	16,4	49,2	0,4 ocre 920 1,2 sombra calcinada
16,4	16,4	16,4	49,2	0,4 ocre 920 1,2 sombra calcinada
41,9	14	14	28	0,7 ocre 920 1,5 sombra calcinada
28	28	14	28	0,7 ocre 920 1,5 sombra natural
55,9	-	14	28	07ocre 920 1,5 sombra calcinada

Tabla 10.16. Rango de dosificaciones del mortero cal-yeso Bateig Crema ensayados en los estudios previos.

MORTERO CAL-YESO (20 °C/60 HR)				
BATEIG CREMA				
ÁRIDO (% peso)		CONGLOMERANTE (% peso)		ADITIVO (% peso)
0,42-0,80 (mm)	0,80-1,00 (mm)	Cal Aérea	Yeso Álamo 70	Pigmentos Bayer
39,5	-	7,9	52,6	-
38,9	19,4	19,4	19,4	2,9 sombra natural
41,1	13,7	13,7	27,4	4,1 sombra natural
60,7	-	18,7	14	6,5 sombra natural
43,3	19,2	19,2	14,7	1,9 sombra natural
39,2	24,5	19,6	15	2 sombra natural
33,1	-	16,5	49,6	0,8 sombra natural
16,6	16,6	16,6	49,7	0,7 sombra natural
42,4	14,1	14,1	28,2	1,1 sombra natural
28,2	28,2	14,1	28,2	1,1 sombra natural
56,5	-	14,1	28,2	1,1 sombra natural

Tabla 10.17. Rango de dosificaciones del mortero acrílico Tosca de Rocafort ensayados en los estudios previos.

MORTERO ACRÍLICO (20 °C/60 HR)				
TOSCA DE ROCAFORT				
ÁRIDO (% peso)		CONGLOMERANTE (% peso)		ADITIVO (% peso)
0,06-0,25 (mm)	0,25-0,42 (mm)	RESINA ACRÍLICA PLASTICRETE		Pigmentos Bayer
		Carga	Líquido	
5,2	42	35,2	17,6	-
5,1	41,1	34,4	17,2	2,1 ocre 920
4,9	44,1	32,8	16,4	1 ocre 920 0,8 sombra calcinada
4,9	44,3	32,9	16,5	0,8 ocre 920 0,5 sombra calcinada
26,5	32,2	26,3	13,2	1 ocre 920 0,7 sombra calcinada
26,7	32,4	26,5	13,3	0,6 ocre 920

MATERIALES Y MÉTODOS DE PREPARACIÓN
DE LOS MORTEROS EXPERIMENTALES

				0,6 sombra calcinada
9,5	38,1	32	16	3,8 ocre 920 0,6 sombra calcinada
9,8	39,3	32,9	16,4	1 ocre 920 0,6 sombra calcinada
9,8	34,4	33	16,5	0,8 ocre 920 0,6 sombra calcinada
9,9	39,6	33,2	16,6	0,5 ocre 920 0,2 sombra calcinada

Tabla 10.18. Rango de dosificaciones del mortero acrílico Bateig Crema ensayados en los estudios previos.

MORTERO ACRÍLICO (20 °C/60 HR)				
BATEIG CREMA				
ÁRIDO (% peso)		CONGLOMERANTE (% peso)		ADITIVO (% peso)
0,42-0,80 (mm)	0,80-1,00 (mm)	RESINA ACRÍLICA PLASTICRETE		Pigmentos Bayer
		Carga	Líquido	
57,1	-	28,6	14,3	-
56,5	-	28,2	14,1	1,1 sombra natural
45,2	11,3	28,2	14,1	1,1 sombra natural
33,9	22,6	28,2	14,1	1,1 sombra natural
22,6	33,9	28,2	14,1	1,1 sombra natural
11,3	45,2	28,2	14,1	1,1 sombra natural
22,7	33,9	28,3	14,2	0,9 sombra natural
33,9	22,7	28,3	14,2	0,9 sombra natural
22,8	34,1	28,4	14,2	0,5 sombra t natural
11,4	45,6	28,4	14,2	0,5 sombra natural
-	56,9	28,4	14,2	0,5 sombra natural

Tabla 10.19. Rango de dosificaciones del mortero poliéster Tosca de Rocafort ensayados en los estudios previos.

MORTERO POLIÉSTER (20 °C/60 HR)				
TOSCA DE ROCAFORT				
ÁRIDO (% peso)		CONGLOMERANTE (% peso)		
0,06-0,25 (mm)	0,25-0,42 (mm)	RESINA POLIÉSTER ESTRATIL AL-100		
		Resina	Iniciador P. MEK	Acelerador
79,6	-	19,9	0,4	0,04
-	79,6	19,9	0,4	0,04
59,7	19,9	19,9	0,4	0,04
19,9	59,7	19,9	0,4	0,04
39,8	39,8	19,9	0,4	0,04
66,4	16,6	16,6	0,3	0,03
16,6	66,4	16,6	0,3	0,03
83	-	16,6	0,3	0,03
-	83	16,6	0,3	0,03

Tabla 10.20. Rango de dosificaciones del mortero poliéster Bateig Crema ensayados en los estudios previos.

MORTERO POLIÉSTER (20 °C/60 HR)					
BATEIG CREMA					
ÁRIDO (% peso)			CONGLOMERANTE (% peso)		
0,06-0,25 (mm)	0,42-0,80 (mm)	0,80-1,00 (mm)	RESINA POLIÉSTER ESTRATIL AL-100		
			Resina	MEK	Acelerador
-	-	79,6	19,9	0,4	0,04
-	49,8	29,9	19,9	0,4	0,04
-	58,1	16,6	24,9	0,4	0,05
-	74,9	-	24,9	0,4	0,05
9,9	-	69,6	19,9	0,5	0,05
14,9	-	64,7	19,9	0,4	0,04
21,5	-	62,9	15,3	0,31	0,031
13,8	-	69,1	16,8	0,34	0,034

19,4	-	63,6	16,6	0,33	0,033
43,3	-	39,8	16,6	0,33	0,033

De los resultados obtenidos en los estudios previos de las diferentes dosificaciones en los morteros se concluye en que:

Los morteros de poliéster, con valores comprendidos entre 86-89% de componente de árido, los morteros acrílicos con valores comprendidos entre 55-75% de árido y, los morteros de cal y yeso con valores comprendidos entre 55-60% el poder de aglutinación del conglomerante es irregular y el endurecimiento variable. En el caso de los morteros de poliéster es lento e incompleto y, en los morteros acrílicos y en los de cal y yeso, es rápido y con disgregación del componente árido.

Los morteros de poliéster, con valores comprendidos entre 80-85% de componente de árido, los morteros acrílicos con valores del 50% y, los morteros de cal y yeso con valores comprendidos entre 45-50% de árido la mezcla es idónea y el endurecimiento y/o fraguado se efectúa correctamente.

El la obtención del color del mortero, no puede ser solamente el propio árido el que complete la operación. En el caso de los morteros acrílicos y de cal y yeso resulta un color blanquecino que en nada se parece al tipo de material pétreo a imitar.

Para conseguir el mismo tono que la piedra de referencia, en los morteros acrílicos y de cal y yeso se debe de añadir al conglomerante unos determinados porcentajes de pigmento sombra natural y sombra calcinada (ver tabla 10.22.c).

La resina de poliéster y la acrílica se mezclan mejor con el árido más fino, mientras que con el conglomerante de cal-yeso se empeora.

A baja temperatura ambiente se inhibe el proceso de polimerización de la resina de poliéster. En condiciones de temperatura de 15°C, 65% HR y catalizador al 1% las probetas han endurecido pasadas las 24 horas y se han formado burbujas en superficie. Las probetas con cantidad de catalizador al 2% han manifestado propiedades más óptimas.

Cuando la temperatura ambiente se sitúa por encima de los 22°C se comprueba que la polimerización y el fraguado de los morteros compuestos se efectúan con mucha rapidez.

Se considera que los morteros que mejor se ajustan en color y aspecto con las piedras de referencia son los presentados en la Tabla 10.22.(a-c).

Selección de formulaciones de morteros compuestos.

La Tabla 10.21. contiene los valores obtenidos de los parámetros cromáticos L, a, b y ΔE de las muestras patrón de roca fresca Tosca de Rocafort y Bateig Crema y, de las probetas de morteros compuestos seleccionados finalmente. Los morteros seleccionados son los que más se asemejan a las muestras de color, textura y aspecto visual en el original.

Tabla 10.21. Coordenadas cromáticas (L*, a*, b*) de las muestras patrón de referencia y las probetas elaboradas con morteros compuestos. Valores calculados de variación de color total (ΔE) respecto a las muestras de referencia de las piedras frescas.

REF.	L*	S	a*	S	b*	S	ΔE
PATRÓN TR	92,02	0,01	4,6	0,2	16,08	0,04	-
MN+TR	92,4	0,1	5,10	0,01	16,4	0,1	0,70
MA+TR	91,9	0,3	4,27	0,08	16,8	0,1	0,80
MN+TR+ADT	92,5	0,1	5,2	0,2	16,4	0,2	0,74
MN+TR+AB	92	1	4,1	0,2	16,05	0,02	0,69
MP+TR	91,2	0,1	5,0	0,2	15,9	0,1	0,93
PATRÓN BC	97,8	0,2	1,2	0,1	10,39	0,02	-
MN+BC+ADT	97,98	0,02	1,01	0,03	10,23	0,01	0,14
MN+BC+AB.	97,7	0,2	1,2	0,1	10,3	0,2	0,11
MN+BC	97,9	0,1	1,20	0,01	10,3	0,1	0,12
MA+BC	97,7	0,1	1,5	0,1	10,80	0,04	0,54
MP+BC	96,99	0,01	1,1	0,2	10,31	0,02	0,82

La Tabla 10.22.(a-d) resume la composición de los morteros compuestos propuestos en esta investigación. En todos ellos se ha usado piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema cuyo tamaño de partícula queda especificado en cada uno de los apartados. Dicha tabla incluye una serie adicional de morteros compuestos preparados con biocidas.

Tabla 10.22.(a-d). Composición de los morteros compuestos propuestos para ser experimentados, (a, b, c) dosificaciones sin biocida; (d) dosificaciones con biocida.

a) MORTERO POLIÉSTER		
MP-BC	BATEIG CREMA	COMPOSICIÓN (% peso)
	ÁRIDO (0,80-1,00) mm	64
	ÁRIDO (0,06-0,25) mm	19,5
	CONGLOMERANTE resina poliéster ESTRATIL AL 100	16,5
TOSCA DE ROCAFORT (TR)		
MP-TR	TOSCA DE ROCAFORT (TR)	COMPOSICIÓN (% peso)
	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	66,7
	ÁRIDO (0,06-0,25) mm	16,7
	CONGLOMERANTE resina poliéster ESTRATIL AL 100	16,7

b) MORTERO ACRÍLICO		
MA-BC	BATEIG CREMA	COMPOSICIÓN (% peso)
	ÁRIDO (0,80-1,00) mm	56,9
	CONGLOMERANTE resina acrílica bi-componente PLASTICRETE P- CAST A 02	42,7
	ADITIVO pigmento sombra natural Bayer	0,46

b) MORTERO ACRÍLICO		
	TOSCA DE ROCAFORT	COMPOSICIÓN (% peso)
MA-TR	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	39,7
	ÁRIDO (0,06-0,25) mm	9,9
	CONGLOMERANTE resina acrílica bi-componente PLASTICRETE P-CAST A 02	49,6
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,2
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	0,5

c) MORTERO CAL-YESO		
	BATEIG CREMA	COMPOSICIÓN (% peso)
MN-BC	ÁRIDO (0,42-0,80) mm	46,6
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,3
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,7
	DISOLVENTE agua destilada	17,5
	ADITIVO pigmento Bayer sombra natural	0,9
	MN-BC-ADT	ÁRIDO (0,42-0,80) mm
CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70		23,3
CONGLOMERANTE cal aérea en polvo		11,7
DISOLVENTE agua destilada		17,5
ADITIVO pigmento Bayer sombra natural		0,9
ADITIVO Mowilith SDM5		10 (respecto al agua)

c) MORTERO CAL-YESO		
MN-BC-AB	ÁRIDO (0,42-0,80) mm	46,6
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,3
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,7
	DISOLVENTE agua destilada	17,5
	ADITIVO pigmento Bayer sombra natural	0,9
	ADITIVO ácido bórico	0,64 (respecto al agua)
	TOSCA DE ROCAFORT	
MN-TR	COMPOSICIÓN (% peso)	
	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	46,2
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,1
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,5
	DISOLVENTE agua destilada	17,3
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,6
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	1,3
MN-TR-ADT	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	46,2
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,1
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,5
	DISOLVENTE agua destilada	17,3
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,6
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	1,3
	ADITIVO Mowilith SDM5	10 (respecto al agua)

c) MORTERO CAL-YESO		
MN-TR- AB	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	46,2
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,1
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,5
	DISOLVENTE agua destilada	17,3
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,6
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	1,3
	ADITIVO ácido bórico	0,64 (respecto al agua)

d) MORTERO CAL-YESO: TOSCA DE ROCAFORT		
REF.	BIOCIDA	CONCENTRACIÓN (%)
MN-TR-BN-1	Biotin N	1
MN-TR-BN-2		2
MN-TR-ND-5	New Des	5
MN-TR-ND-10		10
MN-TR-ADT-BN-1	Biotin N	1
MN-TR-ADT-BN-2		2
MN-TR-ADT-ND-5	New Des	5
MN-TR-ADT-ND-10		10
MN-TR-AB-BN-1	Biotin N	1
MN-TR-AB-BN-2		2
MN-TR-AB-ND-5	New Des	5
MN-TR-AB-ND-10		10
MORTERO CAL-YESO: BATEIG CREMA		
MN-BC-BN-1	Biotin N	1
MN-BC-BN-2		2
MN-BC-ND-5	New Des	5
MN-BC-ND-10		10
MN-BC-ADT-BN-1	Biotin N	1
MN-BC-ADT-BN-2		2
MN-BC-ADT-ND-5	New Des	5
MN-BC-ADT-ND-10		10
MN-BC-AB-BN-1	Biotin N	1
MN-BC-AB-BN-2		2
MN-BC-AB-ND-5	New Des	5
MN-BC-AB-ND-10		10

MORTERO ACRÍLICO: TOSCA DE ROCAFORT		
REF.	BIOCIDA	CONCENTRACIÓN (%)
MA-TR-BS-1	Biotin S	1
MA-TR-BS-2		2
MA-TR-MT-0,1	Metasol TK 100 SG	0,1
MA-TR-MT-0,3		0,3
MORTERO ACRÍLICO: BATEIG CREMA		
MA-BC-BS-1	Biotin S	1
MA-BC-BS-2		2
MA-BC-MT-0,1	Metasol TK 100 SG	0,1
MA-BC-MT-0,3		0,3
MORTERO POLIÉSTER: TOSCA DE ROCAFORT		
MP-TR-BS-1	Biotin S	1
MP-TR-BS-2		2
MP-TR-BS-0,1	Metasol TK 100 SG	0,1
MP-TR-BS-0,3		0,3
MORTERO POLIÉSTER: BATEIG CREMA		
MP-BC-BS-1	Biotin S	1
MP-BC-BS-2		2
MP-BC-BS-0,1	Metasol TK 100 SG	0,1
MP-BC-BS-0,3		0,3

El mortero MN como ya se ha indicado anteriormente, está formado por un conglomerante bicomponente, es decir, la cal aérea y el yeso Álamo 70, la fracción de árido y, unos aditivos (pigmentos Bayer, el retardador ácido bórico y el retardador/reforzador estructural Mowilith SDM 5).

El procedimiento de elaboración del mortero cal-yeso (MN) Bateig Crema, se detalla a continuación: (el procedimiento sería el mismo para el caso de la Tosca de Rocafort)

-Se inicia con la preparación previa de los pigmentos inorgánicos en disolución acuosa al 75% (Gili, 1990).

-A la cal en polvo (11,7%) se le añade un 10,8% de agua y, seguidamente se colorea con el pigmento al 0,9%.

-Finalmente, se prepara la mezcla del yeso (23,3%) y el agua (6,2%).

-Una vez las dos pastas, por separado, están bien mezcladas, se juntan formando una única pasta a la que se le aplicará la carga de árido (0,42-0,80) mm (46,6%), formando el mortero compuesto. En el caso de incorporar el ácido bórico, el Mowilith SDM5 y los biocidas, éstos se añadirían al agua de amasado del yeso en las proporciones citadas (ver apartado 10.22.c).

En la realización del mortero cal-yeso (MN), para ambos tipos de árido, se ha observado un aumento de la porosidad al incorporarse el biocida New Des, hecho que podría deberse a las propiedades que intrínsecamente exhibe como fluidificante y retardante.

Las ventajas que presenta este tipo de mortero se corresponden con las propias características de los materiales, facilidad en el manejo de los materiales, por ser productos tradicionales, compatibles con los materiales pétreos estudiados, reversibles, porosos y, económicamente aceptables. Los principales inconvenientes que presenta son, la sensibilidad a los cambios de temperatura y humedad, que exigirá una mayor o menor cantidad de agua en su preparación. Finalmente, añadiremos que el procedimiento de elaboración es largo y complejo.

El procedimiento de elaboración del mortero acrílico (MA) Bateig Crema, consta de los siguientes pasos: (el procedimiento sería el mismo para el caso de la Tosca de Rocafort)

-Se mezcla la resina acrílica bicomponente Plasticrete P-CAST A02, un 28,45% de carga en fase sólida (polvo blanco) por 14,23% de la fase líquida (color blanco lechoso).

-Todo seguido, se añade la cantidad de pigmento (0,46%).

-Finalmente se añade el micronizado (0,80-1,00) mm (56,9%).

-Los biocidas se añadirán a la parte líquida de la resina.

La cantidad de agua necesaria en la elaboración del mortero dependerá también de la humedad del árido. En el caso de que el árido se encuentre seco, significa que absorbe agua de la mezcla, por lo que el conglomerante no tendrá agua suficiente y las propiedades del mortero serán diferentes. En el caso de que el árido estuviese húmedo, éste aportaría agua a la mezcla alterando también las propiedades. La humedad ideal es la que no afecta a la dosificación de agua de la mezcla, es decir que no añada ni robe agua destinada para el conglomerante, por lo tanto, la humedad ideal es la del árido de superficie saturada seca. Esta humedad responde a que todos los poros accesibles estén llenos de agua y nada de ésta sobre la superficie. En este caso la humedad es igual a la absorción. En los morteros experimentados la humedad del árido se encontraba alrededor del 0,2 % para ambos tipos de piedra.

Se ha detectado durante el proceso de elaboración del mortero acrílico que, al incorporar el biocida New Des en proporción superior al 10% o el biocida Biotín N en proporción superior al 1%, se produce una reacción del biocida con la fase líquida de la resina formando un gel que acelera drásticamente el mortero. Este fenómeno, no se observó en los estudios previos, porque las proporciones aplicadas allí no superaban los valores propuestos para este trabajo de tesis.

Las ventajas que presenta este tipo de mortero acrílico son su cómoda trabajabilidad, rápida elaboración, fácil pigmentado y resistencia a las radiaciones ultravioletas, mientras que los inconvenientes se resumen en su rápido proceso de fraguado, su baja porosidad y su elevado coste de adquisición.

Finalmente, el procedimiento de elaboración del mortero de poliéster (MP) ha comportado los siguientes pasos:

-Se mezcla la resina de poliéster insaturada Estratil AL-100 con el material pétreo micronizado en proporción 1:5 (83%).

-Adición del catalizador (acelerador de la reacción) octoato de cobalto a 0,2 %.

-Adición del iniciador de reacción peróxido de metiletilcetona (MEK) al 2 % a temperatura ambiente (Sánchez, 1992; Venuat, 1972; Masciá, 1974).

La incorporación del biocida Biotín S al mortero de poliéster también presentó problemas al producirse una reacción entre el biocida y

los componentes de la resina que tiñó de color amarillo intenso el conglomerante. Este proceso, podría suponer un problema en el caso de reproducir piezas marmóreas blancas, pero dado que nuestra intervención es sobre piedras de tonalidad terrosas este problema se minimiza.

Las ventajas que se traducen del empleo de los morteros de poliéster son su excelente resistencia mecánica, ausencia de porosidad, bajo coste, etc. Sin embargo, la resina de poliéster es un producto tóxico que precisa de ambientes ventilados para su manipulación.

Influencia de los agentes retardadores y/o aceleradores.

Es frecuente, en el empleo de morteros, el uso de aditivos y/o reactivos que modifican sus características originales. Estas modificaciones serán más efectivas cuanto más adecuen el mortero a las necesidades de trabajo requeridas. En este estudio, se han considerado dos retardadores de fraguado compatibles con los morteros de cal-yeso y un acelerador de curado para los morteros con conglomerante de poliéster.

Los dos aditivos retardadores de fraguado ensayados en la elaboración de los morteros de cal y yeso han sido, como se muestra en la Tabla 10.22. ácido bórico (0,64%) y, el Mowilith SDM5 (10%). Ambos aditivos se han empleado puesto que, el yeso, endurece con una relativa rapidez y resulta conveniente prolongar su proceso de fraguado durante el mezclado con la cal hidratada y, posterior, adición del árido. El ácido bórico disminuye la solubilidad del yeso aumentando considerablemente el tiempo de endurecimiento. La emulsión de Mowilith SDM5, además de retardador del fraguado, confiere al conglomerante mayor dureza, resistencia e impermeabilidad. El ensayo realizado pone en evidencia los diferentes retardos en el tiempo de fraguado que pueden obtenerse con los aditivos utilizados. Así, la incorporación de Mowilith SDM 5 incrementa el tiempo de fraguado de 10 a 13 minutos mientras que con el ácido bórico se alcanzan tiempos de 3 horas.

La resina de poliéster Estratil AL-100 requiere el uso de un tipo de reactivo (acelerador octoato de cobalto) que desencadene el mecanismo de la reacción de polimerización mediante radicales libres a temperatura ambiente. Este acelerador variará su dosificación ajustándose al tiempo

de trabajo precisado en función de las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa. Además del acelerador, se incorpora al polímero un agente catalizador (peróxido de metiletilcetona) que inicia la reacción. La reacción de polimerización se lleva a cabo por interacción entre moléculas de poliéster y del monómero la cual conlleva la apertura de los dobles enlaces etilénicos de poliéster y del monómero. Dicha apertura es posible debido a que uno de los dobles enlaces es relativamente inestable en presencia de ciertos radicales químicos que, en este caso, se obtienen a partir del peróxido de metiletilcetona (MEK).

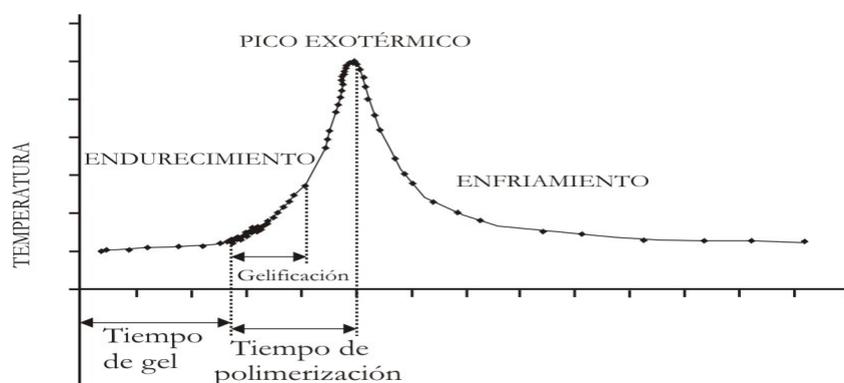


Figura 10.8. Diferentes etapas del proceso de curado de la resina de poliéster Estratil AL-100. Tiempo de gel es aquel transcurrido desde la adición de los reactivos hasta la observación del primer síntoma de formación de gel. La gelificación es el período de transición entre el estado gel y el estado sólido que transcurre desde el tiempo de gel hasta el primer cambio brusco de pendiente en la etapa de endurecimiento. El tiempo de polimerización es el tiempo transcurrido desde el tiempo de gel hasta que se alcanza el máximo de temperatura (pico exotérmico).

Miravete, et al. (2000) estudiaron la reactividad de la resina de poliéster Estratil AL-100, y observaron que, el empleo del catalizador y del acelerador en diferentes proporciones modificaba la temperatura y, por consiguiente, el tiempo de polimerización (Figura 10.8). Los resultados que se extraen de este estudio se resumen en:

-Un aumento de catalizador provoca la aparición de un mayor pico exotérmico, alcanzándose mayores pendientes en la fase de

endurecimiento (debido al aumento de la velocidad de reacción). En consecuencia, se consiguen tiempos de polimerización más cortos.

-Al alcanzar temperaturas más elevadas, el intercambio de calor con el exterior se modifica y, el enfriamiento se ralentiza.

-Se aprecia unas variaciones significativas en los tiempos de gel cuando se adiciona una cantidad de catalizador inferior al 2%. En cantidades muy pequeñas de catalizador (0,05%, 0,10% y 0,15%) este efecto se acentúa. Por debajo de ciertos valores umbral de catalizador y acelerador, el proceso se ralentiza afectando al tiempo de gel.

-Un aumento en la adición de acelerador provoca una disminución del tiempo de gel para cantidades constantes de catalizador.

-La adición de acelerador apenas modifica los máximos de temperatura (picos exotérmicos), así como los parámetros de la reacción de polimerización (pendiente de la curva de endurecimiento, pendiente de la curva de enfriamiento, etc.).

-La resina, una vez curada, varía su color en función de los porcentajes de acelerador y catalizador. Una adición progresiva de octoato de cobalto varía las tonalidades de amarillos a rosas pasando por naranjas. La variación de catalizador tiende a los anaranjados al aumentar su contenido y a los rosas al disminuirlo.

Roig Salom (1995) especifica diferentes dosificaciones en función de la cantidad de resina (acelerador y catalizador), de la cantidad de árido y de la temperatura ambiente (Tabla 10.24.).

Según estos resultados, los valores más idóneos, estarían entorno al 0,2% de acelerador, tanto por los tiempos de gel como por la versatilidad que muestra ante distintas concentraciones de catalizador.

Tabla 10.23. Variaciones del tiempo de gel para diferentes proporciones de catalizador y acelerador (Datos tomados de Miravete, et al., 2000).

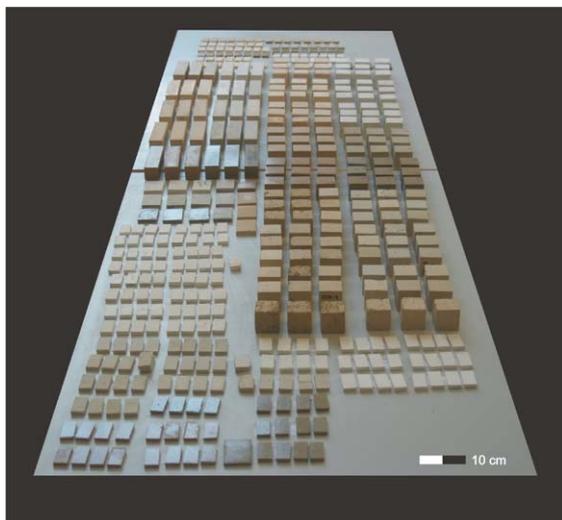
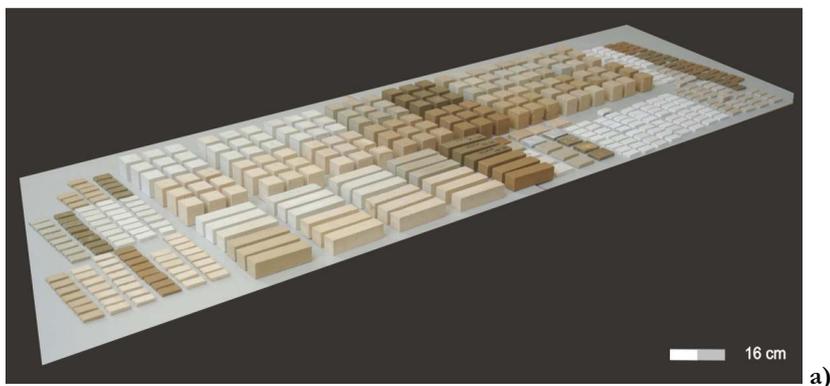
Variación del TIEMPO DE GEL a 22°C		
Catalizador (%)	Acelerador (%)	Tiempo gel (min.)
1	0,05	66
1	0,10	53
1	0,15	41
1	0,20	29
1	0,25	19
1	0,30	19
2	0,05	21
2	0,10	13,5
2	0,15	11
2	0,20	10
2	0,25	10,5
2	0,30	9,5
3	0,05	21
3	0,10	13,5
3	0,15	11
3	0,20	10
3	0,25	10,5
3	0,30	9,5

Tabla 10.24. Proporciones en relación a la cantidad de polímero poliéster y temperatura ambiente (Datos tomados de Roig, 1995).

PRODUCTO	ÁRIDO			
	100/100 % volumen Temperatura 28°C	50/100 % volumen Temperatura 18°C	100/100 % volumen Temperatura 28°C	50/100 % volumen Temperatura 18°C
Polímero poliéster Estratil AL-100	1 Kg	1 Kg	1 Kg	1 Kg
Catalizador %	2	1,5	2,5	2
Acelerador %	0,2	0,1	0,5	0,3

Por tanto, y a partir de los datos antes mencionados, en los ensayos realizados para el presente trabajo, se han empleado las dosificaciones al 2% de catalizador y al 0,2% de acelerador, y una proporción polímero-árido (20/80)% en masa, a 20°C. Estas condiciones han permitido elaborar las diferentes probetas de morteros de poliéster con un tiempo de gel de, aproximadamente, 25-30 minutos.

En la Tabla 10.25. y Figura 10.9.(a-b) se detallan las diferentes probetas de morteros compuestos elaboradas, sus dimensiones y cantidad en función de los ensayos de caracterización físico-mecánica, química y biológica.



Figuras 10.9.
(a-b). Conjunto de probetas elaboradas con los diferentes morteros compuestos, a partir de las probetas patrón.

Tabla 10.25. Probetas de morteros compuestos elaboradas en función de los ensayos mecánicos, físicos, químicos y biológicos.

Morteros	Dimensiones (cm)	Cantidad (u.)	Aplicación
MN	2X1X0,5	150	-Ensayo de envejecimiento acelerado termohídrico.
	2X1X0,5	50	-Ensayo a la radiación ultravioleta.
	5X5X5	50	-Resistencia a la degradación natural.
	5X5X5	30	-Ensayo de cristalización salina.
MA	2X1X0,5	50	-Ensayo de niebla con SO ₂ .
	5X5X5	30	-Ensayo de resistencia a las heladas.
	5X5X5	30	-Absorción.
	5X5X5	30	-Densidad real/Densidad aparente.
	5X5X5	30	-Porosidad.
	5X5X5	30	-Contenido humedad de saturación.
	5X5X5	30	-Coeficiente de saturación.
	5X5X5	30	-Resistencia a rotura por flexotracción.
MP	4X4X16	30	-Resistencia a rotura por compresión.
	4X4X16	30	-Resistencia al desgaste por rozamiento en seco y húmedo.
	1X1X0,5	24	-Ensayo microbiológicos.
	2X1X0,5	150	-Tránsito de vapor de agua.
	5X5X5	12	-Aspecto visual físico y fisiológico.
	6X3X2	28	

10.4.1.5. Tratamiento de acabado.

La superficie de los morteros se trató mediante papel abrasivo tipo corindón 04-PVI 200. En los morteros de poliéster se eliminó la película microscópica de estireno, que emigra a la superficie, mediante acetona. Con el propósito de determinar la influencia de la textura superficial se realizaron diferentes series de probetas imitando los diferentes acabados (repicado, abujardado, pulido, etc...) que tradicionalmente se han desarrollado en escultura pétrea (European Comisión, 1999; Camí y Santamera, 2000) (Figura 10.10).

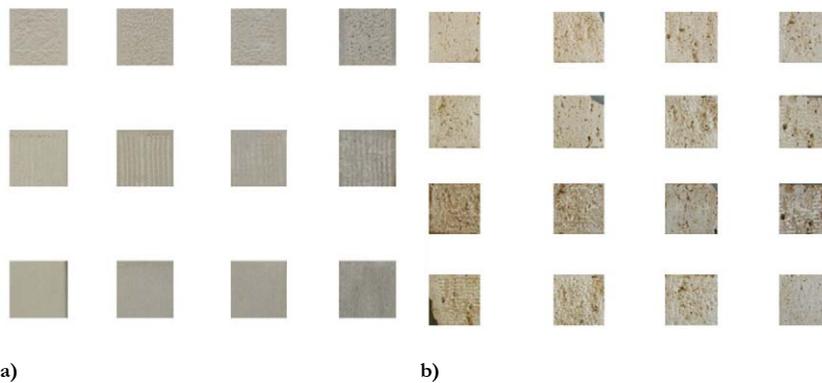


Figura 10.10. Distintos tipos de acabado superficial. Bateig Crema (a) y Tosca de Rocafort (b).



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

11.1. MORTEROS COMPUESTOS.

11.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA.

11.1.1.1. Introducción.

Los ensayos físicos y mecánicos se han efectuado con el propósito de determinar las propiedades estructurales e hídricas de los morteros compuestos (Tabla 11.1.), así como, caracterizar sus resistencias frente a esfuerzos mecánicos de flexión y compresión.

La cantidad de agua absorbida por un material poroso está directamente relacionada con la porosidad abierta, así mismo, la configuración y distribución porosa regula los procesos de sorción del mortero.

Por este motivo, determinar las propiedades del sistema poroso permitirá evaluar el comportamiento de los morteros frente a los agentes de alteración, ya que en los espacios vacíos es donde tiene lugar los procesos físico-químico y biológicos (Guerrero, 1990).

La absorción rápida se debe principalmente a los poros de mayor tamaño, y el contenido de agua absorbida al final de la etapa y la duración de la misma dependen del contenido de macroporos y del grado de conectividad por accesos de menor radio (Guerrero, et al. 1988). Por el contrario, la absorción lenta de agua está asociada fundamentalmente a la abundancia de microporos.

Tabla 11.1. Ensayos físicos.

ENSAYOS FÍSICOS
Densidad aparente/ Densidad real
Contenido en humedad de saturación
Porosidad abierta
Coefficiente de saturación
Absorción y desorción libre de agua

Por otro lado, para la valoración de la calidad mecánica de los morteros y la comparación entre la roca procedente de cantera y aquella otra procedente del monumento y ornamentos, se han seleccionan varios ensayos mecánicos considerados más idóneos (Tabla 11.2).

Tabla 11.2. Ensayos mecánicos.

ENSAYOS MECÁNICOS
Resistencia a rotura por compresión simple.
Resistencia a rotura por flexotracción.
Resistencia al desgaste por rozamiento en seco y húmedo.

11.1.1.2. Absorción y desorción libre de agua.

El ensayo se realiza basándose en la recomendación NORMAL 7/81: «Assorbimento d'acqua per immersione totale: Capacità di imbibizione» .

La absorción de agua por inmersión total se define como la cantidad de agua absorbida por el material mediante inmersión en agua desionizada a presión y temperatura ambiente.

El método operativo consta de una etapa inicial de secado de las probetas en estufa a 60°C hasta masa constante (Mo) tras la cual, se dejan enfriar en desecador hasta temperatura ambiente. A continuación, se colocan las probetas sobre una rejilla y se cubren totalmente de agua realizando pesadas consecutivas hasta que la variación de masa sea inferior a 0,1%.

La cantidad de agua absorbida por la muestra en un tiempo t viene calculada por la fórmula:

$$\Delta M \% = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100$$

Estos valores se representan en un gráfico en función del tiempo obteniendo una curva de absorción de agua por inmersión total.

El procedimiento para la obtención de la curva de desorción de agua consta de las siguientes etapas: una vez saturadas en agua las probetas se colocan sobre una rejilla y se realizan pesadas consecutivas hasta que la variación de masa sea inferior a 0,1%. Finalmente, la masa de agua desorbida, expresada en porcentaje, se calcula con respecto a la masa de la muestra saturada en agua y se representa en un gráfico con respecto al tiempo.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en los ensayos de absorción se resumen en la Tabla 11.3. y en la Figura 11.1, donde se indican los valores promedio de absorción y la desviación estándar, tras 288 horas de inmersión correspondiente a tres réplicas de cada grupo de morteros. Se aprecia una mayor absorción en las probetas elaboradas con el mortero cal-yeso, indistintamente si se emplea con los aditivos Mowilith SDM 5 o el ácido bórico, como resultado de la mayor porosidad que exhiben estos morteros (ver apartado 11.1.1.4. Porosidad). También se ha observado que las probetas con el aditivo ácido bórico exhibía pequeños desprendimientos superficiales de árido, hecho que puede asociarse al tratamiento de acabado superficial efectuado sobre éstas. Según datos bibliográficos, el ácido bórico actúa como agente retardador, disminuye la solubilidad del yeso y genera una capa estructural, a pocos milímetros de la superficie, muy resistente a los agentes atmosféricos (lluvia, humedad, etc.) (Gárate, 1999). La pérdida de este estrato podría justificar este alto valor de absorción de las probetas. Por otra parte, los valores promedio obtenidos en los morteros acrílicos, en ambos tipos de piedra, se aproximan a los valores de las piedras frescas de cantera. Finalmente, los morteros de poliéster muestran valores de absorción inapreciables (0,29%).

En relación a cómo tiene lugar el proceso de absorción señalaremos que los morteros de cal-yeso exhiben una rápida absorción de agua durante la primera hora de ensayo, aumentando progresivamente hasta la saturación a las 244 h. En cambio, los morteros de matriz sintética sufren variación superadas las 144 horas, llegando a la saturación máxima a las 258 h. Estas notables diferencias de comportamiento son debidas a la presencia significativa de poros en los morteros MN frente a la escasa porosidad existente en los morteros MA y MP.

Tabla 11.3. Incremento de masa por inmersión (% masa), valores medios y desviación estándar de la absorción de agua.

Morteros	Valor promedio absorción de agua tras 288 h (%)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	2,5	0,3
Piedra de monumento*	10	2
Piedra fresca BC	5,4	0,1
MN-TR	22,3	0,5
MN-BC	20,2	0,3
MN-TR-ADT	21,2	0,3
MN-BC-ADT	21	2
MN-TR-AB	18,8	0,3
MN-BC-AB	22,1	0,2
MA-TR	2,5	0,1
MA-BC	3,2	0,1
MP-TR	0,10	0,04
MP-BC	0,4	0,1

*Datos obtenidos de probetas procedentes de sillares del Puente de Serranos (Valencia) sometidas a ensayo de absorción.

La Figura 11.2. muestra las curvas de desorción libre de agua de los distintos morteros estudiados. La desorción libre de agua a presión atmosférica se produce, en los morteros de cal-yeso, de forma rápida a partir de las primeras 24 horas y alcanza un valor de masa constante superadas las 168 horas del ensayo. En los morteros acrílicos y de poliéster la desorción de agua tiene lugar de forma gradual a lo largo de todo el período de tiempo que ha durado el ensayo. El valor medio de desorción en los morteros MN está en torno al 75% de agua absorbida, en los morteros MA es del 66% y en los morteros MP es del 98%.

El estudio comparativo de las curvas de absorción y desorción obtenidas para el conjunto de materiales estudiados permite comprobar que existe un porcentaje variable de agua absorbida que queda retenida en el interior del sistema poroso de los morteros compuestos estudiados (Tabla 11.4.). Este hecho está condicionado por el tamaño y forma de los poros, así como por la naturaleza del material conglomerante que une los diferentes componentes del mortero. Así, el valor de porcentaje de agua retenida en los morteros MN es del 25%, en los morteros MA del 34% y en los morteros MP del 2%. Se observa que los morteros de poliéster no retienen agua mientras que los morteros acrílicos exhiben una mayor retención de agua lo cual se atribuye a su estructura de poros de pequeño tamaño, especialmente en el mortero MA-TR. En el caso de los morteros MN, éstos absorben muchísima agua debido a la estructura de amplios poros que poseen pero, debido a dicha característica, también desalojan gran parte de ésta.

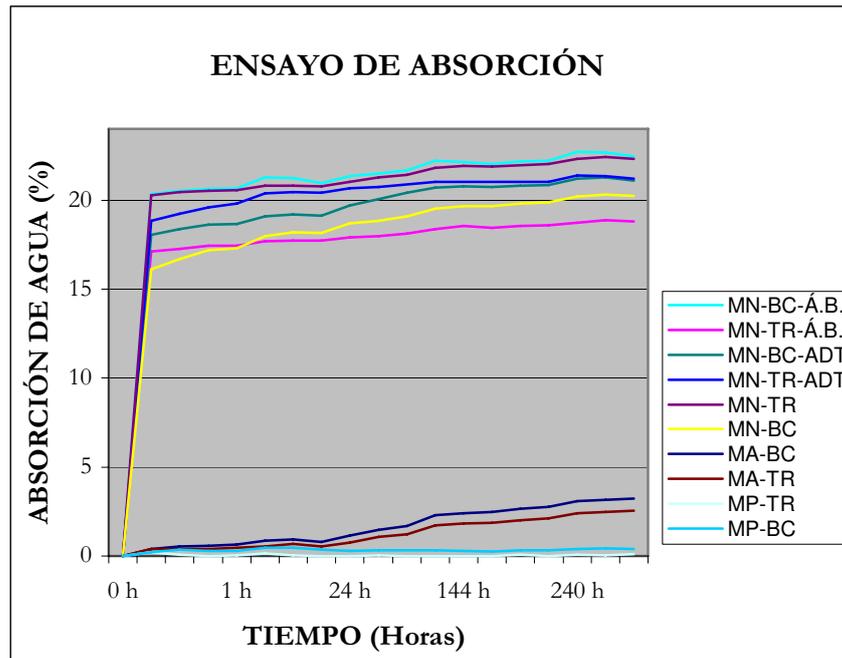


Figura 11.1. Comparación de la absorción de agua experimentada por los distintos morteros compuestos.

Tabla 11.4. Disminución de masa por desorción libre de agua a presión atmosférica (% masa), valores medios y desviación estándar.

Morteros	Valor promedio desorción de agua tras 216 h (%)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	1,1	0,2
Piedra de monumento*	1,1	1,2
Piedra fresca BC	1,5	0,7
MN-TR	5,9	0,3
MN-BC	3,2	0,5
MN-TR-ADT	9,9	0,2
MN-BC-ADT	3,7	1,1
MN-TR-AB	3,0	0,8
MN-BC-AB	4,0	0,1
MA-TR	1,6	0,2
MA-BC	0,28	0,04
MP-TR	0	0,1
MP-BC	0	0,1

*Datos obtenidos de probetas procedentes de sillares del Puente de Serranos (Valencia) sometidas a ensayo de desorción.

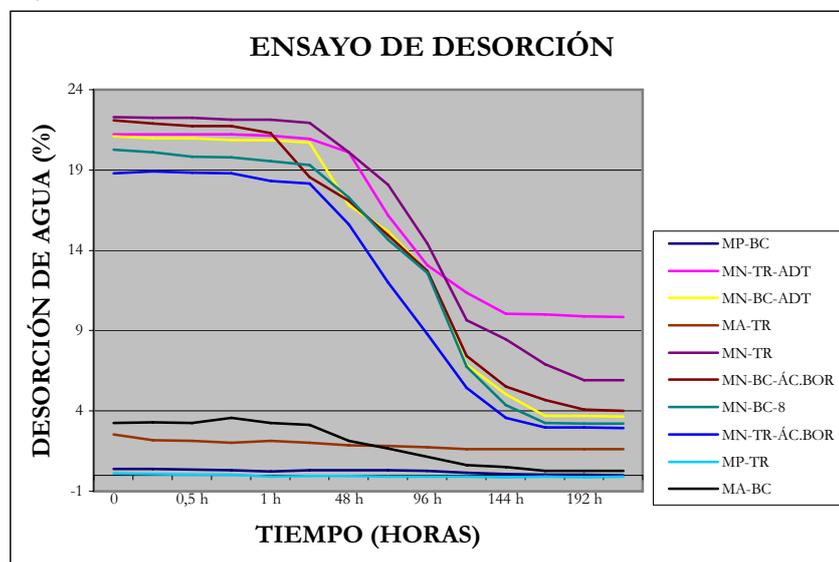


Figura 11.2. Comparación de la desorción de agua experimentada por los distintos morteros compuestos.



Figura 11.3 Probetas tras finalizar el ensayo de absorción-desorción.

11.1.1.3. Densidad real y densidad aparente.

Para la determinación de estos dos parámetros se han tenido en cuenta la Recomendación de ensayo R.I.L.E.M.-I.2 (1980) (Bulk densities and real densities) que define dichas propiedades de la siguiente forma:

Densidad real: Cociente entre la masa y el volumen impermeable (volumen aparente menos el volumen de los poros accesibles al agua) de la probeta.

Densidad aparente: Cociente entre la masa y el volumen aparente (volumen limitado por la superficie exterior) de la probeta.

El procedimiento experimental seguido en este ensayo ha comportado las siguientes etapas:

-Las probetas se secan en estufa a 103°C durante al menos 24 horas y hasta alcanzar un valor de masa constante, y se pesan (M_i).

-Seguidamente, las probetas se colocan en un recipiente y se vierte lentamente agua desionizada a temperatura ambiente de modo que las probetas no queden completamente sumergidas antes de 15 minutos.

-Las probetas se mantienen sumergidas en agua durante 24 horas a la presión atmosférica. Se efectúa una pesada con la probeta saturada sumergida en el agua (pesada hidrostática) y otra con la probeta saturada (secada rápidamente con un paño) al aire.

Los valores de la densidad real (g/cm^3) se calculan según la ecuación:

$$D_R = \frac{M_1}{M_1 - M_2}$$

donde M_1 es la masa de la probeta seca (g) y M_2 masa hidrostática de la probeta saturada de agua.

Los valores de la densidad aparente (g/cm^3) se calculan según la ecuación:

$$D_A = \frac{M_1}{M_3 - M_2}$$

donde M_1 es la masa de la probeta seca (g), M_2 es la masa hidrostática de la probeta saturada de agua (g) y M_3 masa de la probeta saturada de agua pesada al aire (g).

Resultados y discusión

La Tabla 11.5. muestra los valores promedio y desviación estándar de la densidad real y la densidad aparente de tres réplicas de cada grupo de morteros obtenidas en el ensayo R.I.L.E.M.-I.2 (1980). De los valores obtenidos de densidad real, los mayores corresponden a las probetas de piedra natural TR (2,46) y BC (2,62). Próximos a ellos se encuentran los obtenidos para los morteros de cal-yeso, especialmente MN-TR y MN-BC, sin aditivos. En cambio los morteros de matriz sintética exhiben valores menores, 1,84 y 1,94 en los morteros MA y, valores 1,95 y 1,92 en los morteros MP. En cambio, los valores de densidad aparente son relativamente bajos en los morteros de cal y yeso, concretamente en los MN con los aditivos Mowilith SDM5 y ácido bórico, mientras que en los morteros de matriz sintética se observan valores muy próximos a los exhibidos en las probetas de piedra natural, especialmente los morteros MP.

Otro aspecto a destacar, es que la diferencia entre el valor de densidad real y aparente está directamente asociado a la porosidad abierta

exhibida por el material. De este modo, probetas con mayor densidad real y menor densidad aparente son las que tienen mayor volumen de porosidad y mayor intercomunicación entre poros. Como se confirma en la Tabla 11.6 en la que se indican los valores de porosidad abierta obtenidos experimentalmente tal y como se describe en la siguiente sección.

Tabla 11.5. Valores promedio de la densidad real y aparente de los morteros experimentados.

Morteros	Densidad real (g/cm³)	Desviación estándar (S)	Densidad aparente (g/cm³)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	2,46	0,01	1,99	0,03
Piedra fresca BC	2,62	0,01	2,28	0,01
MN-TR	2,30	0,02	1,64	0,01
MN-BC	2,35	0,01	1,64	0,01
MN-TR-ADT	2,02	0,01	1,33	0,00
MN-BC-ADT	2,08	0,02	1,54	0,01
MN-TR-AB	2,28	0,02	1,62	0,01
MN-BC-AB	2,24	0,00	1,63	0,00
MA-TR	1,84	0,01	1,82	0,01
MA-BC	1,94	0,00	1,90	0,00
MP-TR	1,95	0,00	1,94	0,00
MP-BC	1,92	0,01	1,91	0,01

11.1.1.4. Porosidad abierta.

La porosidad abierta define el porcentaje del volumen de huecos intercomunicados con respecto al volumen total de la roca.

El ensayo se realiza según la Recomendación R.I.L.E.M.-I.1. (1980) (Porosity accessible to water).

La porosidad accesible al agua es definida por dicho organismo como el cociente, expresado normalmente en porcentaje, entre el volumen de los poros accesibles al agua y el volumen aparente de la probeta. Es una propiedad fundamental de las rocas y materiales de construcción que influye en su durabilidad. Numerosos procesos de

alteración dan lugar a un aumento de la porosidad del material, mientras que los tratamientos de impregnación la reducen.

En este ensayo, las probetas se secan en estufa a 103°C durante, al menos, 24 horas hasta masa constante, y se pesan (M_i). Las probetas se colocan en un recipiente y se vierte agua desionizada a temperatura ambiente que se añadirá lentamente para que las probetas no queden completamente sumergidas antes de 15 minutos. Las probetas se mantienen sumergidas en agua durante 24 horas a la presión atmosférica. Seguidamente se efectúa una pesada con la probeta saturada sumergida en el agua (pesada hidrostática) y otra con la probeta saturada (secada rápidamente con un paño) al aire.

Los valores de porosidad se calculan según la ecuación:

$$\Delta P = \frac{M_T - M_0}{V} * 100$$

donde M_T es el peso (g) de la probeta en función del tiempo de inmersión, M_0 es el peso inicial (g) de la probeta y V es el volumen de la probeta (cm^3).

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en los ensayos de porosidad se resumen en la Tabla 11.6., donde se indican los valores promedio y la desviación estándar correspondiente a tres réplicas de cada grupo de morteros.

En la gráfica representada en la Figura 11.4. se puede observar que los morteros sintéticos MA y MP poseen unos valores de porosidad muy bajos, si los comparamos con el resto de morteros MN y la piedra fresca. Ello se debe a las excelentes propiedades que tienen los materiales sintéticos de aglutinar homogéneamente las partículas de árido. De entre los morteros naturales, los que exhiben un menor valor de porosidad son los aditivados con la resina acrílica Mowilith SDM 5.

De este modo, los valores mínimos, entre 0,5-2,1%, corresponden a los morteros de matriz sintética y evidencian un material poco poroso, mientras que los valores máximos de 28 y 29,2 corresponden al mortero

MN y evidencian un nivel de porosidad significativo, es decir, una cuarta parte del volumen total del mortero corresponde a poros en su interior. Nótese que la piedra Tosca de Rocafort tiene un valor de porosidad similar al de los morteros compuestos mientras que la piedra Bateig exhibe un valor de porosidad inferior al obtenido para los morteros compuestos preparados con este material.

Tabla 11.6. Porosidad de los morteros compuestos.

Morteros	Valor promedio Porosidad (%)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	26	2
Piedra fresca BC	19	1
MN-TR	28	1
MN-BC	29,2	0,7
MN-TR-ADT	25,5	0,5
MN-BC-ADT	25	1
MN-TR-AB	28	1
MN-BC-AB	26,2	0,4
MA-TR	1,4	0,6
MA-BC	2,1	0,1
MP-TR	0,5	0,2
MP-BC	0,5	0,4

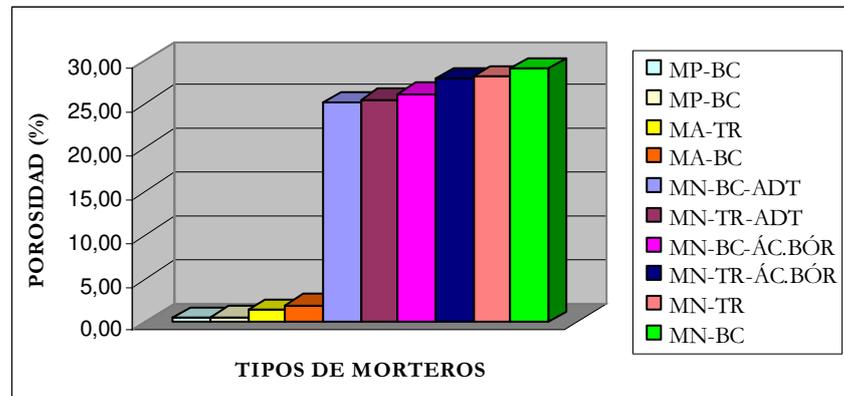


Figura 11.4. Comparación de porosidades de los distintos morteros compuestos.

11.1.1.5. Contenido humedad de saturación.

La humedad de saturación (%) representa el volumen de agua que se aloja en el sistema poroso de una roca después de estar en inmersión libre en agua a presión atmosférica durante un tiempo definido. Es un parámetro adimensional y se expresa generalmente en porcentaje con respecto al peso de la probeta seca. Depende de la estructura de los poros y nos da una idea de la capacidad natural de la roca para absorber el agua. Una piedra con una elevada humedad de saturación puede resultar deteriorada en ciertos procesos de alteración, el efecto del hielo-deshielo del agua, por ejemplo. Por tanto, este ensayo da una idea de la durabilidad de la roca (Añorbe, 1997).

La metodología operativa se fundamenta en que las probetas se secan en estufa a 103°C hasta masa constante. Posteriormente, se sumergen totalmente en un recipiente con agua desionizada que contiene una rejilla permitiendo que todas las caras de la probeta se encuentren en contacto con agua libre durante 24 horas. Finalmente, las probetas se extraen, secándolas ligeramente con un paño húmedo, y se pesan.

Los valores del contenido de humedad de saturación se calculan según la ecuación:

$$w_s = \frac{M_s - M}{M} * 100$$

donde W_s es el contenido de humedad de saturación expresado en %, M_s es el peso de la muestra saturada en agua (g) y M es el peso de la muestra seca (g).

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en los ensayos de contenido de humedad se resumen en la Tabla 11.7., donde se indican los valores promedio y la desviación estándar correspondiente a tres réplicas de cada grupo de morteros.

La humedad de saturación se asocia a la cantidad total de agua que hay alojada en el volumen poroso de la roca respecto a la masa total de la

roca seca. Esto es, el porcentaje en peso del agua embebida en el sistema poroso de la roca por inmersión total libre, según norma.

Los resultados obtenidos en el ensayo, muestran valores relativamente elevados para todos los morteros MN y, extremadamente bajos para los morteros sintéticos, especialmente los morteros de poliéster. Los morteros MN con valores superiores al 15% evidencian un mayor volumen poroso intercomunicado. Los valores promedio de contenido de humedad mostrados en la Tabla 11.7., sugieren que los morteros MN serán susceptibles de sufrir más rápidamente una alteración física, química y biológica que los morteros de matriz sintética.

Tabla 11.7. Valores promedio del contenido de humedad alojada en el sistema poroso de los morteros.

Morteros	Contenido de humedad (%)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	14,4	0,7
Piedra fresca BC	9,65	0,03
MN-TR	17,7	0,1
MN-BC	18,4	0,1
MN-TR-ADT	17,1	0,1
MN-BC-ADT	16,9	0,1
MN-TR-AB	17,9	0,1
MN-BC-AB	16,82	0,04
MA-TR	0,8	0,1
MA-BC	1,1	0,1
MP-TR	0,2	0,1
MP-BC	0,3	0,1

11.1.1.6. Coeficiente de saturación.

El coeficiente de saturación de la roca se determina según la recomendación R.I.L.E.M.-II.1 (1980) (Saturation coefficient). Dicha recomendación define este parámetro como el volumen de agua presente en los poros de un material, después de inmersión completa a presión atmosférica durante un tiempo definido, en relación con el volumen total de poros accesibles al agua. Es, por lo tanto, un coeficiente adimensional

que se expresa generalmente en tanto por ciento con respecto al volumen total de poros.

El coeficiente de saturación depende de la estructura de los poros (de su dimensión y reparto volumétrico), siendo por esto que nos puede informar sobre la durabilidad de un material poroso. Los procesos de alteración de las rocas, generalmente, dan lugar a un aumento del coeficiente de saturación.

En este ensayo las probetas se secan hasta masa constante en estufa a 103°C durante al menos 24 horas y se pesan. Posteriormente se colocan en un recipiente de fondo plano donde las probetas quedan totalmente sumergidas en agua desionizada. En el fondo del recipiente hay un soporte o rejilla que permite que todas las caras de la probeta estén en contacto directo con el agua libre. Las probetas se mantienen en dicho recipiente durante 48 h. A continuación se extraen y se pesan después de secarlas ligeramente con un paño húmedo.

Los valores del coeficiente de saturación (%) se calculan según la ecuación:

$$CS = \frac{M_s - M}{M_3 - M} * 100$$

donde M es la masa de la probeta seca (g), M₃ masa de la probeta saturada de agua pesada al aire (g) y M_s es la masa de la probeta en inmersión durante 48 horas (g).

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en los ensayos de coeficiente de saturación se resumen en la Tabla 11.8., donde se indican los valores promedio y la desviación estándar correspondiente a tres réplicas de cada grupo de morteros.

El coeficiente de saturación es el porcentaje de llenado de la porosidad abierta a lo largo de 48 horas, según norma. Como se indica en la Tabla 11.8., los valores obtenidos de coeficiente de saturación tanto en las piedras frescas como en los morteros compuestos cal-yeso son

muy similares y bastante superiores a los exhibidos por los morteros sintéticos, especialmente, los de poliéster, con un coeficiente de saturación entre 2,21% y el 3,8%, respectivamente.

El coeficiente depende en gran medida de la forma, tamaño e interconexión de los poros, de tal manera que dos materiales con diferente porcentaje de porosidad pueden diferenciarse sustancialmente en su coeficiente de saturación. Un bajo coeficiente de saturación será debido a que el material presenta escasez de poros, o bien que el tamaño de éstos sea tan grande que no retengan el agua o que la conexión porosa sea cerrada, este último es el caso de los morteros acrílicos y de poliéster. Por el contrario, si el coeficiente es elevado, el tamaño de los poros es pequeño, con forma regular e interconectados, favoreciendo la retención de agua, es el caso de las piedras frescas, los morteros cal-yeso y sus derivados, que exhiben valores comprendidos entre 71,9% y 79,89% respectivamente.

Tabla 11.8. Valores promedio del coeficiente de saturación de los morteros experimentales.

Morteros	Coefficiente de saturación (%)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	75,6	0,4
Piedra fresca BC	71,9	0,2
MN-TR	78,41	0,1
MN-BC	74,14	0,02
MN-TR-ADT	74,1	0,1
MN-BC-ADT	73,46	0,03
MN-TR-AB	78,76	0,02
MN-BC-AB	79,89	0,03
MA-TR	27,9	0,9
MA-BC	35,6	0,7
MP-TR	2,21	0,09
MP-BC	3,8	0,8

11.1.1.7. Resistencia a rotura por flexotracción

El procedimiento ha sido llevado a cabo según las recomendaciones de la Norma UNE-EN-196-1 para la determinación de resistencias mecánicas en los métodos de ensayo de cementos. Se denomina resistencia a la flexión al módulo de rotura determinado en el ensayo que se describe a continuación.

El modo operativo procedió de la siguiente manera: Se utilizan probetas con tamaño de las muestras recomendado para estos ensayos de (160 x 40 x 40) mm. Se colocó el prisma en el dispositivo de flexión, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplicó la carga verticalmente por los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma que iba incrementándose uniformemente, a una velocidad de 50 N/s, hasta rotura.

El cálculo de la resistencia a flexión R_f (N/mm²) se calculó siguiendo la fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

donde R_f es la resistencia flexión (N/mm²), b es el lado de la sección cuadrada del prisma (mm), F_f es la carga aplicada en el medio del prisma en la rotura (N), l es la distancia entre soportes (mm).

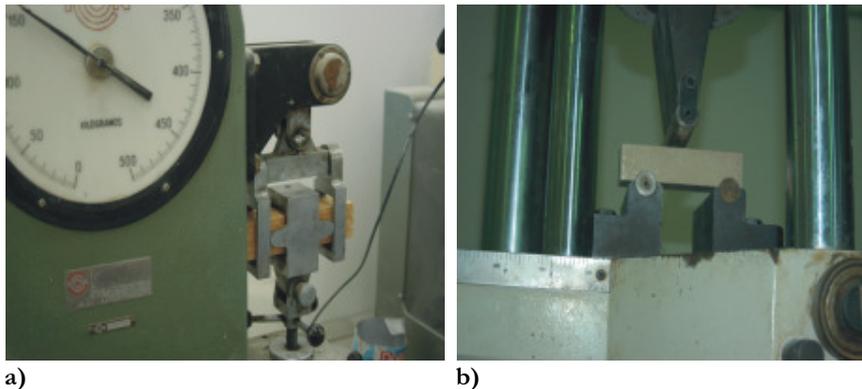


Figura 11.5.(a-b). Determinación de la resistencia mecánica a flexión.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en el ensayo de flexotracción se muestran en la Tabla 11.9. y Figura 11.6. donde se indican los valores promedio y la desviación estándar correspondiente a tres réplicas de cada grupo de morteros.

A partir de estos resultados, se observan diferencias significativas de resistencia entre ambas series de morteros MN, MA y MP. Si los comparamos, podemos observar que los valores en los morteros cal-yeso (MN), comprendidos en el rango 2,5 y 5,1 MPa, triplican a aquellos otros correspondientes a los morteros acrílicos con valores en el rango 12,7 y 13,4 MPa y, roca fresca de cantera en el rango 8,4 y 12,1 MPa. En cambio, los morteros de poliéster exhiben resistencias muy superiores al resto de morteros, con valores comprendidos en el rango 23 y 20 MPa. Si comparamos los valores obtenidos en la piedra fresca de cantería Bateig crema, podemos observar que éstos son muy similares a los correspondientes a los morteros acrílicos. Si se contrastan los valores obtenidos en los morteros MN, se observa una mayor variabilidad en los valores de resistencia, siendo el mortero MN con el aditivo ácido bórico el que exhibe los valores más bajos frente a los obtenidos en los morteros MN conteniendo Mowilith SDM5.

Los resultados obtenidos indican que los morteros MN serán aptos para aquellas intervenciones de sellados que no exigen una resistencia mecánica elevada, o reconstrucción volumétrica. Los morteros acrílicos, que exhiben valores intermedios, serán aptos para la realización de sellados y prótesis o reposiciones con ciertos requerimientos mecánicos, mientras que los morteros de poliéster se destinarían a la realización de réplicas plenas.

Las Figuras 11.7.(a-b) y 11.8.(a-b). muestran la superficie de rotura obtenida en morteros MN, MA y piedra fresca de cantera tras el ensayo de flexotracción. Se puede observar la semejanza estructural y color que mantienen ambos grupos de probetas.

Tabla 11.9. Comparación de los valores de resistencia a flexión de los morteros compuestos respecto a las piedras frescas de cantería.

Morteros	Resistencia a Flexotracción (MPa)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	8,4	0,2
Piedra fresca BC	12,1	0,3
MN-TR	5,1	0,3
MN-BC	3,2	0,1
MN-TR-ADT	4,8	0,2
MN-BC-ADT	4,4	0,5
MN-TR-AB	2,5	0,2
MN-BC-AB	2,7	0,2
MA-TR	12,7	0,8
MA-BC	13,4	0,9
MP-TR	23	1
MP-BC	20	2

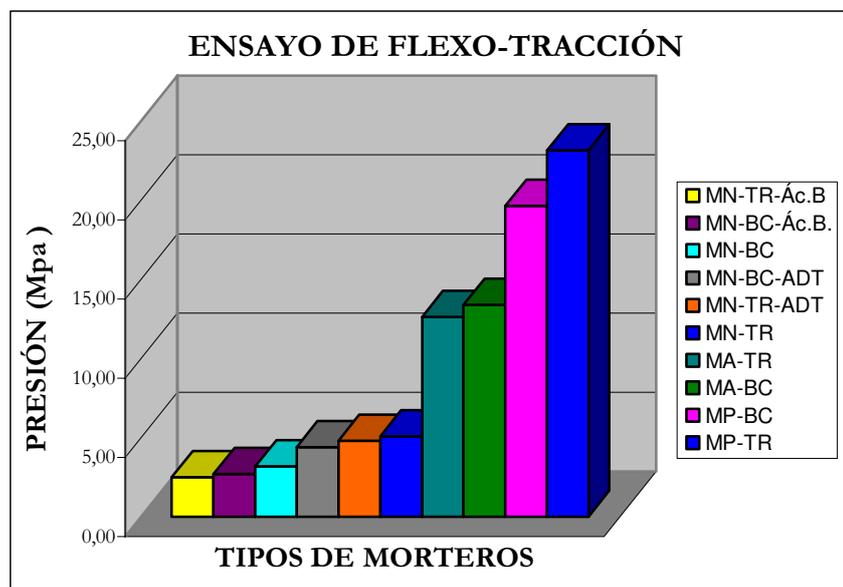


Figura 11.6. Comparación de las resistencias a flexión de los morteros compuestos.

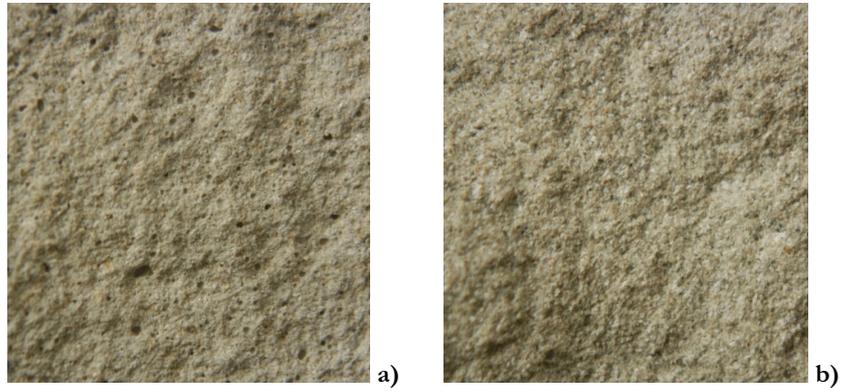


Figura 11.7. a) Superficie de fractura del mortero acrílico con árido de Bateig Crema (MA-BC). b) Superficie de fractura de la piedra fresca de cantera Bateig Crema.

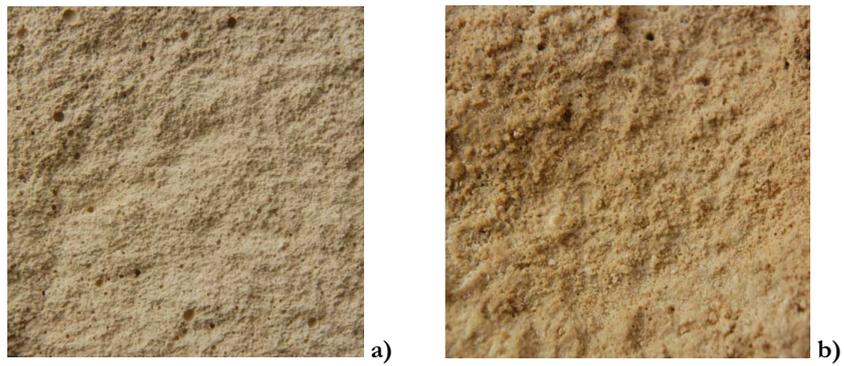


Figura 11.8. a) Superficie de fractura del mortero natural con árido de Tosca de Rocafort (MN-TR). b) Superficie de fractura de la piedra fresca de cantera Tosca de Rocafort.

11.1.1.8. Resistencia a rotura por compresión simple.

El procedimiento ha sido llevado a cabo según las recomendaciones de la Norma UNE-EN-196-1 para la determinación de resistencias mecánicas en los métodos de ensayo de cementos. Se denomina resistencia a la compresión a la carga máxima por unidad de superficie que es capaz de soportar una probeta hasta que se produzca la rotura.

El modo operativo se desarrolla de la siguiente manera: Se utilizan probetas con tamaño de las muestras recomendado para estos ensayos de (160 x 40 x 40) mm. Se ensayaron las resistencias a compresión con los semiprismas obtenidos de la rotura a flexión. Se colocó el semiprisma en el dispositivo de compresión centrándolo lateralmente con relación a los platos de la máquina. Se procedió a un aumento progresivo y uniforme de la carga a una velocidad de 2400 N/s hasta la rotura (Figura 11.9).

El cálculo de la resistencia a compresión R_c (en N/mm²) se calcula según la fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

donde R_c es la resistencia a compresión (N/mm²), F_c es la carga máxima de rotura (N), 1600 = 40 mm x 40 mm es la superficie de los platos o placas auxiliares (mm²).

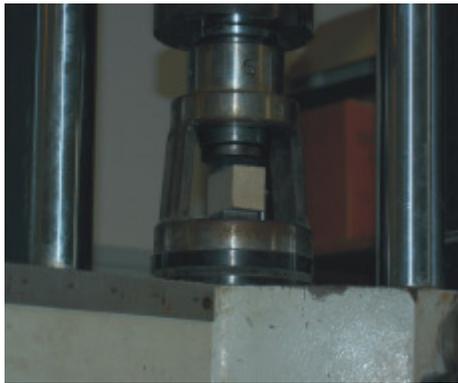


Figura 11.9. Dispositivo de determinación de resistencias mecánicas a compresión.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión se muestran en la Tabla 11.10. y en la Figura 11.10 donde se indican los valores promedio y la desviación estándar correspondiente a tres réplicas de cada grupo de morteros.

De igual modo que en el ensayo de flexión, los morteros cal-yeso exhiben valores de resistencia a compresión muy por debajo de los correspondientes a los morteros acrílico y poliéster. El mortero conteniendo ácido bórico sigue siendo el que presenta valores más bajos, siendo los morteros sin aditivos los que presentan valores mayores, dentro del grupo de morteros compuestos realizados con cal-yeso. Sin embargo, el valor de resistencia a compresión del mortero acrílico Tosca de Rocafort (36,3 Mpa) es significativamente inferior al obtenido en la piedra de cantera (45,9 Mpa). Ello puede deberse al menor tamaño de partícula empleado durante la elaboración del mortero. Por el contrario, el mortero acrílico Bateig Crema exhibe un valor de resistencia a compresión bastante próximo a la roca fresca. Finalmente, los valores obtenidos en los morteros de poliéster, evidencian las magníficas propiedades adhesivas y ligantes de este polímero sintético.

En este ensayo se han observado, también, comportamientos diferentes respecto a la fractura entre los diferentes morteros y las piedras frescas. Los morteros MN se desagregaban notablemente ante la presión ejercida, mientras que los morteros acrílicos exhibían una reducción del tamaño de la probeta, comprimiéndose, pero sin llegar a descohesionarse (Figura 11.11.). También se observan la aparición de grietas que denotan cierta flexibilidad del material (Figura 11.12.). Por el contrario, la rotura a compresión en los morteros de poliéster era drástica, produciéndose la proyección de los fragmentos de rotura. La fractura de estas probetas presentó una rotura cristalina, sin descohesión de partículas.

Finalmente, el comportamiento frente a la rotura a compresión de la roca fresca, es muy similar al de los morteros cal-yeso y acrílicos.

Tabla 11.10. Comparación de los valores de resistencia a compresión de los morteros compuestos respecto a las piedras frescas de cantería.

Morteros	Resistencia a Compresión (MPa)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR	45,9	0,9
Piedra fresca BC	36,3	0,8
MN-TR	10,3	0,8
MN-BC	9,3	0,9
MN-TR-ADT	8	1
MN-BC-ADT	9,3	0,5
MN-TR-AB	5,7	0,4
MN-BC-AB	6,3	0,3
MA-TR	36	2
MA-BC	38	1
MP-TR	94	2
MP-BC	80	3

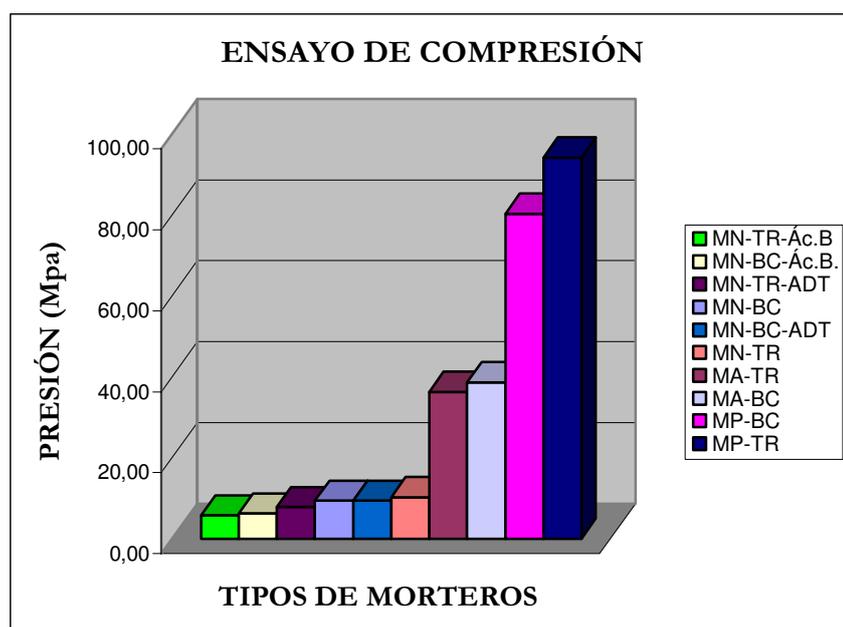


Figura 11.10. Comparación de las resistencias a compresión de los morteros compuestos.



Figura 11.11. Mortero acrílico Bateig Crema tras el ensayo de compresión. Existe compresión sin desmoronamiento de partículas.



Figura 11.12. Mortero acrílico Tosca de Rocafort tras el ensayo de compresión. Presencia de grietas por las cargas a compresión ejercidas sobre la probeta.

11.1.1.9. Resistencia al desgaste por fricción en seco y en húmedo.

En este ensayo (Figura 11.13.) se determina la cantidad de masa de probeta perdida por acción del rozamiento o fricción de la superficie del mortero en estado seco y húmedo (lubricado). Ello es posible gracias al empleo del tribómetro (Figura 11.14.) con sistema pin-on-disk, consistente en un dispositivo que posee un brazo al cual va unido el portabolas o punzón (pin) (Figura 11.15.), un accesorio que rota hasta un diámetro de 100 mm, denominado porta muestras (Figura 11.16.), un dinamómetro electrónico que mide la fuerza de fricción y, un sistema de control, medida y registro automatizado por ordenador. Además, incluye un conjunto de pesas calibradas (1, 2, 5, 10 y 20 N).

La fricción se expresa en términos relativos de fuerza, como el cociente entre la fuerza de fricción y la carga normal a la superficie de contacto.

$$\mu = \frac{F}{N}$$

donde F es el vector fuerza de aplicación horizontal, N es la componente normal, correspondiente según la Ley de Acción y Reacción y μ es el coeficiente de rozamiento.

El fenómeno de fricción comprende diversos efectos tales como desgaste y adhesión.

El desgaste se asocia a la desaparición de material de la superficie de un cuerpo como consecuencia de la interacción con otro cuerpo.

La adhesión se define como la capacidad para generar fuerzas de unión entre dos superficies o elementos después de que han sido mantenidas juntas. Es decir, la capacidad de mantener dos cuerpos unidos por la generación anterior de fuerzas de unión entre ambos.

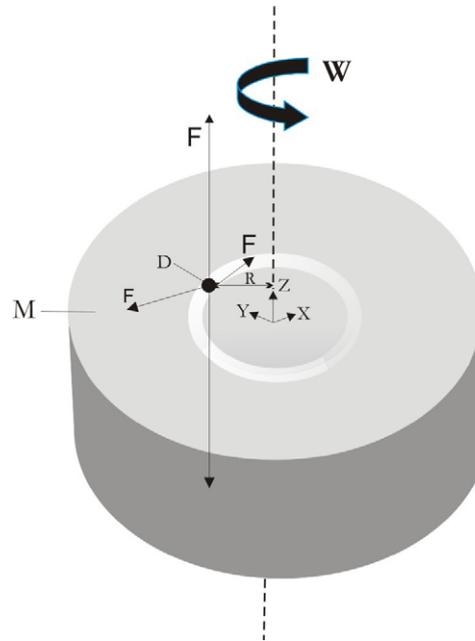


Figura 11.13. Partes y método de funcionamiento del tribómetro pin-on-disk, donde W es la velocidad de rotación, R es el radio de desgaste de la huella, F es la fuerza normal del pin, D es el diámetro del pin o de la bola, M es la muestra y X - Y - Z son los ejes de coordenadas.



Figura 11.14. Tribómetro con sistema pin-on-disk. Máquina de desgaste por rozamiento.



Figura 11.15. Brazo del tribómetro, al cual va unido el portabolas o punzón (pin).

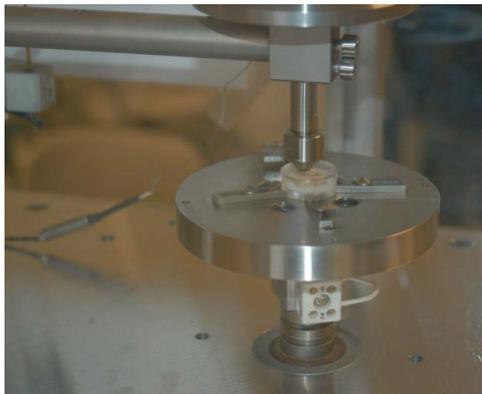


Figura 11.16. Accesorio que rota denominado porta muestras con diámetro de hasta 100 mm, y dinamómetro electrónico que mide la fuerza de fricción.

Para el ensayo de desgaste por rozamiento, llevado a cabo según la norma ASTM G40-02, se han tenido que englobar muestras de los diferentes morteros a estudio con metacrilato, mediante una embudidora Labopress-3 de Struers. Después de la inclusión en el bloque de resina acrílica cada una de las probetas ha sido pesada y colocada en el porta muestras. Los parámetros constantes a los que se sometieron las

probetas fueron: distancia de recorrido 50 metros, fuerza de rozamiento 5 N, tiempo de recorrido 26,30 min. y velocidad de rozamiento 150 rpm.

El ensayo se efectuó tanto en seco como en húmedo, en este último caso, mediante el empleo de agua como lubricante. Al finalizar el ciclo, las muestras se pesaron determinándose la cantidad de masa eliminada por la huella del pin.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este ensayo aparecen resumidos en la Tabla 11.11 donde se indican los valores promedio y la desviación estándar correspondiente a dos réplicas de cada grupo de morteros.

Los valores de pérdida de masa en seco más elevados corresponden a las probetas de mortero cal-yeso MN-BC (2,7%) y MN-TR (1,1%), así como mortero MN-TR conteniendo el aditivo ácido bórico (1,4%). Los morteros acrílicos, el mortero MN-TR aditivo Mowilith SDM 5, las piedras frescas de cantera y el mortero MN-BC conteniendo Mowilith SDM 5 exhiben valores comprendidos entre 0,5 y 0,1%. Finalmente, los morteros de poliéster exhiben valores inapreciables de pérdida de masa.

En cambio, los resultados obtenidos por desgaste en húmedo presentan pérdidas evidentes en el mortero MN-TR y MN-BC conteniendo ácido bórico. Los valores correspondientes a las piedras frescas y a los morteros MN son bastante afines, siendo más elevados en estos últimos. Por el contrario, los morteros MN con aditivo Mowilith SDM 5 y los de matriz sintética apenas han sufrido desgaste.

Finalmente, si comparamos el desgaste obtenido en ambos tipos de ensayo se manifiesta una mayor pérdida de soporte en seco que en húmedo, lo cual sugiere que el agua ejerce una acción eficaz como lubricante sobre los materiales en estudio.

Tabla 11.11. Valores de pérdida de masa en seco y en húmedo de los morteros compuestos y materiales pétreos ensayados.

Morteros	DESGASTE EN SECO		DESGASTE EN HÚMEDO	
	Pérdida de masa (g)	Porcentaje pérdida de masa (%)	Pérdida de masa (g)	Porcentaje pérdida de masa (%)
Piedra TR	-0,0162	0,2	-0,0235	0,3
Piedra BC	-0,0093	0,1	-0,0218	0,3
MN-TR	-0,0799	1,1	-0,0385	0,5
MN-BC	-0,2024	2,7	-0,0345	0,4
MN-TR-ADT	-0,0392	0,5	-0,0092	0,1
MN-BC-ADT	-0,0144	0,1	-0,0152	0,1
MN-TR-AB	-0,1102	1,4	-0,146	2,0
MN-BC-AB	-0,0172	0,2	-0,0623	0,8
MA-TR	-0,0586	0,6	-0,0031	0,0
MA-BC	-0,0324	0,3	-0,0026	0,0
MP-TR	-0,0001	0,0	-0,0001	0,0
MP-BC	-0,001	0,0	-0,001	0,0

11.1.2. ESTABILIDAD FRENTE A AGENTES DEGRADANTES FÍSICO-QUÍMICOS.

11.1.2.1. Introducción.

Todo el conjunto de ensayos de estabilidad frente a agentes degradantes físico-químico se ha llevado a cabo con morteros compuestos realizados según las formulaciones establecidas en este estudio como se describe en la Tabla 10.22.(a-c).

Con el fin de conocer la incidencia en los morteros compuestos estudiados de los factores medioambientales que ocasionan los cambios de temperatura y humedad, o lo que es lo mismo, valorar la durabilidad, y/o resistencia a la alteración asociada a agentes degradantes físico-químicos de dichos morteros, se han seleccionado seis ensayos que permiten obtener información acerca del comportamiento de los

morteros compuestos considerados en condiciones de puesta en obra (Tabla 11.12).

Tabla 11.12. Ensayos físico-químicos.

ENSAYOS FÍSICO-QUÍMICOS
Envejecimiento acelerado termohigrométrico
Envejecimiento acelerado por irradiación con luz Ultravioleta
Resistencia a las heladas
Cristalización salina
Envejecimiento acelerado en atmósfera saturada con SO ₂
Contaminación medio-ambiental a la intemperie

11.1.2.2. Envejecimiento acelerado termohigrométrico.

En este ensayo se ha sometido las probetas a tres tipos diferentes de envejecimiento acelerado termohigrométrico, con el propósito de evaluar las diferencias de comportamiento del material asociadas a diferentes condiciones climáticas, de temperatura y humedad. Estos climas simulados en cámara de envejecimiento han sido: clima tropical (40°C- 90% HR), clima templado (22°C-65% HR) y clima seco (75°C-45% HR). Las probetas han estado sometidas a cada una de estas condiciones durante un mes.

Se han efectuado determinaciones colorimétricas sobre las probetas antes y después de ser sometida a ensayo de envejecimiento termohigrométrico, eligiendo como condiciones de trabajo el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de color 6500° K) y el observador estándar 10°.

Se emplearon tres réplicas de cada mortero compuesto en la simulación de cada uno de los tres climas referidos.

Resultados y discusión

La Tabla 11.13. muestra las variaciones de las coordenadas cromáticas L*, a*, b* y sus desviaciones estándar, la variación de color total (ΔE) y, la variación de tono (Δh) correspondientes a los morteros

elaborados con piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema sometidas a envejecimiento acelerado termohigrométrico simulando clima tropical.

En general, se observa en todos los morteros valores de variación de color total (ΔE) bajos, especialmente el mortero de cal-yeso con piedra Tosca que incorporan Mowilith SDM 5 (MN-TR-ADT) y, los morteros de cal-yeso con piedra Bateig (MN-BC), con valores 0,62 y 0,20 respectivamente.

Se observa, en general, un descenso del valor de luminosidad de los morteros compuestos lo cual justifica el ligero oscurecimiento observado tras el ensayo, si bien esta disminución de luminosidad es muy baja, especialmente en los morteros MN-TR-ADT ($\Delta L = -0,34$) y MN-BC ($\Delta L = -0,03$).

Desde el punto de vista cromático, se observa en los morteros compuestos MN-TR-ADT y MN-BC un desplazamiento de color hacia el verde y hacia el azul, mientras que el resto de morteros compuestos tienden hacia el amarillo y hacia el rojo, como ponen de manifiesto las coordenadas cromáticas obtenidas.

Tabla 11.13. Variación de las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* , desviación estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico: clima tropical.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	83,10	0,01	81,86	0,02	-1,24	2,86	0,01	2,93	0,01	0,07	10,36	0,02	10,01	0,02	-0,35	1,29	-0,88
MN-TR-AB	80,26	0,01	78,18	0,01	-2,08	3,18	0,01	3,65	0,08	0,46	10,76	0,01	11,69	0,01	0,92	2,32	-0,85
MN-TR-ADT	81,05	0,02	80,71	0,01	-0,34	3,25	0,01	3,12	0,01	-0,13	10,16	0,02	9,66	0,02	-0,51	0,62	-0,18
MA-TR	76,68	0,01	73,5	0,1	-3,16	2,85	0,03	3,52	0,03	0,67	11,79	0,01	12,94	0,03	1,16	3,43	-1,63
MP-TR	77,78	0,02	74,49	0,02	-3,29	1,50	0,01	1,82	0,01	0,32	6,45	0,02	7,04	0,01	0,59	3,35	-1,41
MN-BC	87,07	0,01	87,03	0,01	-0,03	0,41	0,01	0,35	0,03	-0,06	5,46	0,03	5,27	0,02	-0,19	0,20	0,52
MN-BC-AB	84,07	0,03	83,15	0,03	-0,92	0,50	0,02	0,57	0,01	0,07	6,34	0,02	6,24	0,01	-0,11	0,93	-0,67
MN-BC-ADT	85,00	0,02	84,05	0,01	-0,95	0,53	0,01	0,53	0,02	0,00	5,71	0,02	5,66	0,06	-0,05	0,95	0,00
MA-BC	79,87	0,01	78,50	0,09	-1,37	0,58	0,03	0,64	0,02	0,06	6,87	0,02	7,99	0,01	1,13	1,77	0,23
MP-BC	71,28	0,02	69,98	0,01	-1,30	0,55	0,03	0,51	0,01	-0,05	5,49	0,01	6,83	0,02	1,34	1,87	1,34

La Tabla 11.14. muestra las variaciones de las coordenadas cromáticas L*, a*, b* y sus desviaciones estándar, la variación de color total ΔE y la variación de tono Δh correspondientes a los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema simulando un clima seco.

Tabla 11.14. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, desviación estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico: clima seco.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	82,33	0,02	80,55	0,02	-1,78	2,90	0,02	3,14	0,02	0,24	10,27	0,02	10,51	0,02	0,23	1,81	0,88
MN-TR-AB	78,94	0,03	77,59	0,01	-1,35	3,72	0,01	3,85	0,02	0,12	12,50	0,01	13,24	0,02	0,74	1,54	0,39
MN-TR-ADT	81,97	0,02	81,08	0,01	-0,88	3,29	0,01	3,15	0,02	-0,14	11,01	0,01	11,27	0,01	0,26	0,93	1,00
MA-TR	76,97	0,01	75,97	0,01	-0,99	2,67	0,02	2,85	0,03	0,18	10,24	0,01	10,76	0,02	0,52	1,13	0,23
MP-TR	70,95	0,01	68,63	0,01	-2,32	2,45	0,02	2,84	0,01	0,39	7,18	0,01	8,88	0,02	1,70	2,90	1,10
MN-BC	86,78	0,02	85,18	0,02	-1,60	0,45	0,09	0,49	0,03	0,04	5,27	0,02	5,55	0,03	0,29	1,62	0,16
MN-BC-AB	84,68	0,03	82,91	0,02	-1,77	0,38	0,09	0,48	0,02	0,09	6,00	0,02	6,45	0,09	0,45	1,83	0,58
MN-BC-ADT	85,43	0,01	84,43	0,03	-0,99	0,47	0,03	0,49	0,03	0,02	5,90	0,02	6,92	0,04	1,02	1,42	0,54
MA-BC	80,19	0,02	78,94	0,02	-1,25	0,44	0,03	0,93	0,03	0,49	6,79	0,01	7,65	0,02	0,86	1,59	3,23
MP-BC	66,12	0,02	65,86	0,07	-0,26	0,57	0,01	0,74	0,02	0,17	5,65	0,02	6,77	0,02	1,13	1,17	0,49

En general se observa que, todos los morteros se han visto afectados, en mayor o menor medida, por las condiciones ambientales a las que han sido sometidos, siendo el mortero de cal-yeso elaborado con piedra Tosca de Rocafort con aditivo Mowilith SDM 5 el más estable, con una variación de color total de 0,93.

Desde el punto de vista de la luminosidad, se vuelve a observar la misma tendencia de disminución del valor de L* que se dio para el ensayo de clima tropical.

Desde el punto de vista cromático, se observa en el mortero compuesto MN-TR-ADT un desplazamiento de color hacia el verde y hacia el amarillo, mientras que el resto de morteros compuestos tienden hacia el amarillo y hacia el rojo.

Las series de morteros cal-yeso y acrílico elaborados con piedra Tosca de Rocafort (MN-TR y MA-TR) y los morteros de poliéster realizados con piedra Bateig Crema (MP-BC) exhiben variaciones de color muy bajas.

La Tabla 11.15. muestra las variaciones de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, desviación estándar, la variación de color total ΔE , y la variación de tono Δh correspondientes a los morteros elaborados con piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico simulando un clima templado.

Tabla 11.15. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, su desviación estándar, la variación de color total (ΔE) y la variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico: clima templado.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	79,59	0,01	81,99	0,02	2,40	3,71	0,01	3,01	0,01	-0,70	11,90	0,02	10,11	0,01	-1,79	3,07	0,72
MN-TR-AB	82,57	0,02	81,29	0,02	-1,28	2,98	0,01	2,80	0,01	-0,18	10,11	0,02	9,09	0,01	-1,02	1,65	-0,73
MN-TR-ADT	79,64	0,03	78,06	0,02	-1,59	3,78	0,02	3,59	0,01	-0,19	11,80	0,02	10,83	0,01	-0,97	1,87	-0,58
MA-TR	77,42	0,03	76,3	0,1	-1,16	2,69	0,02	2,83	0,01	0,15	10,28	0,03	11,08	0,02	0,80	1,42	0,31
MP-TR	74,78	0,01	74,11	0,01	-0,66	1,75	0,02	1,70	0,02	-0,06	6,50	0,03	6,34	0,02	-0,16	0,69	0,11
MN-BC	86,66	0,01	85,78	0,01	-0,88	0,39	0,01	0,31	0,03	-0,08	5,19	0,03	4,79	0,02	-0,41	0,97	0,58
MN-BC-AB	84,77	0,01	83,57	0,04	-1,20	0,55	0,01	0,51	0,03	-0,04	6,72	0,03	6,21	0,01	-0,51	1,30	-0,02
MN-BC-ADT	85,13	0,01	84,44	0,02	-0,68	0,57	0,01	0,55	0,01	-0,02	6,64	0,01	6,10	0,02	-0,54	0,87	-0,27
MA-BC	79,16	0,02	78,97	0,02	-0,18	0,81	0,01	0,92	0,01	0,11	7,71	0,01	7,74	0,02	0,03	0,22	-0,78
MP-BC	67,30	0,02	67,63	0,02	0,33	0,38	0,03	0,15	0,02	-0,23	4,72	0,01	3,99	0,02	-0,73	0,83	2,40

Los morteros acrílicos y de poliéster elaborados a partir de piedra Tosca de Rocafort exhiben, en general, unas variaciones de color total bajas, siendo en los morteros de cal-yeso ligeramente superiores. En cambio, los morteros de cal-yeso, acrílicos y de poliéster elaborados a partir de piedra Bateig exhiben, en general, unas variaciones de color total muy bajas, especialmente en los morteros MA-BC ($\Delta E= 0,22$).

Se observa, en general, un descenso del valor de luminosidad de los morteros compuestos lo cual justifica el ligero oscurecimiento observado tras el ensayo, si bien esta disminución de luminosidad es muy baja, especialmente en los morteros MA-BC ($\Delta L = -0,18$) y MP-TR ($\Delta L = -0,66$).

Desde el punto de vista cromático, se observa en los morteros compuestos acrílicos un desplazamiento de color hacia el amarillo y hacia el rojo, mientras que el resto de morteros compuestos tienden hacia el verde y hacia el azul, como ponen de manifiesto los valores de las coordenadas cromáticas obtenidas.

Al comparar los resultados obtenidos en las Tablas 11.13-11.15 se observa que, los morteros compuestos experimentan variaciones de color total bajas, especialmente los de cal-yeso; además, exhiben valores de luminosidad relativamente bajos, confiriendo al mortero un aspecto ligeramente más oscuro. Las variaciones más significativas en el tono se han producido en los ensayos simulando clima tropical y seco. En general, se ha observado una deriva hacia el amarillo y el rojo en los tres tipos de morteros compuestos, siendo ésta más acentuada en el mortero MA-TR.

11.1.2.3. Envejecimiento acelerado por irradiación con luz Ultravioleta.

En las series de probetas se efectuaron medidas colorimétricas antes y después de ser sometida a ensayo de envejecimiento por luz de ultravioleta, eligiendo como condiciones operativas el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de color 6500° K) y el observador estándar 10°.

Se emplearon tres réplicas de cada mortero compuesto en la simulación del envejecimiento acelerado por irradiación por luz ultravioleta.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en el ensayo de envejecimiento acelerado por irradiación con luz ultravioleta se muestran en la Tabla 11.16.

En los morteros de cal-yeso, acrílicos y de poliéster elaborados con piedra Bateig, se observa una disminución en los valores de luminosidad lo cual se traduce en un aspecto ligeramente más oscuro de las probetas. Asimismo, los morteros de cal-yeso y acrílicos elaborados con piedra Tosca de Rocafort exhiben un aspecto más apagado tras el envejecimiento, mientras que los morteros de poliéster exhiben un ligero incremento en los valores de luminosidad, que se traduce en una mayor claridad de la superficie del mortero.

Desde el punto de vista cromático, se observa en los morteros compuestos de poliéster elaborados con Tosca de Rocafort un desplazamiento de color hacia el verde y hacia el azul, mientras que el resto de morteros compuestos tienden hacia el amarillo y hacia el rojo. En cambio, los morteros de cal-yeso y acrílicos elaborados con Bateig exhiben un desplazamiento hacia el amarillo y hacia el verde, mientras que los de poliéster se derivan hacia el amarillo y hacia el rojo, como ponen de manifiesto los valores de las coordenadas cromáticas obtenidas.

Tabla 11.16. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, su desviación estándar, la variación de color total (ΔE) y la variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados sometidos a irradiación de luz ultravioleta.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	81,51	0,01	81,24	0,02	-0,28	3,12	0,01	3,25	0,02	0,13	10,27	0,02	11,38	0,02	1,11	1,15	0,97
MN-TR-AB	81,51	0,01	80,12	0,02	-1,39	3,24	0,01	3,55	0,02	0,31	10,69	0,01	11,54	0,02	0,85	1,66	-0,23
MN-TR-ADT	81,68	0,01	80,82	0,02	-0,87	3,01	0,01	3,17	0,03	0,16	10,11	0,01	11,03	0,02	0,91	1,27	0,53
MA-TR	78,47	0,01	77,37	0,01	-1,10	2,29	0,01	2,59	0,03	0,29	9,03	0,02	10,46	0,02	1,43	1,83	0,37
MP-TR	73,95	0,01	74,07	0,01	0,12	1,91	0,02	0,39	0,02	-1,52	6,87	0,02	5,74	0,02	-1,13	1,89	-1,76
MN-BC	86,79	0,02	86,89	0,01	0,10	0,49	0,02	0,39	0,01	-0,10	5,31	0,03	5,79	0,01	0,48	0,50	1,43
MN-BC-AB	84,15	0,01	84,05	0,01	-0,10	0,48	0,02	0,38	0,01	-0,11	6,27	0,03	6,52	0,01	0,25	0,29	1,09
MN-BC-ADT	86,50	0,01	85,99	0,01	-0,51	0,49	0,03	0,41	0,01	-0,08	5,86	0,03	6,22	0,02	0,36	0,63	1,01
MA-BC	80,27	0,01	79,90	0,02	-0,37	0,55	0,01	0,49	0,01	-0,07	6,28	0,02	6,80	0,02	0,52	0,64	0,93
MP-BC	75,22	0,01	70,77	0,01	-4,44	0,09	0,03	2,23	0,01	2,13	4,54	0,02	7,15	0,01	2,62	5,58	-2,79

11.1.2.4. Resistencia a las heladas (ciclos de hielo-deshielo)

El ensayo ha sido llevado a cabo según las recomendaciones de la Comisión 25 PEM de la RILEM 1980 (Ensayo n° V. 3).

Los ciclos se hicieron sobre probetas cúbicas de morteros de 5 cm de arista. Los ciclos se repitieron hasta la descohesión total de las probetas. Se emplearon tres réplicas de cada mortero compuesto.

La metodología de trabajo que se empleó fue la siguiente:

-Las probetas se secaron en estufa a 50° C hasta obtener un valor de masa constante.

-A continuación, las probetas se introdujeron en una cubeta de plástico con agua potable entre 15 °C y 20 °C durante 18 h.

-Las probetas se sometieron a cuarenta y ocho ciclos consistentes en: una fase de congelación (-15 °C) y, una etapa de descongelación manteniendo las probetas 18 h en inmersión a (10 °C ± 2 °C).

-Al final de cada ciclo se determina la masa de la probeta.

Resultados y discusión

Se estudian las pérdidas de masa de las probetas de morteros compuestos a lo largo de los 49 ciclos que se practicaron en el ensayo de resistencia a las heladas.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 11.17. y en las Figuras 11.17-22. Cabe señalar, en primer lugar, que se evidencia una pérdida significativa de masa en las probetas de mortero cal-yeso aditivadas, a lo largo de todo el ensayo mientras que este efecto no es tan marcado en los morteros sin aditivo. El grupo de morteros elaborados con resina acrílica exhiben un valor de pérdida de masa inferior al de los morteros cal-yeso aditivados y, bastante similar al de éstos sin aditivar. En cuanto al grupo de morteros de poliéster, señalaremos que exhiben los valores más bajos de pérdida de masa en el mismo rango que las piedras naturales. Por otra parte, el hecho de que los morteros preparados con Tosca de Rocafort muestren unos valores de pérdida

ligeramente mayores a la serie elaborada con piedra bateig, puede deberse al diferente tamaño de partícula de árido empleado en su elaboración (0,250-0,420 mm).

Tabla 11.17. Valores de pérdida de masa (g) al finalizar el ensayo de resistencia a las heladas.

Morteros	Ciclos	Pérdida de masa (g)	Desv. (S)
Piedra fresca TR*	19	-0,8	0,4
Piedra fresca BC ⁺	-	-0,06	-
MN-TR	40	-9	6
MN-BC	47	-2	1
MN-TR-ADT	49	-45	9
MN-BC-ADT	49	-44	4
MN-TR-AB	49	-69	8
MN-BC-AB	49	-95	9
MA-TR	49	-7	1
MA-BC	49	-4	2
MP-TR	49	-0,12	0,01
MP-BC	49	0,18	0,02

*Probetas fragmentadas antes de finalizar el ensayo de resistencia a las heladas (Ciclo n° 19).

+Dato tomado del artículo “La Piedra de Novelda: una roca muy utilizada en el patrimonio arquitectónico”. Materiales de construcción, Vol.52, n° 266. Fort, et al. 2002.

La Figura 11.17. representa las curvas de pérdida de masa obtenidos en los diferentes tipos de morteros estudiados. Se observa que, mientras los morteros elaborados con conglomerantes sintéticos mantienen estable su masa, los morteros de cal-yeso reducen significativamente ésta en los 49 ciclos realizados.

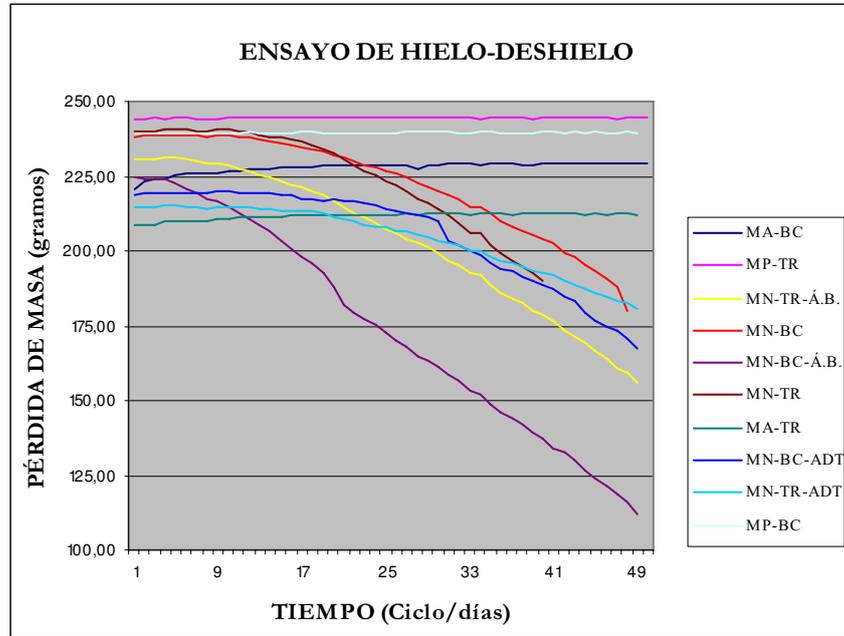


Figura 11.17. Curvas de pérdida de masa (g) de los morteros compuestos estudiados.

Por otro lado, resulta muy interesante la estimación visual de las modificaciones que se producen en la superficie de las probetas a lo largo del ensayo. En este sentido, algunos autores (Añorbe, 1997) han llegado a establecer que es posible correlacionar éstas con los mecanismos de alteración que originan las patologías macroscópicas o con los indicadores visuales de alteración de la roca en monumento.

En general, en las distintas caras de las probetas de mortero calyeso se aprecian pérdidas superficiales de material afectando primero al conglomerante y, posteriormente, ocasionando el desprendimiento de las partículas de árido por descohesión. En cambio, las series de mortero de matriz sintética, debido a la gran cohesión que les confiere el conglomerante (Figura 11.23.), no presentan modificaciones superficiales significativas a simple vista. Cabe añadir que, las probetas de mortero calyeso, de aspecto menos compacto (Figura 11.20-22.), han desarrollado morfologías macroscópicas de alteración similares a las observadas en

probetas procedentes de monumentos (Figura 11.19.), siendo éstas, desagregación granular, desmoronamiento, desplazación, descamación y descohesión. El ensayo de helicidad muestra patologías más espectaculares que el ensayo de resistencia a la cristalización salina, como se verá en la siguiente sección.

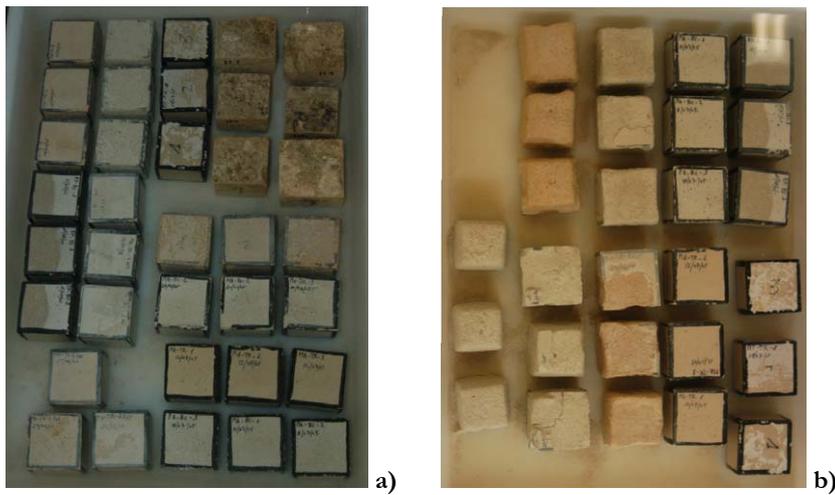


Figura 11.18. Probetas de morteros sometidas al ensayo de resistencia a la helicidad. a) Grupo de probetas al inicio; b) Grupo de probetas después de ser sometidas a ciclos de hielo-deshielo.

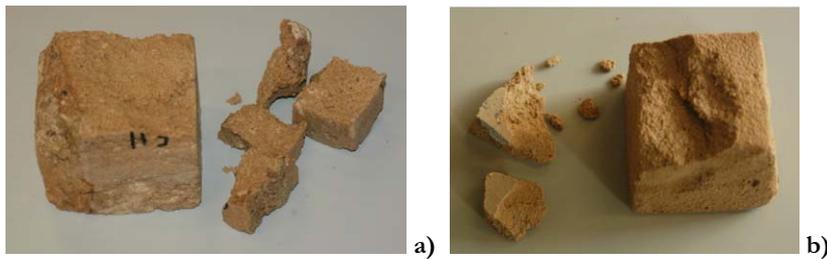


Figura 11.19. Fragmentación de probetas durante los ciclos de hielo-deshielo. (a) Piedra fresca de cantera Tosca de Rocafort alterada (ciclo nº 19/49). (b) Probeta mortero cal-yeso (MN) Tosca de Rocafort alterada (ciclo nº 39/49). Las formas de alteración son similares a las observadas en las piedras naturales.



Figura 11.20. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Bateig Crema durante los ciclos de helacidad (ciclo nº 35). Se observa la presencia de grietas, desagregación granular, desaglomeración, etc.



Figura 11.21. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Bateig Crema más el aditivo Mowilith SD 5 al finalizar los ciclos de hielo-deshielo. Se observa desagregación granular, descamación y desplazación.



Figura 11.22. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Tosca de Rocafort durante los ciclos de helacidad (ciclo nº 39/49). Se perciben grietas, pérdida de volumen desagregación granular, desmoronamiento y desplazación.



Figura 11.23. Probetas de morteros de matriz sintética sometidas al ensayo de resistencia a la heladicidad al finalizar los ciclos. Las probetas mantienen su forma cúbica.

11.1.2.5. Resistencia a la cristalización de sales por inmersión total (ciclos de cristalización de sales)

En este ensayo se evalúa la alteración causada por la presencia de sales en las probetas de morteros y se establece, en la medida de lo posible, una correlación entre el deterioro sufrido por la muestra en el monumento y el simulado en el laboratorio.

El procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de la Comisión 25 PEM de la RILEM 1980 (Ensayo n° V. 1 b).

Los ciclos se llevaron a cabo sobre 3 probetas cúbicas de morteros de 5 cm de arista. Se realizaron ciclos hasta el desmoronamiento de las probetas.

La metodología experimental consistió en:

-Las probetas se secaron en estufa a 50° C hasta alcanzar masa constante.

-Inmersión de las probetas en una solución salina de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ al 14%. Se realizaron quince ciclos consistentes en 4 h

inmersión en solución salina a temperatura ambiente, 16 h secado en estufa a 65 °C y 4 h en desecador a temperatura ambiente.

-La masa de las probetas se determinó al final de cada uno de los ciclos.



Figura 11.24. Detalle de las probetas en fase de inmersión con la disolución salina saturada y, fase de secado de las probetas en la estufa.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a lo largo del ensayo de cristalización salina de los morteros artificiales se muestran en la Tabla 11.18. Los morteros de tipo cal-yeso han sufrido, en general, un aumento de masa a lo largo del ensayo. Esto puede ser debido a la precipitación de agregados salinos en el interior de los poros, los cuales, a medida que se aumenta el número de ciclos practicados, van aumentando su tamaño y permitiendo, por tanto, la precipitación de un mayor número de cristales. Estas sales precipitadas y retenidas en el retículo poroso compensarían la posible pérdida de material que tendría lugar a lo largo del ensayo como efecto de la migración de la disolución salina a través de la red porosa del mortero. En cambio, las series de morteros elaborados con conglomerante sintético exhiben pérdidas de masa inapreciables que se mantienen dentro del rango del error experimental. Al igual que ocurre en el ensayo de resistencia a las heladas, el hecho de que los morteros elaborados con piedra Tosca de Rocafort muestren unos valores de pérdida de masa mayores podría deberse al mayor tamaño de partícula de árido empleado en su elaboración (0,06-0,42 mm) con respecto al de Bateig Crema (0,06-1,00 mm). El tamaño de partícula, influye en la absorción de agua y de los contaminantes, debido a la mayor superficie específica del árido de menor tamaño, por tanto, a mayor tamaño de partícula menor será la absorción y viceversa.

En general, la inspección visual de las modificaciones experimentadas por los morteros cal-yeso en las superficies de las probetas a lo largo del ensayo muestra pérdidas superficiales de material significativas que afectan al conglomerante, y a la cohesión de las partículas del árido (Figuras 11.25-28.). Estas morfologías de alteración son similares a las observadas en monumentos, consistiendo en: desagregación granular, desmoronamiento, desplazación, descamación y descohesión. En cambio, las series de probetas de mortero elaborados con conglomerante sintético, más homogéneas (Figura 11.29.), no presentan modificaciones superficiales significativas a simple vista, excepto una capa de microcristales depositados en superficie por precipitación de las sales que les confieren un aspecto blanquecino.

Tabla 11.18. Valores de pérdida de masa (g) al finalizar el ensayo de cristalización salina.

Morteros	Ciclos	Masa	
		Pérdida/ ganancia (g)	Desviación estándar (S)
Piedra fresca TR ⁺	15	0,00	-
Piedra fresca BC ⁺	15	0,00	-
MN-TR	15	12	7
MN-BC	15	9	3
MN-TR-ADT	15	15	3
MN-BC-ADT	15	12	1
MN-TR-AB	15	12	2
MN-BC-AB	15	16,7	0,2
MA-TR	15	-0,9	0,2
MA-BC	15	-0,8	0,1
MP-TR	15	-0,3	0,1
MP-BC	15	-0,3	0,1

+ Dato tomado de la tesis doctoral “Estudio de la alteración de materiales pétreos en los Monumentos de la ciudad de Valencia. Posibles tratamientos de conservación”. J. L. Roig Salóm.



Figura 11.25. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Bateig Crema al finalizar los ciclos de cristalización de sales (ciclo n° 15). Se observa la presencia de desagregación granular, desmoronamiento, etc.



Figura 11.26. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Tosca de Rocafort al finalizar los ciclos de cristalización salina. Se perciben desagregación granular y desmoronamiento.



Figura 11.27. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Bateig Crema más el aditivo Ácido Bórico al finalizar el ensayo de cristalización salina. Se observa desagregación granular y desmoronamiento, así como eflorescencias salinas en superficie.



Figura 11.28. Probetas de mortero cal-yeso (MN) Bateig Crema más el aditivo Mowilith SDM 5 al finalizar los ciclos de sales. Se observa desagregación granular, descamación y desplazación, así como eflorescencias salinas en superficie.



Figura 11.29. Probetas de morteros elaborados con conglomerante acrílico (MA) sometidas al ensayo de cristalización salina. Las probetas se muestran estables al desgaste, aunque presentan un velo blanquecino formado al precipitar agregados salinos en superficie.

11.1.2.6. Ensayo de envejecimiento acelerado en atmósfera saturada con SO₂ con condensación general de la humedad (Kesternich, DIN 50.018).

Con este ensayo se pretende establecer unas condiciones experimentales de simulación de estrés corrosivo bajo atmósferas urbanas e industriales. Se emplearon tres réplicas de cada mortero compuesto en la simulación del ensayo de envejecimiento acelerado en atmósfera saturada con SO₂.

La metodología experimental seguida en esta experiencia consistió en el secado de las probetas en estufa a 50° C hasta alcanzar masa constante. El ensayo de Kesternich consta de un ciclo de 24 horas dividido en dos partes. La primera comprende la introducción de las piezas en el interior de la cámara de envejecimiento durante 8 horas a una temperatura de 40°C y una humedad relativa del 100%, con una concentración de SO₂ de 0,2-2 l/g. Pasado este tiempo, sigue una segunda etapa de 16 horas en la cual las probetas quedan expuestas al aire a temperatura ambiente. La duración del ensayo se estableció en 7 ciclos (168 h.). Tras el ensayo, las probetas se pesan y se preparan para la observación al microscopio electrónico de barrido.

Resultados y discusión

La Figura 11.30. muestra los valores correspondientes al aumento de masa que han experimentado los morteros compuestos y las probetas de piedra natural tras someterlas al ensayo de atmósfera saturada con SO₂. Todas las muestras exhiben una ganancia de masa debido a la cristalización de sales en la superficie de la probeta. Si se comparan los valores de las probetas de piedra natural con sus respectivos morteros compuestos se observa que, los morteros elaborados con Tosca de Rocafort responden, en general, mejor que la propia piedra natural (0,84%) con la excepción del mortero MN-TR-AB que exhibe un valor de incremento de masa de 1,64%. En cambio, al comparar los morteros elaborados con Bateig Crema con la piedra natural BC se observa que, los morteros MA y MP exhiben valores más bajos que la piedra natural (0,12% y 0,48%) mientras que los morteros de cal-yeso (MN) exhiben valores muy superiores al de la piedra natural (0,86%), especialmente los morteros MN-BC-AB y MN-BC con valores de 1,74% y 1,41% respectivamente.

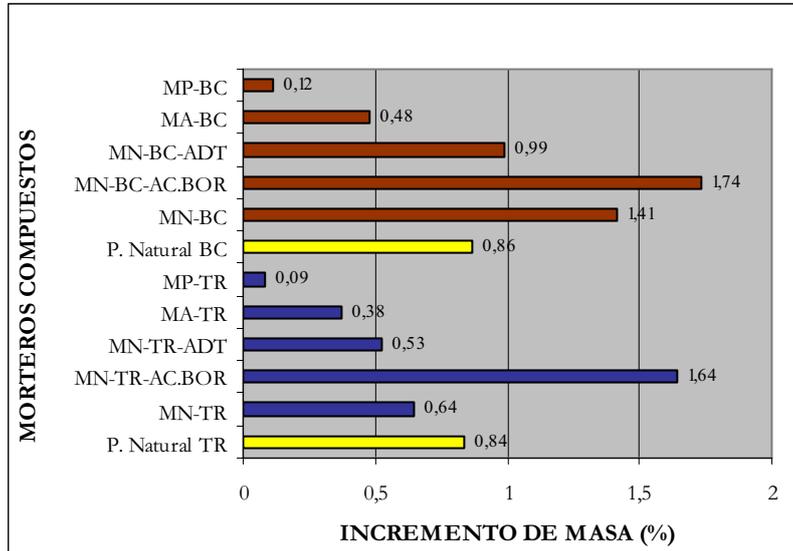


Figura 11.30. Valores de incremento de masa de los morteros compuestos sometidos a ensayo de envejecimiento acelerado en atmósfera saturada con SO_2 .

Las Figuras 11.31. y 11.32. muestran el aspecto que exhibe la superficie de dos de los morteros estudiados después del envejecimiento acelerado. En ambos se observan la formación de microcristales de yeso.

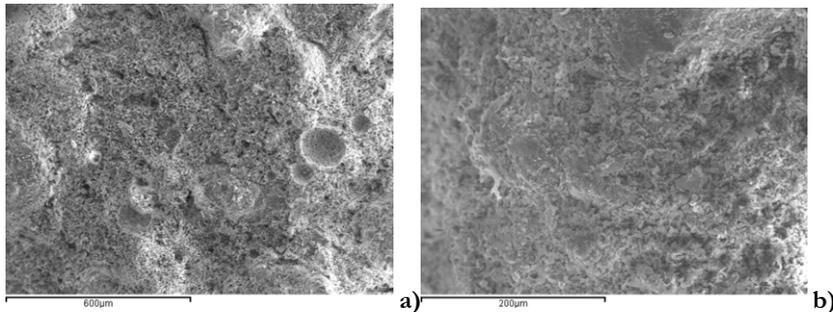


Figura 11.31. Microfotografía obtenida mediante SEM con electrones retrodispersados en las probetas de mortero pétreo compuesto tras el ensayo de envejecimiento en atmósfera saturada con SO_2 . Morteros: a) mortero MN-BC, b) mortero MN-TR-AB.

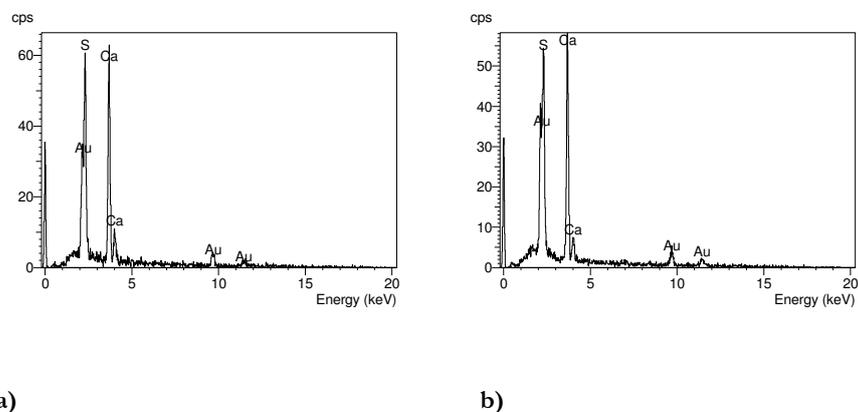


Figura 11.32. Espectro de energías de Rayos X correspondientes a los morteros pétreos compuestos tras el ensayo de envejecimiento en atmósfera saturada con SO_2 : a) mortero MN-BC, b) mortero MN-TR-AB.

Resumiendo, la mayor o menor deposición de yeso en las probetas depende del tipo de conglomerante y del tamaño de micronizado del árido. Los morteros elaborados a partir de una matriz sintética y con árido de menor tamaño de partícula serán los menos propensos a degradarse por la acción del SO_2 .

11.1.2.7. Resistencia a la degradación natural.

El ensayo consistió en exponer los diez tipos de morteros experimentados más los dos patrones pétreos Tosca de Rocafort y Bateig Crema, al desgaste natural. Se emplearon tres réplicas de cada mortero compuesto. Las probetas se colocaron en un bastidor metálico con una inclinación de 45° y con orientación norte. El conjunto de probetas se ubicó en la zona 5, parte superior del edificio 50, de la Universidad Politécnica de Valencia, a escasos kilómetros del mar (Figura 11.34.).

Los datos indicados en el presente proyecto de Tesis Doctoral corresponden a un período de seis meses comprendido entre Julio 2005 y Enero 2006, aunque se prevé completar un ciclo de 3 años.

Las condiciones ambientales (temperaturas medias, velocidad del viento, humedad relativa y precipitaciones), a las que las probetas de

morteros han estado expuestas al exterior, se reproducen en el siguiente gráfico (Datos registrados por el Centro de Meteorológico Territorial de Valencia) (Figura 11.33).

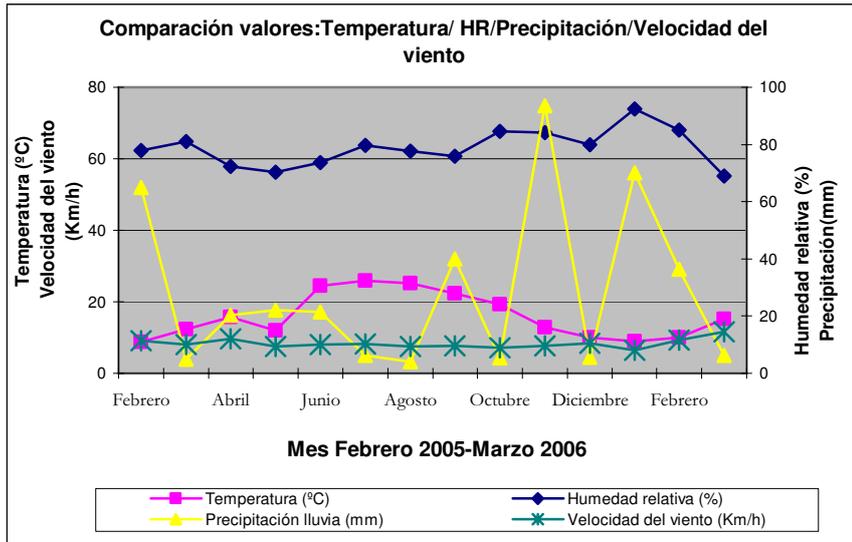


Figura 11.33. Valores de Temperatura, Humedad Relativa, Precipitaciones y velocidad del viento durante el período en que transcurrió el ensayo de degradación natural.

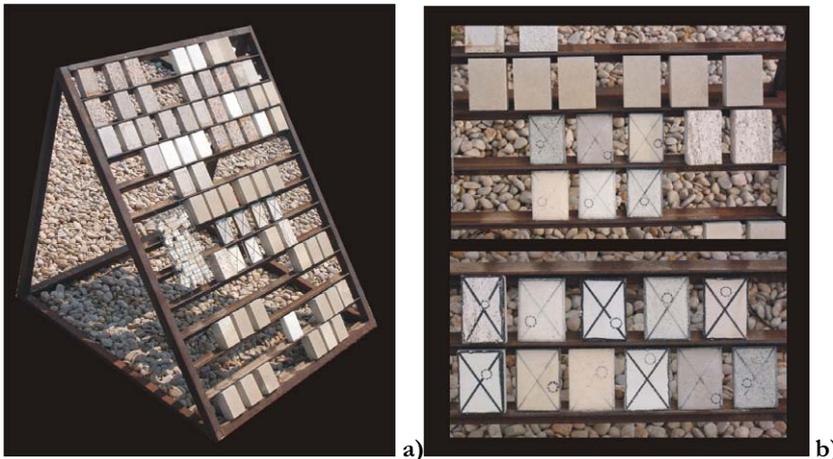


Figura 11.34. Bastidor para exposición al ambiente natural exterior de las probetas de morteros compuestos.

Resultados y discusión

En la Tabla 11.19 se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo de resistencia a la degradación natural en el primer período de exposición comprendido entre Julio-Septiembre de 2005 y, transcurridas 2200 h. Las probetas fueron objeto de medida de las coordenadas cromáticas antes y después de ser sometida a ensayo, eligiendo como condiciones operativas el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de color 6500° K) y el observador estándar 10°.

Los resultados ponen de manifiesto que, tanto las piedras naturales como los morteros compuestos sometidos a estudio, presentan variaciones en su cromatismo en este primer estadio de envejecimiento natural.

Los morteros compuestos de cal-yeso (MN) que incorporan Mowilith SDM 5 (ADT) y ácido bórico (AB) elaborados a partir de piedra Bateig muestran, desde el punto de vista de la luminosidad, un aspecto ligeramente más oscuro. Sin embargo, los valores de luminosidad en los morteros compuestos de cal-yeso (sin aditivos), en los acrílicos (MA) y en los de poliéster (MP) elaborados con dicha roca, proporcionan a la superficie del mortero un aspecto más claro tras las 2200 horas de ensayo.

Los morteros compuestos de cal-yeso (MN) y sus variantes (con Mowilith SDM 5 y ácido bórico) elaborados a partir de piedra Tosca de Rocafort muestran, desde el punto de vista de la luminosidad, un aspecto ligeramente más oscuro, si bien esta disminución de luminosidad es sensiblemente baja. Sin embargo, los valores de luminosidad en los morteros compuestos acrílicos (MA) y de poliéster (MP) elaborados con dicha roca, proporcionan a la superficie del mortero un aspecto levemente más claro tras las 2200 horas de ensayo.

En general, desde el punto de vista cromático, los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y piedra Bateig exhiben un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo, con la excepción de los morteros de poliéster elaborados con piedra Tosca que exhiben una derivación hacia el color verde y hacia el azul tras 2200 horas de ensayo de envejecimiento natural.

Tabla 11.19. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, desviación estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados sometidos a ensayo de resistencia a la degradación natural tras 2200 h.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
PATRÓN BC	83,16	0,03	78,05	0,01	-5,11	-0,08	0,01	0,35	0,03	0,43	6,36	0,03	9,13	0,02	2,77	5,83	-4,70
MN-BC	84,28	0,02	86,49	0,02	2,20	0,47	0,01	0,97	0,02	0,50	7,95	0,01	8,35	0,01	0,40	2,29	-3,23
MN-BC-ADT	85,62	0,03	78,96	0,01	-6,66	0,23	0,01	0,99	0,03	0,76	5,92	0,01	9,41	0,01	3,50	7,56	-2,80
MN-BC-AB	82,88	0,03	79,48	0,01	-3,40	0,50	0,01	1,01	0,03	0,50	7,76	0,03	9,21	0,01	1,45	3,73	-0,30
MA-BC	76,83	0,02	78,79	0,01	1,96	0,60	0,01	0,49	0,03	-0,11	7,92	0,01	9,66	0,01	1,74	2,62	1,44
MP-BC	67,24	0,06	67,35	0,02	0,10	0,52	0,01	2,95	0,01	2,43	6,02	0,01	8,64	0,02	2,62	3,58	-13,90
PATRÓN TR	83,14	0,02	81,42	0,02	-1,72	1,45	0,01	1,97	0,01	0,51	6,13	0,02	6,77	0,01	0,65	1,91	-3,65
MN-TR	85,09	0,02	82,16	0,02	-2,92	2,65	0,02	3,72	0,02	1,07	10,87	0,02	14,52	0,01	3,65	4,80	-0,67
MN-TR-ADT	80,88	0,01	73,84	0,04	-7,04	2,87	0,02	3,98	0,01	1,11	10,28	0,02	14,75	0,01	4,47	8,42	-1,43
MN-TR-AB	83,24	0,01	82,11	0,04	-1,13	2,61	0,02	3,12	0,02	0,51	9,47	0,02	12,87	0,01	3,40	3,62	-1,10
MA-TR	74,99	0,02	77,41	0,02	2,42	3,14	0,01	2,82	0,02	-0,32	14,24	0,03	14,69	0,02	0,46	2,48	1,59
MP-TR	66,35	0,02	68,20	0,03	1,85	3,29	0,02	0,36	0,02	-2,93	8,70	0,02	5,35	0,01	-3,35	4,82	16,86

Los resultados obtenidos durante el siguiente período de exposición a la degradación natural de 2200 horas comprendido entre Octubre 2005 y Enero 2006, se muestran en la Tabla 11.20.

El ensayo de envejecimiento natural, desde el punto de vista de la luminosidad, confiere a los morteros compuestos cal-yeso con incorporación del Mowilith SDM 5, un aspecto mucho más oscuro, respecto al resto de morteros (MN-BC-ADT $\Delta L = -6,66$ y MN-TR-ADT ($\Delta L = -7,04$)).

Las probetas de piedra natural Bateig Crema y Tosca de Rocafort con valores de variación de color total de 5,83 y 1,91 se han mantenido constantes después de las 4400 horas de ensayo. Asimismo, los valores obtenidos en los morteros de cal-yeso con el aditivo Mowilith SDM 5 y elaborados a partir de piedra Tosca y/o Bateig (MN-BC-ADT y MN-TR-ADT) se han mantenido prácticamente invariables. Los morteros acrílicos (MA) y poliéster (MP) elaborados con ambos tipos de roca exhiben valores mínimos de desviación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*.

Los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y piedra Bateig continúan exhibiendo, desde el punto de vista cromático, un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo, a excepción de los morteros de poliéster que derivan hacia el verde y hacia el azul.

Al comparar los resultados obtenidos en las Tablas 11.19 y 11.20, se observa que, los morteros compuestos de poliéster exhiben unas variaciones de color total significativas durante los tres primeros meses de exposición (ΔE : 3,58 y ΔE : 4,82 respectivamente) pero que, durante el segundo período de exposición, comprendido entre las 2200 y las 4400 horas de ensayo, apenas sufren variación significativa (ΔE : 0,51 y ΔE : 0,45). En cambio, los morteros de cal-yeso y, con la incorporación de ácido bórico (MN-BC, MN-BC-AB, MN-TR y MN-TR-AB), muestran una ligera variación de color total durante el segundo período comprendido entre las 2200 y las 4400 horas de ensayo.

Tabla 11.20. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, desviación estándar, variación de color total (ΔE) y la variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados sometidos a ensayo de resistencia a la degradación natural tras un segundo período de exposición de 2200 horas.

Nombre	L*					a*					b*					ΔE	Δh
	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*		
PATRÓN BC	83,16	0,01	78,05	0,02	-5,11	-0,08	0,01	0,35	0,01	0,43	6,36	0,02	9,13	0,01	2,77	5,83	-2,91
MN-BC	84,28	0,02	86,49	0,02	2,21	0,47	0,03	0,97	0,01	0,50	7,95	0,01	8,35	0,01	0,40	2,60	0,38
MN-BC-ADT	85,62	0,02	78,96	0,02	-6,66	0,23	0,03	0,99	0,01	0,76	5,92	0,02	9,42	0,01	3,50	7,56	-3,80
MN-BC-AB	82,88	0,01	84,04	0,01	1,16	0,50	0,01	1,60	0,02	1,09	7,76	0,02	10,14	0,01	2,38	2,87	-5,25
MA-BC	76,83	0,02	76,68	0,02	-0,15	0,60	0,02	0,96	0,01	0,36	7,92	0,01	11,42	0,01	3,50	3,52	-0,47
MP-BC	67,24	0,02	67,73	0,01	0,49	0,52	0,02	0,37	0,01	-0,14	6,02	0,01	5,98	0,03	-0,04	0,51	1,38
PATRÓN TR	83,14	0,01	81,42	0,01	-1,72	1,45	0,01	1,97	0,02	0,51	6,13	0,02	6,77	0,01	0,65	1,91	-2,84
MN-TR	85,09	0,01	82,16	0,04	-2,93	2,65	0,02	3,72	0,02	1,07	10,87	0,02	14,52	0,01	3,65	4,90	0,71
MN-TR-ADT	80,88	0,02	73,84	0,02	-7,04	2,87	0,01	3,98	0,01	1,11	10,28	0,02	14,75	0,01	4,47	8,42	0,48
MN-TR-AB	84,61	0,01	86,99	0,04	2,38	2,98	0,02	3,01	0,01	0,03	14,86	0,02	15,92	0,01	1,06	2,61	-2,85
MA-TR	74,99	0,02	76,22	0,01	1,23	3,14	0,01	3,16	0,02	0,02	14,24	0,02	15,03	0,01	0,79	1,46	0,56
MP-TR	66,35	0,01	66,02	0,01	-0,33	3,29	0,01	3,12	0,02	-0,17	8,70	0,02	8,45	0,02	-0,26	0,45	0,44

11.2. PROPIEDADES DE INTERÉS EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN.

11.2.1. Introducción.

Después de haber considerado las propiedades físico-mecánicas y de resistencia a los agentes físico-químicos de los morteros compuestos, es importante abordar el estudio de una serie de otras propiedades de interés para el establecimiento de la bondad de los morteros compuestos como materiales para la realización de sellados, reposiciones y réplicas de elementos escultórico-ornamentales. En este apartado se han descrito las propiedades más significativas que todo mortero de reparación debe poseer en el momento de su puesta en obra.

11.2.2. Adaptabilidad.

El término adaptabilidad estaría referido a la manera en que el mortero toma contacto con el material original en el instante de su aplicación. Para evaluar esta propiedad, se ha estudiado la variación experimentada por la viscosidad del mortero durante su preparación.

El ensayo ha consistido en la medición de la viscosidad de los diferentes conglomerantes usados en la elaboración de los morteros compuestos reseñados en la Tabla 10.22.

Resultados y discusión.

Los valores de viscosidad exhibidos durante el fraguado por el conglomerante cal-yeso (escayola Álamo 70) y aditivos (ácido bórico y Mowilith SDM5) superan a los obtenidos por los conglomerantes acrílico y poliéster. De los tres tipos de conglomerantes de cal y yeso, el realizado sin aditivos es el que experimenta un fraguado más rápido (Figura 11.35.a), mientras que el aditivo ácido bórico retarda el fraguado de manera significativa (Figura 11.35.b). El conglomerante cal y yeso con aditivo Mowilith SDM5, por otra parte, consigue rebajar notablemente el valor de la viscosidad del conglomerante durante una buena parte del período de fraguado (Figura 11.35.c).

El conglomerante acrílico se caracteriza por un aumento rápido de la viscosidad con el tiempo (Figura 11.35.d), mientras que el

conglomerante de poliéster mantiene un valor de viscosidad por debajo de 450 cSt durante los primeros 30 minutos iniciando a partir de este momento un rápido aumento de la misma (Figura 11.35.e).

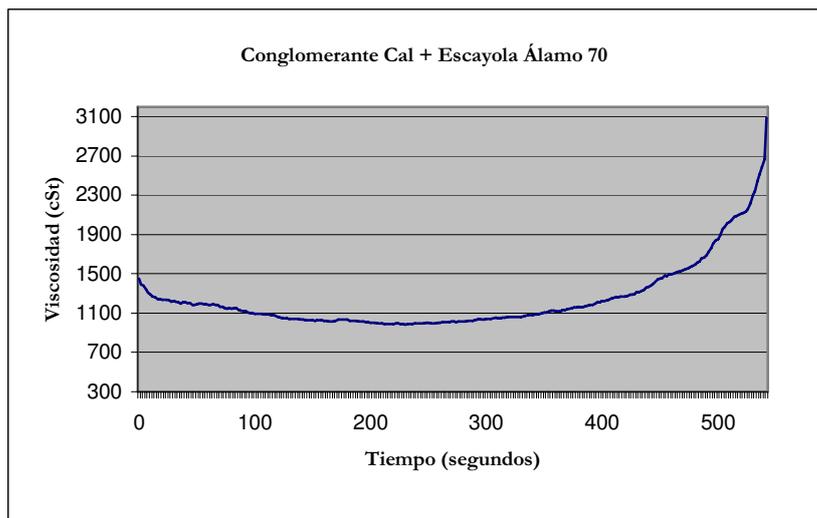


Figura 11.35.a Variación de la viscosidad obtenida con el conglomerante cal más escayola Álamó 70 en función del tiempo de fraguado.

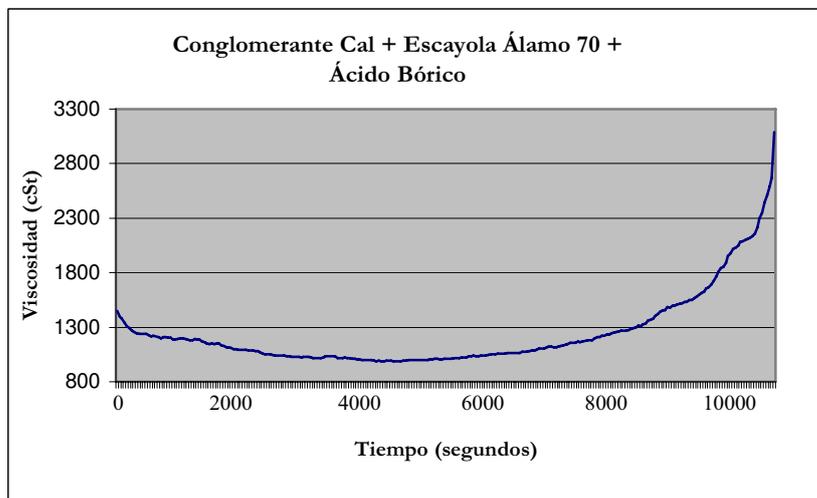


Figura 11.35.b Variación de la viscosidad obtenida con el conglomerante cal más escayola Álamó 70 más el aditivo Ácido Bórico en función del tiempo de fraguado.

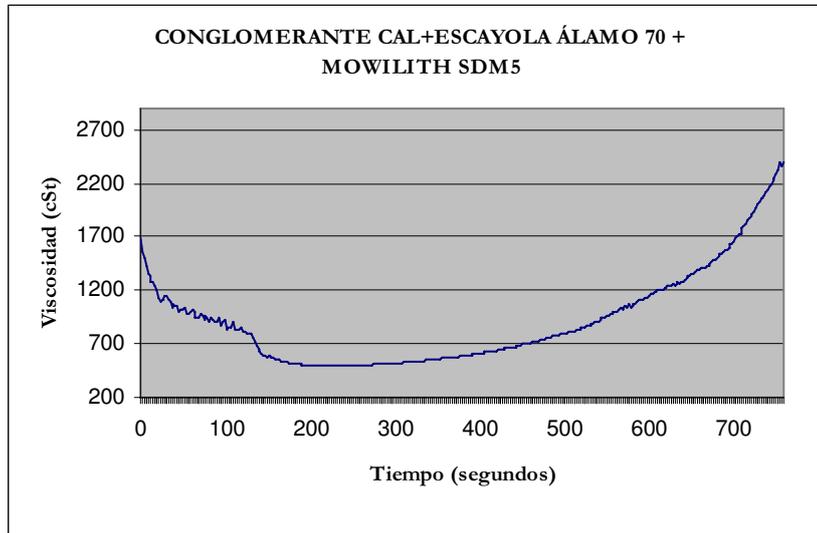


Figura 11.35.c Variación de la viscosidad obtenida con el conglomerante cal más escayola ÁLAMO 70 más el aditivo Mowilith SDM 5 en función del tiempo de fraguado.

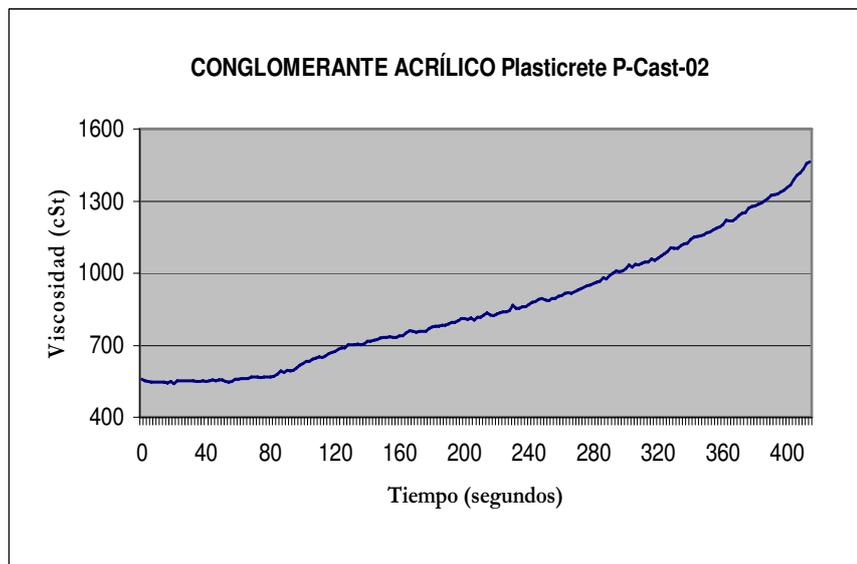


Figura 11.35.d Variación de la viscosidad obtenida con el conglomerante acrílico Plasticrete P-Cast A02 en función del tiempo de curado.

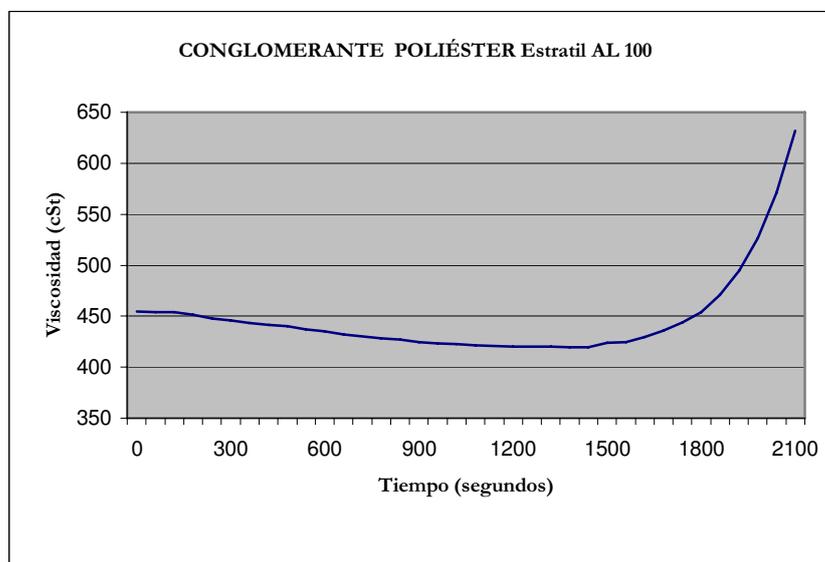


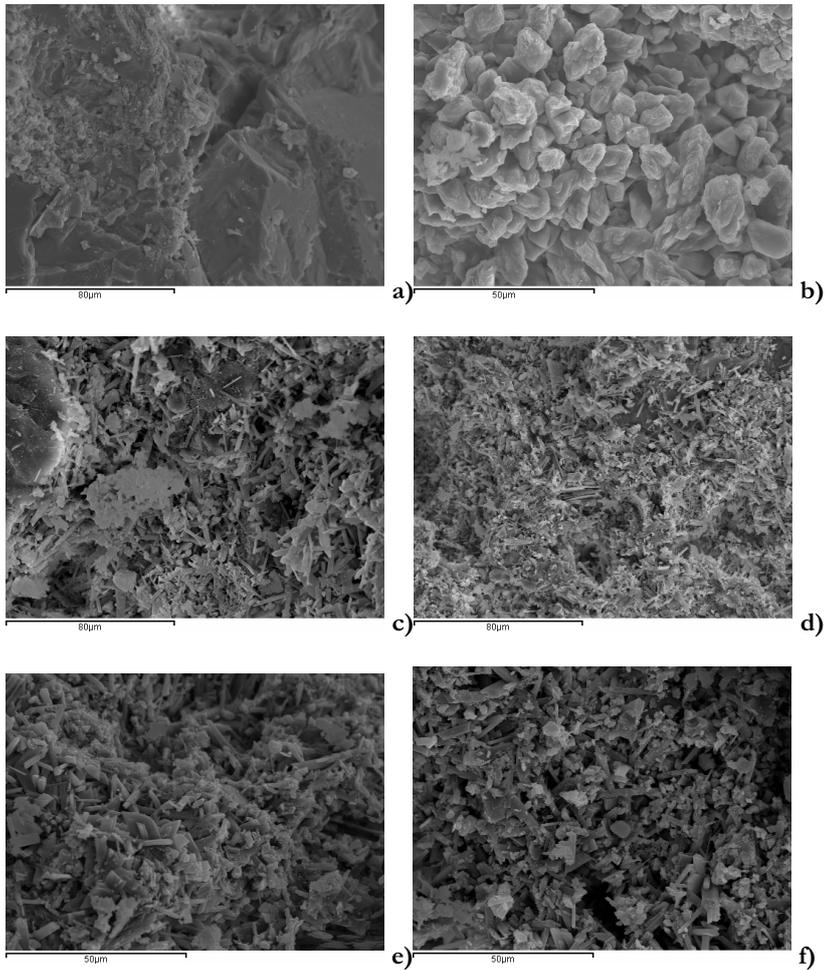
Figura 11.35.e Variación de la viscosidad obtenida con el conglomerante poliéster Estratil AL-100 en función del tiempo de gel.

11.2.3. Morfología superficial del mortero.

La Figura 11.36.(a-l) muestra la estructura interna de cada uno de los morteros estudiados en comparación con las piedras naturales patrón Tosca de Rocafort y Bateig Crema. Las Figuras 11.36.(a, b) muestra la estructura porosa de las piedras naturales Tosca de Rocafort y Bateig Crema. Puede observarse que la piedra Bateig presenta una estructura bastante más cementada y cohesionada que la Tosca de Rocafort. Las Figuras 11.36.(c, d) muestra el mortero de cal y yeso Bateig Crema y, mortero de cal y yeso Tosca de Rocafort. Se distingue la matriz de cal y yeso integrada por cristales aciculares de yeso y microcristales de calcita con abundante porosidad de pequeño tamaño que envuelve las partículas de árido. La Figura 11.36.(e,f) muestra los morteros de cal y yeso Bateig Crema y Tosca de Rocafort aditivados con Mowilith SDM5. En ambos casos se observa como, de modo similar a los morteros sin aditivar, la matriz de conglomerante envuelve las partículas de árido. En los morteros de cal y yeso aditivados con ácido bórico (Figura 11.36.g, h) se aprecia una menor porosidad que en los casos anteriores. La Figura 11.36.(i, l) muestra la estructura interna de los morteros elaborados con

conglomerante sintético. Se aprecia el poder ligante de este tipo de resinas que se traduce en una escasez de porosidad. El árido queda fuertemente unido a la matriz del mortero constituida por el polímero.

En general, los morteros de matriz sintética fuertemente compactos, homogéneos y escasamente porosos contrastan con los morteros inorgánicos que presentan heterogeneidad y estructura porosa.



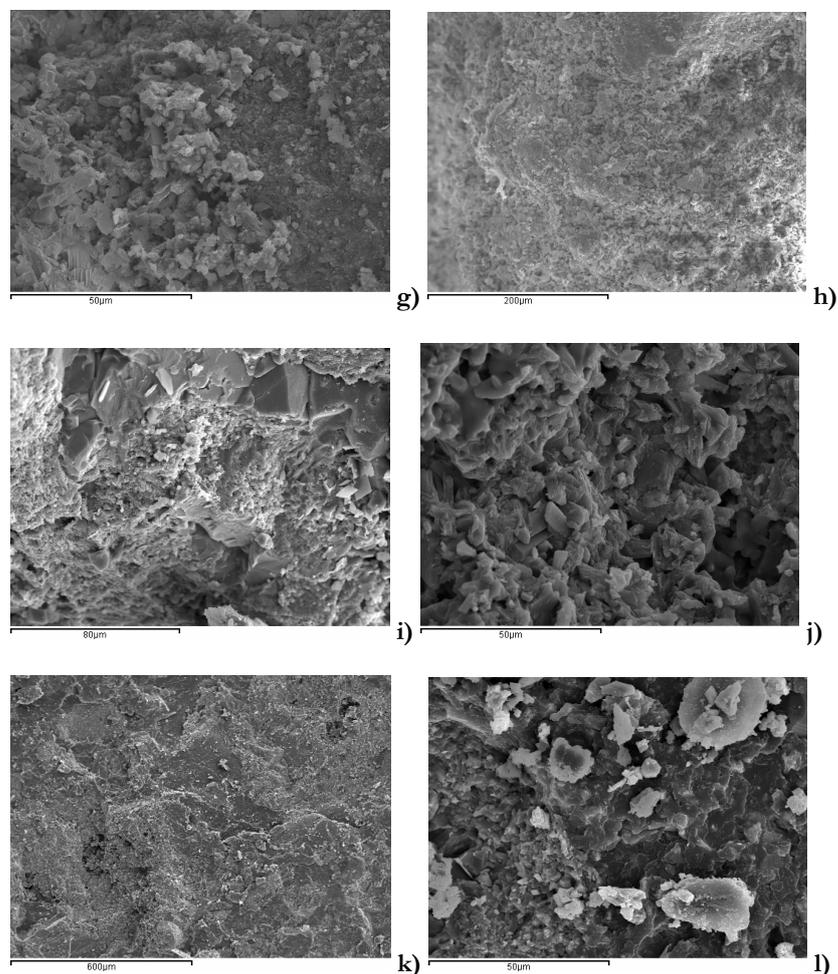


Figura 11.36. Imágenes obtenidas mediante SEM con electrones secundarios mostrando la microestructura de las diferentes piedras y morteros compuestos estudiados: a) Piedra natural Bateig Crema. b) Piedra natural Tosca de Rocafort. c) Mortero cal y yeso Bateig Crema. d) Mortero cal y yeso Tosca Rocafort. e) Mortero cal y yeso Bateig Crema Mowilith SDM5 f) Mortero cal y yeso Tosca de Rocafort Mowilith SDM5. g) Mortero cal y yeso Bateig Crema ácido bórico. h) Mortero cal y yeso Tosca de Rocafort ácido bórico. i) Mortero acrílico Bateig Crema. j) Mortero acrílico Tosca de Rocafort. k) Mortero de poliéster Bateig Crema. l) Mortero de poliéster Tosca de Rocafort.

11.2.4. Tránsito de vapor de agua.

El experimento consistió en la observación de la pérdida de masa que, por evaporación del agua y disolventes, sufren los morteros durante su proceso de endurecimiento. La metodología seguida en el ensayo consistió en mantener las probetas a temperatura constante de 21,5°C y una humedad relativa de 74%, hasta lograr un valor de masa constante. Transcurridos dieciséis días, se pesó cada una de ellas comparando la pérdida de masa.

Resultados y discusión.

La Tabla 11.21. resume los valores de pérdida de masa que han experimentado las tres probetas de cada uno de los diferentes morteros a lo largo del ensayo de tránsito de vapor de agua. Se observa una clara diferencia entre los morteros hídricos de cal y yeso y, los morteros elaborados con conglomerante sintético. Así, los morteros de cal y yeso exhiben valores bastante semejantes y notablemente superiores a los morteros elaborados con conglomerante sintético, para ambos materiales pétreos. Ello se debe a que la matriz polimérica formada tras el curado del mortero reduce la porosidad significativamente por lo que la absorción de vapor de agua es muy baja.

La Figura 11.37. representa las curvas correspondientes a la pérdida de masa de cada uno de los morteros en función del tiempo. En los morteros de cal y yeso se evidencia una disminución bastante significativa de la masa, que se produce durante los primeros ocho días, transcurridos los cuales dicho valor se estabiliza. En los morteros acrílicos se muestra una disminución menor de la masa pero uniforme, la cual se prolonga hasta el final del ensayo. Finalmente, el mortero de poliéster mantiene prácticamente inalterable su masa.

Tabla 11.21. Valores de pérdida de masa de los morteros compuestos en el ensayo de tránsito de vapor de agua.

Morteros	Pérdida de masa (g)	Desviación estándar (S)
MN-TR	-37	2
MN-BC	-36	1
MN-TR-ADT	-33	3
MN-BC-ADT	-34	2
MN-TR-AB	-38	1
MN-BC-AB	-39	3
MA-TR	-10,1	0,9
MA-BC	-11	1
MP-TR	-0,14	0,07
MP-BC	-0,13	0,03

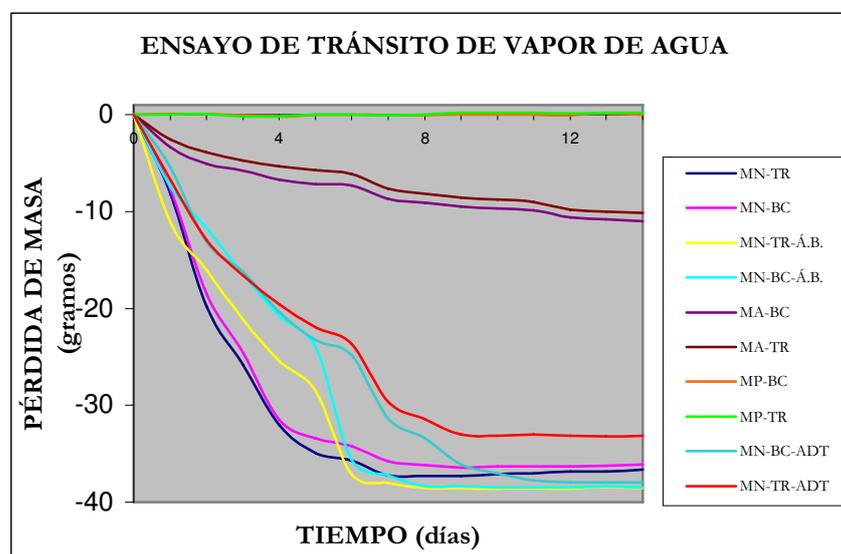


Figura 11.37. Curvas de pérdida de masa (g) de los morteros compuestos obtenidas a temperatura constante de 21°C.

11.2.5. Aspecto visual psicofísico. Aspecto táctil.

Con el propósito de valorar el grado de discernibilidad de los morteros compuestos respecto al material pétreo original se ha diseñado el presente ensayo de percepción en el que se pretende evaluar la capacidad de reconocimiento y diferenciación de los morteros compuestos respecto de los materiales pétreos originales por parte del espectador. Cabe señalar que la discernibilidad es una propiedad necesaria en muchos procesos de restauración en los que se hace necesaria una intervención de sellados, reposiciones de faltantes y réplicas.

Para este ensayo, se han preparado dos paneles, incluyendo 16 probetas de 8x8x3 cm de morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y 12 probetas de 8x5x3 cm de morteros compuestos elaborados con piedra Bateig Crema. Las mencionadas probetas se prepararon en series con diferentes tratamientos de textura superficial y/o acabado: pasada de bujarda, gradina, cincel y papel abrasivo corindón (Figura 11.38. a-b). La distribución de las probetas en ambos paneles queda resumida en las Tablas 11.22. y 11.23.

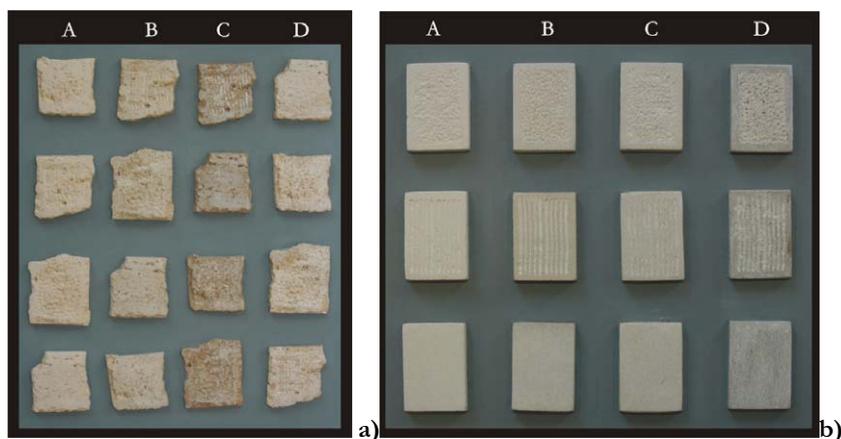


Figura 11.38. Paneles de pruebas de percepción. Probetas de piedra natural y morteros compuestos: (a) Tosca de Rocafort, (b) Bateig Crema.

Tabla 11.22. Distribución de probetas en el panel Tosca de Rocafort.

TOSCA DE ROCAFORT				
FILA	A	B	C	D
COLUMNA (herramienta)	MORTERO CAL + YESO	MORTERO ACRÍLICO	MORTERO POLIÉSTER	PIEDRA NATURAL
GRADINA				
PAPEL ABRASIVO				
CINCEL				
BUJARDA				

Tabla 11.23. Distribución de probetas en el panel Bateig Crema.

BATEIG CREMA				
FILA	A	B	C	D
COLUMNA (herramienta)	MORTERO CAL + YESO	PIEDRA NATURAL	MORTERO ACRÍLICO	MORTERO POLIÉSTER
BUJARDA				
GRADINA				
PAPEL ABRASIVO				

La prueba de percepción se realizó en las siguientes condiciones de observación: (Figura 11.39):

-Los dos paneles de probetas fueron dispuestos a metro y medio del suelo.

-El espectador efectuó observaciones a tres distancias diferentes comenzando por una posición más alejada (3 m.), para seguidamente efectuar una segunda observación a 1,5 m. y, en tercer lugar, observar las probetas a 0,5 m. Finalmente, efectuó una prueba de contacto táctil.

-En cada punto de observación el espectador varió su posición entre 0°, 20°, 45° y 60°.

-La sala estaba iluminada con luz natural.

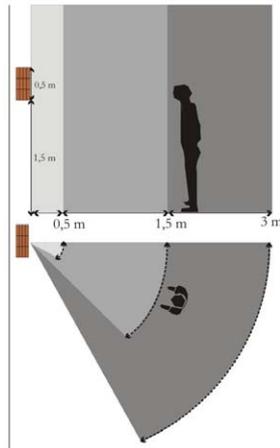


Figura 11.39. Condiciones de observación.

Para facilitar el procesado de los resultados de la prueba se elaboró un cuestionario que reproducía la disposición de las probetas en los paneles y, en el que el espectador señalaba la posición en la que, a su juicio, estaba situada la piedra natural (Figura 11.40).

La encuesta se realizó a 45 personas divididas en tres grupos:

-Alumnos de 3º, 4º y 5º curso de la Licenciatura de Bellas Artes que cursaban la asignatura de Restauración de Escultura (25).

-Profesionales de la restauración de distintas especialidades (15).

-Escultores vinculados a los materiales pétreos (5).

ENCUESTAS OBSERVACIÓN VISUAL Y TÁCTIL

Apartado de **CÓDIGO**: marcar en la columna **a**: 0 si es PROFESOR de la materia C-R.
1 si es ALUMNO de la materia C-R.
2 si es ESCULTOR de material pétreo.

RESPUESTAS:

***E: NO SABE**

TOSCA DE ROCAFORT

Observación visual

A 3 metros de distancia:

1. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
2. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
3. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
4. Marcar cual es la de mortero de poliéster

A 1,5 metros de distancia:

5. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
6. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
7. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
8. Marcar cual es la de mortero de poliéster

A 0,5 metros de distancia:

9. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
10. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
11. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
12. Marcar cual es la de mortero de poliéster

Observación táctil

13. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
14. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
15. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
16. Marcar cual es la de mortero de poliéster

BATEIG CREMA

Observación visual

A 3 metros de distancia:

17. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
18. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
19. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
20. Marcar cual es la de mortero de poliéster

A 1,5 metros de distancia:

21. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
22. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
23. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
24. Marcar cual es la de mortero de poliéster

A 0,5 metros de distancia:

25. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
26. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
27. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
27. Marcar cual es la de mortero de poliéster

Observación táctil

29. ¿Cuál de las cuatro columnas es la piedra natural?
30. De las tres columnas restantes, ¿cuál es la de mortero cal-yeso?
31. De las dos columnas restantes, ¿cuál es la de mortero acrílico?
32. Marcar cual es la de mortero de poliéster

Figura 11.40. Cuestionario utilizado para el procesado de los resultados de la encuesta. (Instituto de Ciencias de la Educación).

Resultados y discusión.

Cabe señalar, en primer lugar, que la identificación de las probetas de piedra natural entre el conjunto de probetas de morteros compuestos, ha supuesto para el espectador una tarea difícil y, en ciertos casos, las respuestas han sido aleatorias.

Analizando los resultados de los tres grupos encuestados a tres metros de distancia (Figura 11.41.a-c), se observa que:

-El grupo de escultores identifica correctamente en la columna D (40%) las probetas de piedra natural, sin embargo, un 20% las confunde con las de poliéster y un 40% no las distingue.

-Entre los profesionales se confunde los morteros de cal-yeso (columna A, 34%) y poliéster (columna C, 33%) con la piedra natural y tan sólo el 13% identifica correctamente la piedra natural y, un 20% no sabe (E).

-El 48% de los alumnos confunde el mortero de poliéster con la piedra natural, mientras que el 20% reconoce correctamente la piedra natural.

Aunque la distancia y el tamaño de las probetas suponen un problema añadido en la correcta percepción visual, aquello que mayor confusión entraña es el tratamiento superficial de las probetas. Téngase en cuenta que la textura superficial oculta cualquier anomalía que pudiera derivarse de una alteración de color, de porosidad, etc.

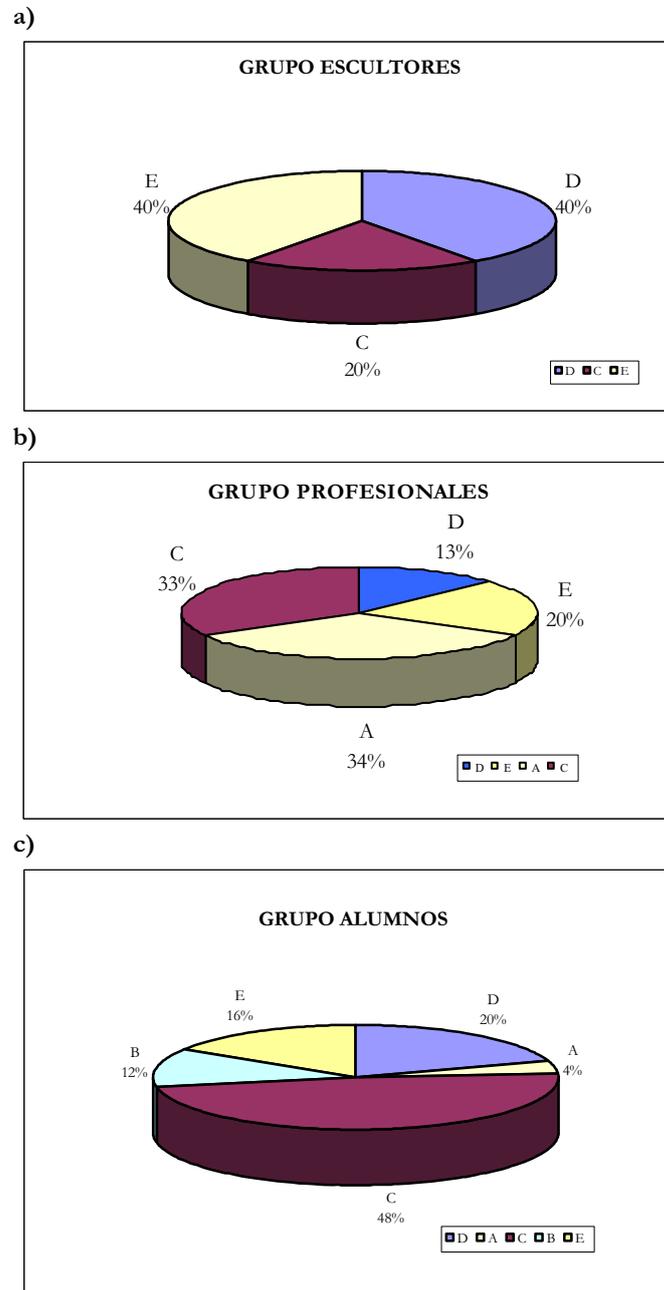


Figura 11.41.
Identificación de la piedra Tosca de Rocafort a 3 m. de distancia:
a) profesores,
b) profesionales
c) alumnos.

Analizando los resultados de los tres grupos encuestados a metro y medio de distancia (Figura 11.42.a-c), se observa que:

-El 60% de los escultores continúan identificando correctamente la piedra natural, mientras que un 40% las confunde con el mortero de cal y yeso.

-En el grupo de profesionales sólo un 12% de los encuestados identifica correctamente la piedra natural y el resto confunde ésta con el mortero de cal-yeso (57%) y poliéster (20%).

-Finalmente, el 32% de los alumnos elige el mortero acrílico mientras que el 24% identifica correctamente la piedra natural.

De estos resultados se desprende que, aunque la distancia es cada vez menor, aún existe cierta dificultad en el reconocimiento de la roca natural, haciéndose más evidente en el grupo de profesores y alumnos dado su menor entrenamiento visual con materiales pétreos.

a)



b)



c)

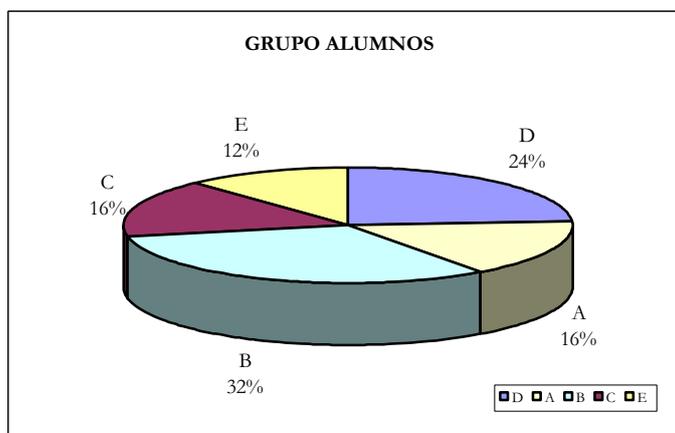


Figura 11.42. Identificación de la piedra Tosca de Rocafort a 1,5 m. de distancia: a) profesores, b) profesionales, c) alumnos.

Los resultados de los tres grupos encuestados a medio metro de distancia (Figura 11.43.a-c), pueden resumirse del siguiente modo:

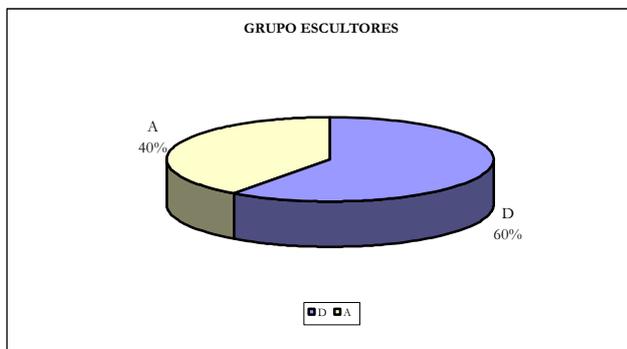
-Un 60% de los escultores identifica correctamente la piedra natural, mientras que el 40% restante confunde ésta con el mortero de cal-yeso.

-El 67% de los profesionales identifica correctamente el material pétreo mientras que identifican incorrectamente los morteros acrílicos, poliéster y de cal-yeso el 13, 13 y 7%, respectivamente.

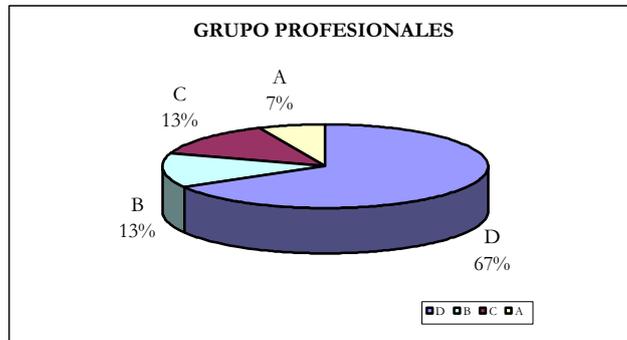
-Finalmente, el grupo de alumnos confunde el mortero acrílico en un 48% y sólo un 28% reconoce correctamente la piedra natural Tosca de Rocafort.

Se observa en general, que, mientras el grupo de escultores se limita sólo a dos columnas (A y D) en la identificación de las probetas, el resto de colectivos incluye las demás columnas (B, C y E), en mayor o menor porcentaje. Así pues, estos resultados parecen sugerir que se mantiene cierta confusión.

a)



b)



c)

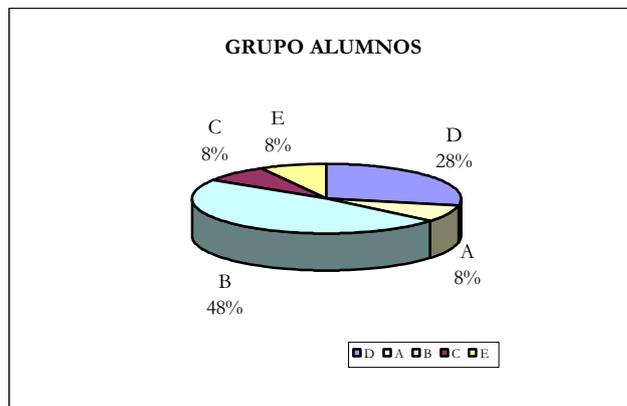


Figura 11.43. Identificación de la piedra Tosca de Rocafort a 0,5 m. de distancia: a) profesores, b) profesionales, c) alumnos.

Los resultados de los tres grupos encuestados correspondiente a la observación táctil (Figura 11.44.a-c), se resumen del siguiente modo:

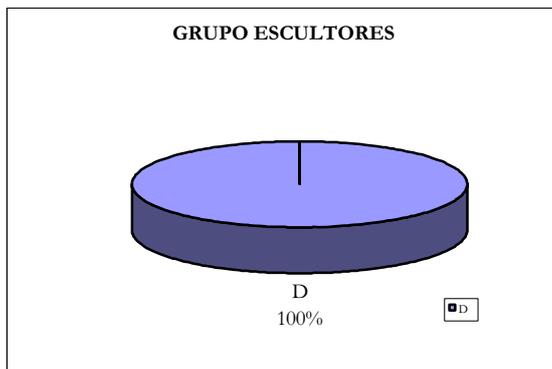
-El colectivo de escultores no tienen dificultad en identificar la piedra natural frente a los morteros gracias a la diferente conductividad térmica que posee respecto a estos últimos.

-Un 33% de los profesionales continúan sin identificar correctamente la piedra natural.

-Un 44% de los estudiantes identifica incorrectamente la piedra natural mientras que el 4% no contesta.

Puede concluirse que, a medida que el observador se aproxima, el reconocimiento de la roca natural mejora, alcanzándose las mayores cotas de acuerdo en el ensayo de reconocimiento táctil. Otro hecho claramente evidenciado en este ensayo es la mayor capacidad de discriminación demostrada por el grupo de escultores debida a su mejor conocimiento del material pétreo. Finalmente, señalaremos como hecho interesante en este estudio el mayor grado de indiscernibilidad del mortero de poliéster a una distancia mayor (>3 m.), mientras que el mortero de cal-yeso parece exhibir un mayor grado de indiscernibilidad cuando se observa a distancias próximas (<3 m.) en observadores con mayor experiencia y, el mortero acrílico, sin embargo, resulta indiscernible para observadores con poca experiencia en el ámbito del tratamiento de materiales pétreos.

a)



b)



c)

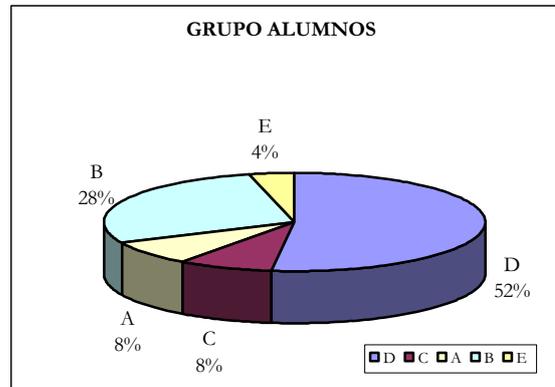


Figura 11.44.
Identificación de la piedra Tosca de Rocafort, observación táctil:
a) profesores,
b) profesionales,
c) alumnos.

Los resultados obtenidos a partir de los tres grupos encuestados a tres metros de distancia (Figura 11.45.a-c) muestran que:

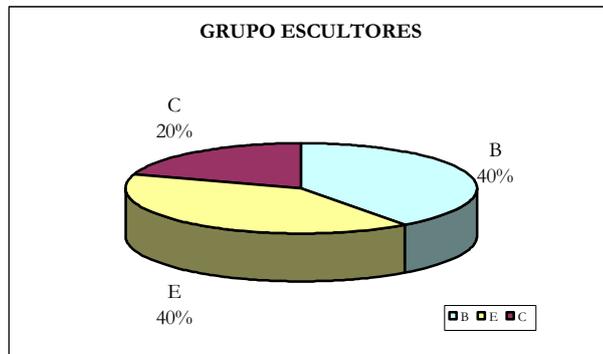
-El 40% del colectivo de escultores reconoce correctamente la piedra Bateig mientras que otro 40% no es capaz de identificarla.

-El 46% de los profesionales no son capaces de efectuar la identificación, el 30% identifica erróneamente el mortero de cal y yeso y, tan sólo un 20% identifica correctamente el material pétreo.

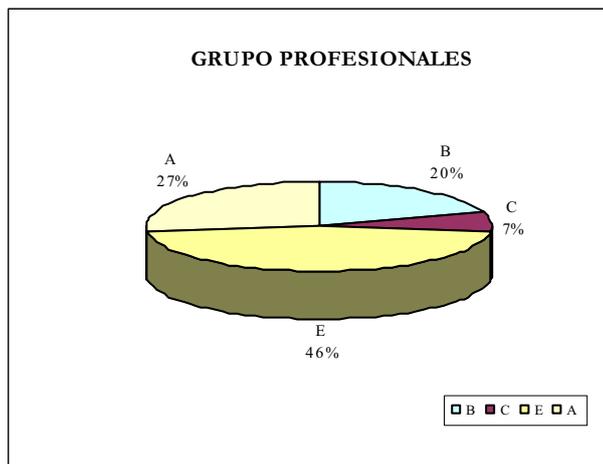
-El 56% del grupo de estudiantes identifica correctamente la piedra Bateig mientras que un 28% erróneamente reconoce el mortero de poliéster.

Cabe señalar, como hecho más destacable, la extraordinaria dificultad que han tenido los tres grupos de observadores para efectuar la identificación.

a)



b)



c)

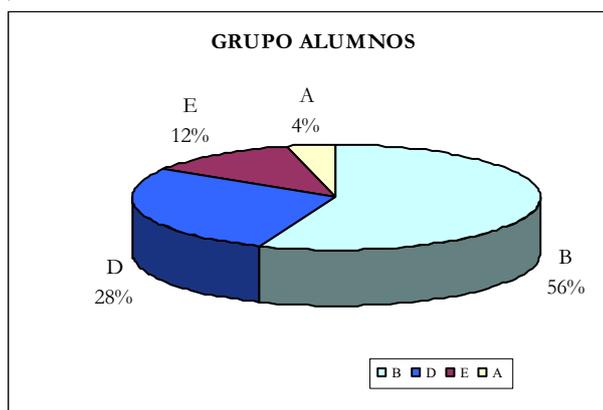


Figura 11.45.
Identificación
de la piedra
Bateig Crema a
3 m. de
distancia:
a) profesores,
b) profesionales
c) alumnos.

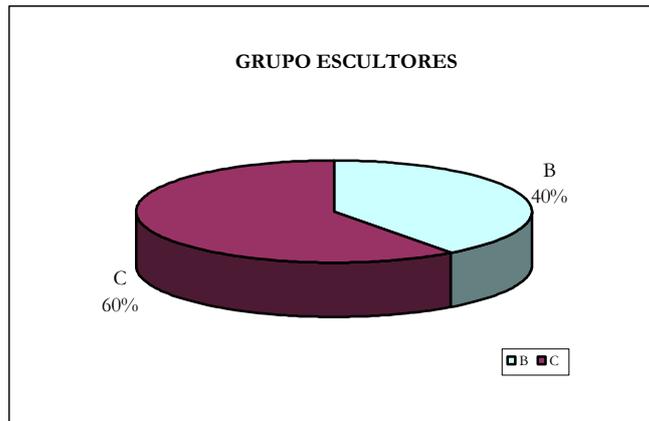
Analizando los resultados de los tres grupos encuestados a metro y medio de distancia (Figura 11.46.a-c), cabe señalar:

-El 60% de los escultores confunde el mortero acrílico con la piedra Bateig y, tan sólo un 40% de este colectivo identifica correctamente la piedra.

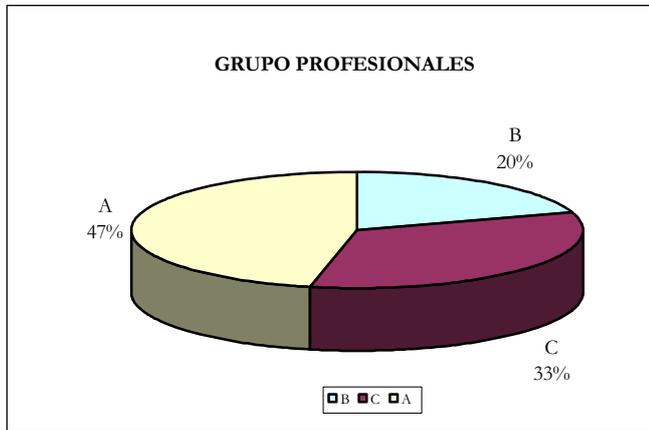
-El 47% de profesores identifica erróneamente el mortero de cal-yeso, mientras que otro 33% reconoce el mortero acrílico como la piedra natural y, sólo un 20% realiza correctamente la identificación de ésta.

- El grupo de alumnos efectúa una identificación correcta en un 40% mientras que un 32% erróneamente reconoce el mortero de poliéster.

a)



b)



c)

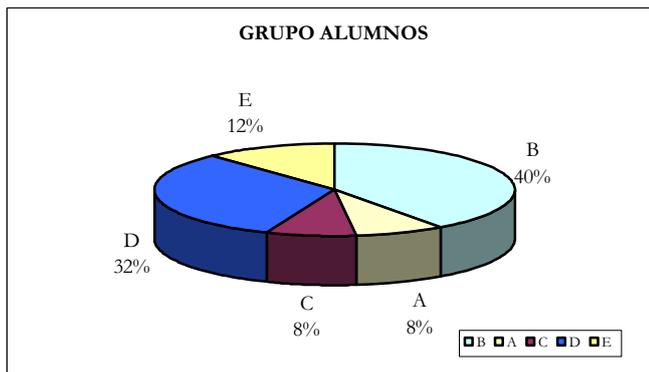


Figura 11.46. Identificación de la piedra Bateig Crema a 1,5 m. de distancia:
a) profesores,
b) profesionales,
c) alumnos.

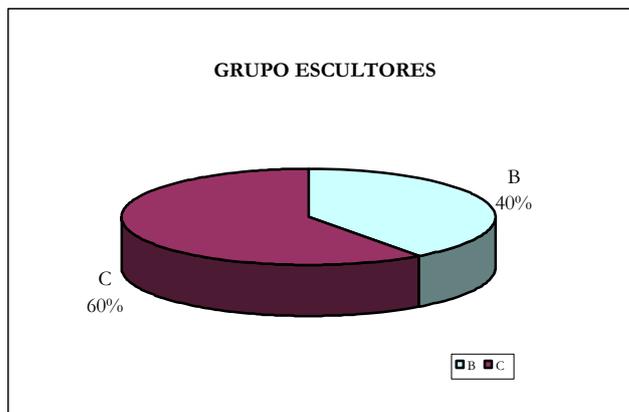
Analizando los resultados de los tres grupos encuestados a medio metro de distancia (Figura 11.47.a-c), se observa que:

-Un 60% de los escultores continúan identificando erróneamente el mortero acrílico.

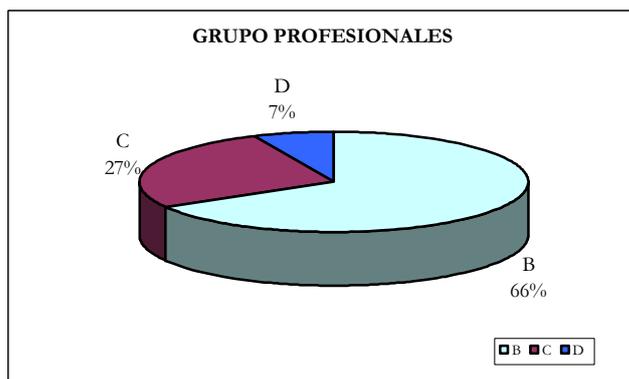
-El 66% de profesionales identifica correctamente la piedra natural y un 27% identifica erróneamente el mortero acrílico.

-El 48% de los estudiantes identifica correctamente la piedra natural.

a)



b)



c)

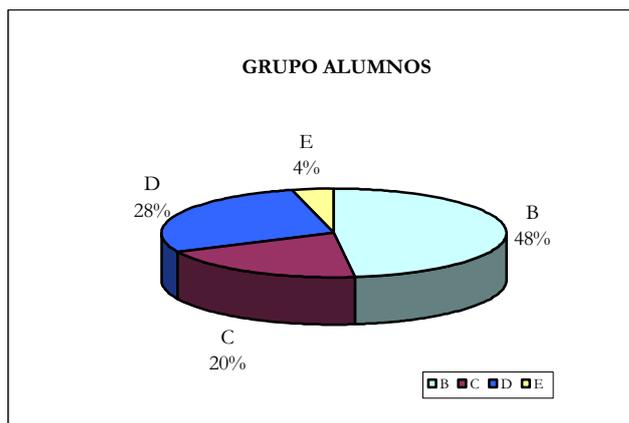


Figura 11.47. Identificación de la piedra Bateig Crema a 0,5 m. de distancia:
a) profesores,
b) profesionales
c) alumnos.

Cabe resaltar que, los tres grupos continúan identificando erróneamente los morteros compuestos pero, mientras que en el caso de los escultores, la elección se reduce solamente a dos morteros, en el resto de colectivos la respuesta se diversifica.

Analizando los resultados de los tres grupos encuestados en cuanto a la observación táctil (Figura 11.48.a-c), se evidencia que:

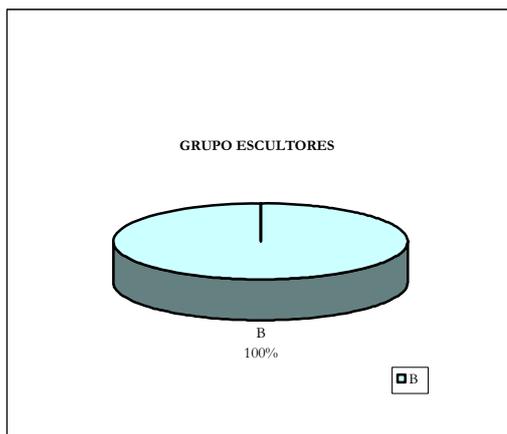
-Todos los escultores identifican correctamente la piedra Bateig.

-Un 73% de los profesores identifica correctamente la piedra Bateig y, sólo un 27% reconoce erróneamente el mortero acrílico.

-Sólo un 44% de los estudiantes efectúa una identificación correcta de la piedra Bateig.

De modo similar a la piedra Tosca de Rocafort, la proximidad y la posibilidad de efectuar un contacto directo con el material, así como, la experiencia del observador, son determinantes a la hora de discriminar los materiales en estudio. Asimismo, es de señalar que el mortero acrílico muestra un elevado nivel de indiscernibilidad a distancias medias (1,5 m.) mientras que el mortero de cal-yeso posee un mayor mimetismo con el material pétreo a distancias menores.

a)



b)



c)

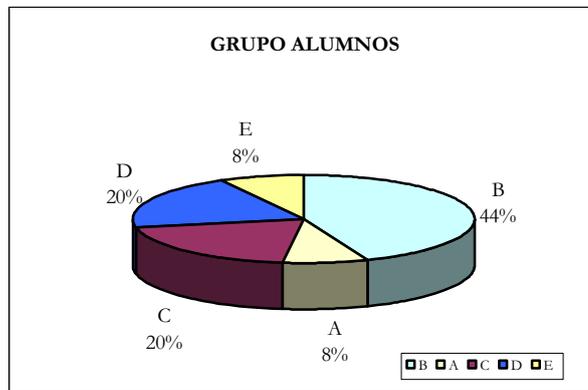


Figura 11.48.
Identificación de la piedra Bateig Crema, observación táctil:
a) profesores,
b) profesionales
c) alumnos.

Finalmente, señalaremos que los resultados obtenidos en esta experiencia deben ser considerados de manera orientativa. Al factor subjetivo del encuestado, hay que añadir su habilidad en la percepción visual y táctil de los materiales. No obstante, es posible concluir que, a distancias de observación superiores a 3 metros, ni siquiera un ojo experto distinguiría con dificultades un sellado, una reposición o una réplica con cualquiera de estos morteros compuestos.

Otra conclusión interesante de este estudio, se refiere a la mayor indiscernibilidad exhibida por el mortero de poliéster a distancias mayores contrariamente a los morteros de cal-yeso y acrílicos, que suelen reconocerse erróneamente como piedra natural a distancias cortas, independientemente del tipo de material pétreo.

11.3. MORTEROS COMPUESTOS CON INCORPORACIÓN DE AGENTES BIOCIDAS.

11.3.1. CARACTERIZACIÓN CROMÁTICA.

El procedimiento metodológico seguido en esta sección, se ha centrado en la caracterización de los morteros compuestos estudiados en esta Tesis Doctoral elaborados con la adición de productos biocidas (Tabla 10.22.d).

Se han efectuado mediciones colorimétricas sobre las probetas de morteros compuestos con el fin de observar las variaciones cromáticas asociadas a la adición del biocida en una primera instancia. Para ello, se han elegido como condiciones de trabajo el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de color 6500° K) y el observador estándar 10°.

Resultados y discusión

La Tabla 11.24 muestra las coordenadas cromáticas L*, a*, b* y sus correspondientes desviaciones estándar obtenidas en las tres probetas de cada uno de los diferentes morteros compuestos con y sin adición de biocidas.

Los morteros compuestos de cal-yeso y acrílicos elaborados con piedra Tosca de Rocafort exhiben un incremento de la coordenada L (luminosidad) al agregarse el biocida proporcionando al mortero un aspecto más claro. Sin embargo, los morteros de poliéster muestran una disminución de la luminosidad confiriendo a la superficie del mortero un aspecto más oscuro (Figura 11.49.a-e).

Desde el punto de vista de las coordenadas cromáticas a* y b*, la adición del componente biocida en los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort se traduce en un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo, ligeramente mayor en los morteros sin biocida (Figura 11.49.a-e).

Los morteros compuestos acrílicos y de cal-yeso (con Mowilith SDM 5 y ácido bórico) elaborados con piedra Bateig muestran un incremento de la coordenada L* (luminosidad) al agregar el biocida. Sin embargo, los morteros de poliéster y de cal-yeso se mantienen con unos

valores de luminosidad similares a los obtenidos con el mortero sin biocida (Figura 11.50.a-e).

Las coordenadas cromáticas a^* y b^* en los morteros compuestos elaborados con piedra Bateig y con adición del biocida muestran semejanzas con los morteros sin biocida, con un desplazamiento de color hacia el amarillo y hacia el rojo (Figura 11.50.).

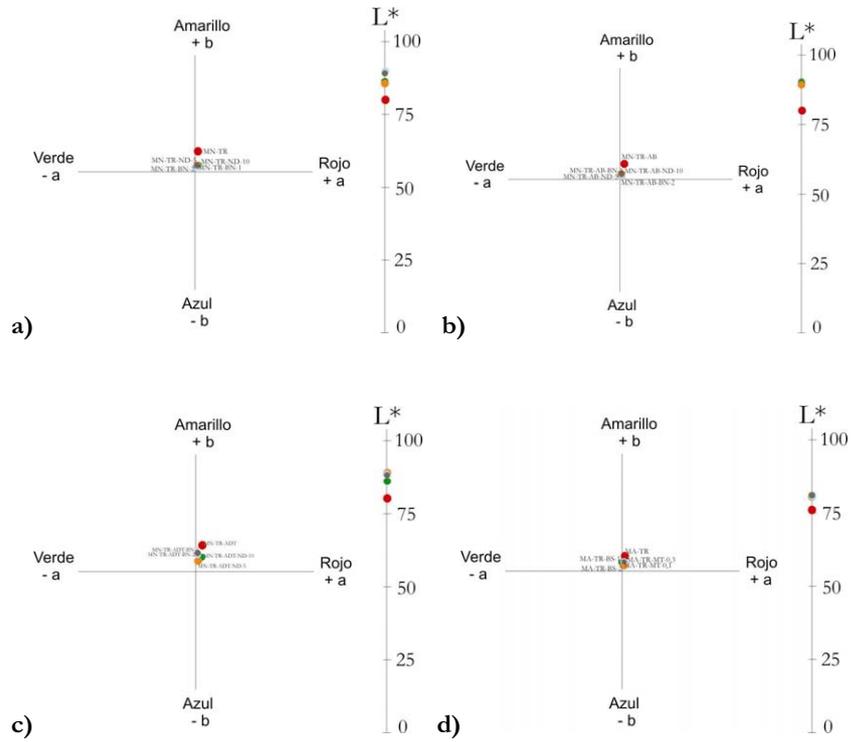
Tabla 11.24. Coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* y desviación estándar de los morteros compuestos con y sin adición de biocidas.

Nombre	L^*	Desviación estándar (S)	a^*	Desviación estándar (S)	b^*	Desviación estándar (S)
MN-TR	81,10	0,01	2,46	0,01	10,11	0,02
MN-TR-ND-5	86,94	0,06	1,4	0,1	4,6	0,2
MN-TR-ND-10	86,71	0,01	1,85	0,02	4,38	0,01
MN-TR-BN-2	89	1	0,7	0,2	3,4	0,1
MN-TR-BN-1	88,0	0,2	1,26	0,03	4,4	0,2
MN-TR-AB	81,26	0,01	3,2	0,1	10,6	0,2
MN-TR-AB-ND-10	89,76	0,01	1,2	0,1	4,52	0,02
MN-TR-AB-ND-5	90,1	0,2	0,86	0,01	3,1	0,4
MN-TR-AB-BN-2	91,70	0,01	1,0	0,2	2,6	0,1
MN-TR-AB-BN-1	91	1	0,75	0,04	4	1
MN-TR-ADT	80,05	0,01	3,3	0,1	10,11	0,02
MN-TR-ADT-ND-5	88,91	0,04	0,32	0,07	4,4	0,5
MN-TR-ADT-ND-10	86,54	0,01	2,01	0,05	5,78	0,02
MN-TR-ADT-BN-2	88,4	0,2	0,8	0,2	5,46	0,07
MN-TR-ADT-BN-1	87,68	0,07	1,89	0,03	6,14	0,03
MA-TR	77,11	0,02	2,83	0,04	11,4	0,1

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MA-TR-BS-2	83,0	0,2	1,1	0,2	5,47	0,05
MA-TR-BS-1	82,03	0,01	0,97	0,02	5,8	0,3
MA-TR-MT-0,3	83,01	0,06	1,4	0,2	6,3	0,1
MA-TR-MT-0,1	81,88	0,03	1,2	0,5	6,19	0,03
MP-TR	79,14	0,02	1,30	0,02	6,75	0,04
MP-TR-MT-0,1	72,21	0,05	2,3	0,1	7,2	0,1
MP-TR-MT-0,3	74,56	0,04	1,84	0,04	6	1
MP-TR-BS-1	76,8	0,2	1,3	0,2	5,47	0,06
MP-TR-BS-2	71,02	0,08	2,87	0,03	7,4	0,3
MN-BC	88,07	0,02	0,41	0,02	5,32	0,03
MN-BC-ND-10	91,21	0,02	0,52	0,03	4,25	0,03
MN-BC-ND-5	87,8	0,2	0,54	0,03	4,4	0,4
MN-BC-BN-2	88,11	0,02	0,43	0,06	5,87	0,09
MN-BC-BN-1	88,9	0,4	0,4	0,1	4,75	0,03
MN-BC-AB	83,99	0,04	0,50	0,02	6,13	0,04
MN-BC-AB-ND-10	91,9	0,7	0,3	0,1	3,9	0,7
MN-BC-AB-ND-5	91,16	0,05	0,49	0,05	3,2	0,2
MN-BC-AB-BN-2	87,99	0,01	0,45	0,06	4,57	0,08
MN-BC-AB-BN-1	88,73	0,04	0,45	0,04	5,4	0,4
MN-BC-ADT	84,05	0,06	0,53	0,01	5,51	0,06
MN-BC-ADT-BN-1	89	1	0,53	0,07	4,95	0,07
MN-BC-ADT-BN-2	87,43	0,05	1,34	0,05	7,3	0,3
MN-BC-ADT-ND-10	91,11	0,02	0,34	0,01	5,03	0,01
MN-BC-ADT-ND-5	87,99	0,09	0,57	0,04	4,5	0,4

MA-BC	79,67	0,01	0,48	0,05	6,88	0,04
MA-BC-MT-0,1	82,1	0,3	0,44	0,02	6,84	0,02
MA-BC-MT-0,3	84,31	0,02	0,42	0,05	6,3	0,2
MA-BC-BS-1	84,88	0,01	0,2	0,4	6,28	0,07
MA-BC-BS-2	84,2	0,4	0,36	0,01	7,14	0,02
MP-BC	72,15	0,02	0,53	0,03	5,58	0,04
MP-BC-BS-1	72,43	0,04	0,76	0,06	5,4	0,7
MP-BC-BS-2	71,87	0,02	0,39	0,02	4,12	0,03
MP-BC-MT-1	72,32	0,05	0,42	0,06	4,5	0,1
MP-BC-MT-0,3	75,91	0,07	0,44	0,05	5,16	0,02



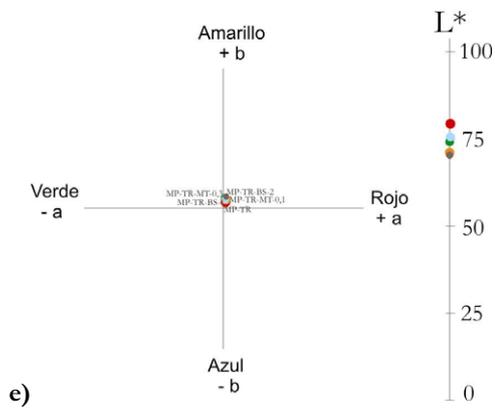
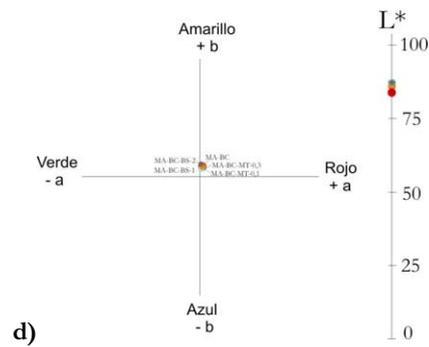
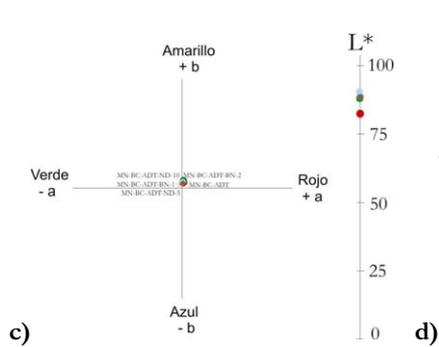
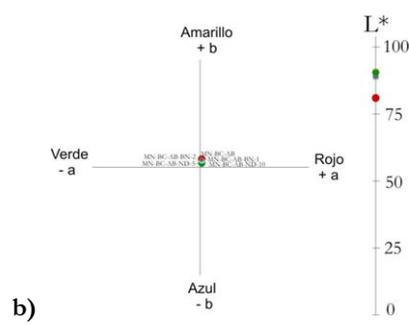
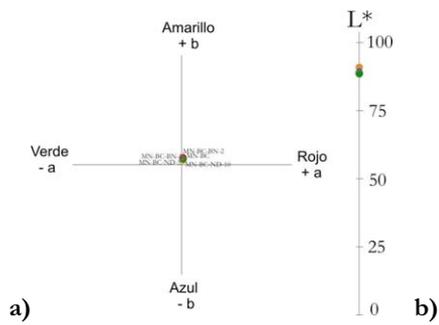


Figura 11.49
 Representación de las
 coordenadas cromáticas L^* ,
 a^* , b^* de los morteros
 compuestos:

- a) MN-TR;
- b) MN-TR-AB;
- c) MN-TR-ADT;
- d) MA-TR;
- e) MP-TR.



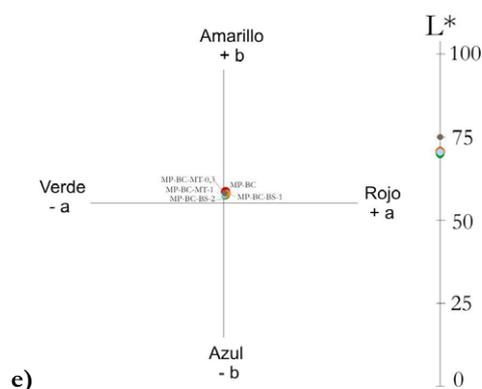


Figura 11.50.
Representación de las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* de los morteros compuestos:

- a) MN-BC;
- b) MN-BC-AB;
- c) MN-BC-ADT;
- d) MA-BC;
- e) MP-BC.

11.3.2. ESTABILIDAD FRENTE A AGENTES DEGRADANTES FÍSICO-QUÍMICOS.

11.3.2.1. Introducción.

Los ensayos de estabilidad frente a agentes degradantes físico-químico se ha llevado a cabo con morteros compuestos realizados según las formulaciones establecidas en este estudio (Tabla 10.22.a-c) las cuales incorporaban diferentes agentes biocidas tal y como se describe en la Tabla 10.22.d. De este modo, se ha pretendido evaluar la influencia de estos agentes biocidas en la estabilidad de los morteros compuestos frente a la acción de agentes medioambientales simulados (Tabla 11.25).

Tabla 11.25. Ensayos físico-químicos.

ENSAYOS FÍSICO-QUÍMICOS
Envejecimiento acelerado termohigrométrico
Envejecimiento acelerado por irradiación con luz Ultravioleta

11.3.2.2. Envejecimiento acelerado termohigrométrico.

En este ensayo se ha sometido las probetas a tres tipos diferentes de envejecimiento acelerado, con el propósito de evaluar las diferencias de comportamiento del material asociadas a diferentes condiciones climáticas, de temperatura y humedad. Estos climas simulados en cámara de envejecimiento han sido: clima tropical (40°C- 90% HR), clima templado (22°C-65% HR) y clima seco (75°C- 45% HR). Las probetas han estado sometidas a cada una de estas condiciones durante un mes.

Se han efectuado determinaciones colorimétricas sobre las probetas antes y después de ser sometida a ensayo de envejecimiento termohigrométrico, eligiendo como condiciones de trabajo el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de color 6500° K) y el observador estándar 10°.

Resultados y discusión

La Tabla 11.26. compara las variaciones de las coordenadas cromáticas L*, a*, b*, variación de color total ΔE y variación de tono Δh correspondientes a los morteros elaborados con piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema con y sin adición de biocidas, sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico simulando el clima tropical.

En general, se observa que los morteros preparados sin adición de biocida muestran los valores de variación de color total (ΔE) más bajos, especialmente los morteros de cal-yeso con piedra Tosca que incorporan Mowilith SDM 5 (MN-TR-ADT) y cal-yeso con piedra Bateig (MN-BC) con valores 0,62 y 0,20 respectivamente.

De la comparación de variación del color total de los morteros compuestos elaborados con los diferentes biocidas se deduce que: la adición del biocida Biotin N en los morteros de cal-yeso y sus derivados, elaborados con Tosca de Rocafort, produce una variación de color total superior a la asociada al empleo del biocida New Des. En los morteros acrílicos, es el empleo del biocida Biotin S el que produce un mayor aumento en la variación de color total y, en los morteros de poliéster lo es el biocida Metasol. Sin embargo, en los morteros de cal-yeso elaborados con piedra Bateig, la variación de color total superior se

produce al añadir New Des, mientras que el Metasol y Biotin S producen las mayores variaciones de color en los morteros acrílicos y de poliéster respectivamente.

La adición de los productos biocidas en los morteros compuestos de cal-yeso (MN), desde el punto de vista de la luminosidad, proporciona al mortero compuesto un aspecto más oscuro. Contrariamente, en los morteros compuestos acrílicos (MA) y de poliéster (MP), la adición del componente biocida aumenta la luminosidad proporcionando a la superficie del mortero un aspecto más claro.

Desde el punto de vista cromático, la adición del componente biocida en los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y piedra Bateig se traduce en un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo, como ponen de manifiesto los valores de las coordenadas cromáticas obtenidas.

Tabla 11.26. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b* y sus correspondientes desviaciones estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados con y sin biocidas sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico: clima tropical.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	83,10	0,01	81,86	0,02	-1,24	2,86	0,01	2,93	0,01	0,07	10,36	0,02	10,01	0,02	-0,35	1,29	-0,88
MN-TR-ND-5	88,94	0,06	78,31	0,02	-10,64	1,2	0,1	0,56	0,04	-0,64	4,3	0,2	7,7	0,3	3,41	11,19	10,06
MN-TR-ND-10	87,72	0,01	77,65	0,04	-10,07	1,55	0,02	1,9	0,6	0,41	4,83	0,01	8,56	0,01	3,73	10,74	14,35
MN-TR-BN-2	90	1	85,17	0,06	-5,35	0,9	0,2	1,62	0,02	0,69	3,3	0,1	6,2	0,5	2,90	6,13	11,45
MN-TR-BN-1	88,38	0,09	70,3	0,6	-18,05	1,32	0,04	0,51	0,01	-0,81	4,9	0,5	5,60	0,04	0,67	18,08	-0,95
MN-TR-AB	80,26	0,01	78,18	0,01	-2,08	3,18	0,01	3,65	0,08	0,46	10,76	0,01	11,69	0,01	0,92	2,32	-0,85
MN-TR-AB-ND-10	88,76	0,01	87,49	0,02	-1,27	1,2	0,2	0,43	0,09	-0,80	4,35	0,02	5,19	0,03	0,85	1,73	0,52
MN-TR-AB-ND-5	91,1	0,1	86,4	0,5	-4,68	0,88	0,01	0,90	0,02	0,02	3,3	0,5	5,68	0,04	2,39	5,26	6,70
MN-TR-AB-BN-2	90,70	0,01	86,6	0,3	-4,12	0,9	0,3	1,0	0,5	0,12	2,7	0,6	6,8	0,2	4,04	5,77	3,52
MN-TR-AB-BN-1	91	1	78,61	0,04	-12,59	0,75	0,04	1,55	0,04	0,81	4	1	7,9	0,2	3,74	13,16	7,36
MN-TR-ADT	81,05	0,02	80,71	0,01	-0,34	3,25	0,01	3,12	0,01	-0,13	10,16	0,02	9,66	0,02	-0,51	0,62	-0,18
MN-TR-ADT-ND-5	89,21	0,04	89	1	-0,44	0,22	0,06	0,2	0,1	0,02	4,5	0,5	4,67	0,06	0,22	0,49	-9,64
MN-TR-ADT-ND-10	85,64	0,01	87,86	0,01	2,22	2,00	0,04	1,07	0,01	-0,94	5,96	0,01	3,9	0,2	-2,10	3,19	9,62
MN-TR-ADT-BN-2	87,6	0,1	84,46	0,02	-3,13	0,8	0,1	0,24	0,04	-0,57	5,74	0,06	4	1	-1,73	3,63	3,15
MN-TR-ADT-BN-1	86,26	0,06	76,58	0,01	-9,68	1,79	0,02	1,38	0,02	-0,40	6,09	0,01	6,2	0,2	0,13	9,69	12,20

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MA-TR	76,68	0,01	73,5	0,1	-3,16	2,85	0,03	3,52	0,03	0,67	11,79	0,01	12,94	0,03	1,16	3,43	-1,63
MA-TR-BS-2	82,9	0,1	70,75	0,06	-12,14	1,1	0,2	0,39	0,06	-0,75	5,85	0,04	3,83	0,02	-2,01	12,33	-1,99
MA-TR-BS-1	83,03	0,01	77,6	0,4	-5,42	0,96	0,02	1,76	0,01	0,80	5,8	0,3	8	1	1,89	5,80	4,89
MA-TR-MT-0,3	82,01	0,09	88,94	0,04	6,93	1,3	0,2	0,45	0,09	-0,89	6,5	0,1	4,9	0,6	-1,51	7,15	6,21
MA-TR-MT-0,1	82,62	0,02	88,60	0,01	5,99	1	0,4	0,35	0,03	-0,87	6,06	0,01	4,29	0,06	-1,77	6,30	7,94
MP-TR	77,78	0,02	74,49	0,02	-3,29	1,50	0,01	1,82	0,01	0,32	6,45	0,02	7,04	0,01	0,59	3,35	-1,41
MP-TR-MT-0,1	71,80	0,04	88	1	16,51	2,49	0,02	0,42	0,06	-2,07	7,14	0,04	4,56	0,02	-2,57	16,84	-1,16
MP-TR-MT-0,3	74,85	0,02	88,83	0,01	13,98	1,80	0,04	0,31	0,01	-1,49	6	1	5,16	0,09	-0,50	14,07	0,77
MP-TR-BS-1	77,5	0,1	86,7	0,2	9,18	1,4	0,2	0,4	0,1	-0,95	5,9	0,1	5,8	0,6	-0,06	9,23	0,40
MP-TR-BS-2	70,36	0,09	68,8	0,4	-1,52	2,80	0,02	2,28	0,01	-0,52	7,4	0,2	6,14	0,06	-1,21	2,01	0,95
MN-BC	87,07	0,01	87,03	0,01	-0,03	0,41	0,01	0,35	0,03	-0,06	5,46	0,03	5,27	0,02	-0,19	0,20	0,52
MN-BC-ND-10	90,86	0,01	83,82	0,02	-7,04	0,55	0,05	1,92	0,02	1,37	4,21	0,04	5,8	0,3	1,58	7,34	-8,02
MN-BC-ND-5	88,5	0,2	73,37	0,06	-15,11	0,58	0,04	1,94	0,07	1,36	4,9	0,5	6,39	0,09	1,43	15,24	-4,41
MN-BC-BN-2	88,37	0,01	88,57	0,02	0,20	0,44	0,01	1,05	0,02	0,62	5,35	0,04	4,69	0,06	-0,66	0,93	-3,79
MN-BC-BN-1	89,33	0,06	78,4	0,5	-10,96	0,42	0,01	1,34	0,06	0,90	4,48	0,01	7,21	0,02	2,73	11,34	-7,29
MN-BC-AB	84,07	0,03	83,15	0,03	-0,92	0,50	0,02	0,57	0,01	0,07	6,34	0,02	6,24	0,01	-0,11	0,93	-0,67
MN-BC-AB-ND-10	91,1	0,6	79,07	0,06	-12,00	0,33	0,09	0,56	0,09	0,22	3,9	0,6	7,7	0,3	3,71	12,56	-6,38
MN-BC-AB-ND-5	90,56	0,06	80,01	0,02	-10,55	0,39	0,01	0,5	0,2	0,09	3,7	0,1	7,8	0,4	4,11	11,32	10,97
MN-BC-AB-BN-2	88,53	0,01	72,9	0,1	-15,66	0,42	0,04	0,2	0,1	-0,19	4,66	0,07	2,9	0,8	-1,74	15,76	0,51
MN-BC-AB-BN-1	88,51	0,06	90,92	0,02	2,41	0,45	0,04	0,6	0,1	0,11	5,5	0,3	3,9	0,6	-1,59	2,89	13,60
MN-BC-ADT	85,00	0,02	84,05	0,01	-0,95	0,53	0,01	0,53	0,02	0,00	5,71	0,02	5,66	0,06	-0,05	0,95	0,00
MN-BC-ADT-BN-1	89	1	90,4	0,5	0,98	0,51	0,06	0,58	0,01	0,07	4,90	0,06	4,38	0,02	-0,53	1,11	3,44
MN-BC-ADT-BN-2	87,17	0,02	70,35	0,02	-16,82	1,30	0,04	2,51	0,01	1,21	7,1	0,2	8,78	0,01	1,71	16,95	-5,55
MN-BC-ADT-ND-10	90,27	0,02	87,56	0,06	-2,71	0,36	0,01	1,26	0,11	0,91	5,00	0,01	4,6	0,2	-0,38	2,88	-8,84
MN-BC-ADT-ND-5	89,22	0,09	87,03	0,07	-2,19	0,5	0,2	1,1	0,5	0,59	4,5	0,5	4,56	0,07	0,09	2,27	0,63
MA-BC	79,87	0,01	78,50	0,09	-1,37	0,58	0,03	0,64	0,02	0,06	6,87	0,02	7,99	0,01	1,13	1,77	0,23
MA-BC-MT-0,1	81,2	0,3	86,31	0,07	5,09	0,46	0,02	1,4	0,1	0,91	6,81	0,04	4,8	0,8	-2,02	5,55	0,24
MA-BC-MT-0,3	82,31	0,01	87,48	0,04	5,16	0,41	0,02	0,4	0,3	0,00	6,2	0,2	4,75	0,04	-1,47	5,37	-6,74
MA-BC-BS-1	85,12	0,06	88,11	0,09	2,99	0,2	0,1	1,34	0,02	1,11	6,20	0,06	4,37	0,04	-1,83	3,68	-3,21
MA-BC-BS-2	83,2	0,4	81,70	0,09	-1,53	0,34	0,01	0,53	0,06	0,19	7,12	0,02	8,39	0,04	1,27	2,00	-2,47
MP-BC	71,28	0,02	69,98	0,01	-1,30	0,55	0,03	0,51	0,01	-0,05	5,49	0,01	6,83	0,02	1,34	1,87	1,34
MP-BC-BS-1	72,15	0,04	81,7	0,2	9,51	0,80	0,06	0,27	0,01	-0,53	5,4	0,6	6,28	0,06	0,93	9,57	3,29
MP-BC-BS-2	71,90	0,02	88,78	0,01	16,88	0,38	0,02	0,44	0,09	0,06	4,08	0,01	4,7	0,1	0,65	16,89	1,09
MP-BC-MT-1	72,12	0,06	82,84	0,04	10,72	0,41	0,01	0,52	0,04	0,12	4,38	0,09	2,67	0,06	-1,71	10,86	0,68
MP-BC-MT-0,3	75,90	0,02	74,04	0,06	-1,86	0,46	0,02	0,6	0,1	0,10	5,16	0,01	5,68	0,01	0,52	1,93	-2,46

La Figura 11.51. muestra el diagrama cromático CIELAB en el que se han representado los dos morteros, que más han variado sus coordenadas cromáticas tras el ensayo de envejecimiento en clima tropical. El mortero MN-TR-BN-1, tras someterlo a las condiciones ambientales descritas, tiende hacia el amarillo (Figura 11.51.a), mientras que el mortero MN-BC-ADT-BN-2 deriva hacia el naranja (Figura 11.51.b). En ambos casos, la coordenada L^* es la responsable del fuerte oscurecimiento de los mortero tras el ensayo de envejecimiento.

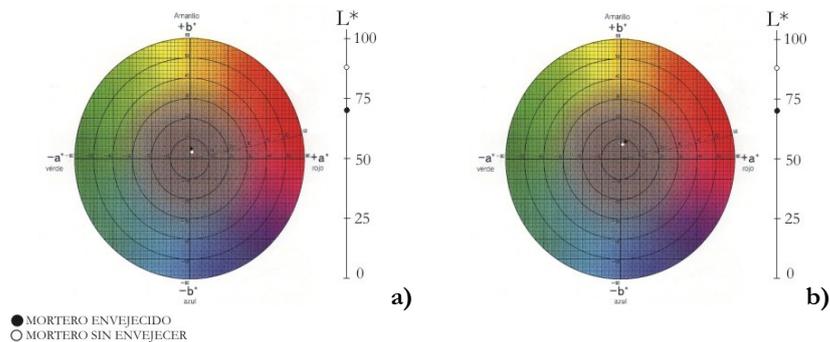


Figura 11.51. Diagrama cromático CIELAB. Compara la variación de las coordenadas cromáticas de los morteros compuestos antes y después de someterlos a ensayo de envejecimiento simulando clima tropical. a) MN-TR-BN-1; b) MN-BC-ADT-BN-2.

La Tabla 11.27. compara las variaciones de las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* , variación de color total ΔE y variación de tono Δh correspondientes a los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema con y sin adición de biocidas simulando un clima seco.

En general se observa que todos los morteros se han visto afectados, en mayor o menor medida, por las condiciones ambientales a las que han sido sometidos. El mortero de cal-yeso elaborado con piedra Tosca de Rocafort con aditivo Mowilith y biocida Biotin N al 2% (MN-TR-ADT-BN-2) es el más estable con una variación de color total de 0,22. En cambio, los morteros de cal-yeso elaborados con Tosca y aditivo Mowilith SDM 5 más el biocida New Des al 5-10% (MN-TR-ADT-ND) y, los morteros de cal-yeso con Tosca de Rocafort con incorporación de ácido bórico y biocidas New Des y Biotin N, respectivamente, (MN-TR-AC.BOR-ND/ MN-TR-AC.BOR-BN)

muestran las variaciones de color total más significativas ($\Delta E=3,53$ y $4,34$). En conjunto, los morteros de poliéster (MP-TR) son los más estables ($\Delta E=0,31$ y $1,29$).

De la comparación de la variación del color total de los morteros compuestos elaborados con los diferentes biocidas se deduce que: la adición del biocida Biotin N en los morteros de cal-yeso elaborados con Tosca de Rocafort, produce una variación de color total semejante a la asociada al empleo del biocida New Des. En los morteros de cal-yeso con Mowilith SDM 5 y con ácido bórico, es el empleo del biocida New Des el que produce una mayor variación de color total. En los morteros acrílicos, es el empleo del biocida Metasol el que produce un mayor aumento en la variación de color total y, en los morteros de poliéster lo es el biocida Biotin S. Sin embargo, en los morteros de cal-yeso elaborados con piedra Bateig, la variación de color total superior se produce al añadir Biotin N, New Des en sus derivados, mientras que el Metasol produce las mayores variaciones de color en los morteros acrílicos y de poliéster.

La adición del biocida en los morteros compuestos tiene como resultado una disminución de la luminosidad, proporcionando un aspecto más oscuro a la superficie, si bien esta disminución de luminosidad es muy baja.

Desde el punto de vista cromático, la adición del componente biocida en los morteros compuestos se traduce en un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo.

Tabla 11.27. Variación de las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* y sus correspondientes desviaciones estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados con y sin biocidas sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico: clima seco.

Nombre	L^* inicial	S	L^* final	S	ΔL^*	a^* inicial	S	a^* final	S	Δa^*	b^* inicial	S	b^* final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	82,33	0,02	80,55	0,02	-1,78	2,90	0,02	3,14	0,02	0,24	10,27	0,02	10,51	0,02	0,23	1,81	-0,88
MN-TR-ND-5	86	1	86,32	0,02	0,53	1,9	0,6	1,60	0,09	-0,31	6,8	0,3	6,89	0,01	0,14	0,63	2,76
MN-TR-ND-10	86,45	0,09	85,18	0,06	-1,27	1,60	0,06	1,31	0,01	-0,29	4,69	0,02	6,1	0,2	1,41	1,92	6,67
MN-TR-BN-1	87,02	0,04	87,6	0,1	0,60	1,70	0,01	1,14	0,04	-0,56	5,4	0,5	5,41	0,03	0,01	0,82	5,59
MN-TR-BN-2	90,1	0,1	89,24	0,06	-0,90	1,02	0,06	1,01	0,04	-0,01	3,59	0,01	4,57	0,02	0,97	1,32	3,43
MN-TR-AB	78,94	0,03	77,59	0,01	-1,35	3,72	0,01	3,85	0,02	0,12	12,50	0,01	13,24	0,02	0,74	1,54	0,39

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MN-TR-AB-BN-1	87,12	0,01	88,1	0,4	0,92	1,90	0,01	0,62	0,06	-1,28	5,32	0,02	9	1	3,15	3,53	15,51
MN-TR-AB-BN-2	90,9	0,2	88,88	0,02	-2,02	0,8	0,2	0,06	0,06	-0,71	2,72	0,06	6,49	0,09	3,77	4,34	15,20
MN-TR-AB-ND-10	91,61	0,03	89,11	0,04	-2,50	0,74	0,03	-0,13	0,01	-0,87	3,3	0,1	8,52	0,04	5,23	5,86	13,49
MN-TR-AB-ND-5	89,04	0,02	89,65	0,02	0,62	1,11	0,02	0,42	0,06	-0,69	3,56	0,06	6,1	0,1	2,52	2,69	13,39
MN-TR-ADT-ND-10	81,97	0,02	81,08	0,01	-0,88	3,29	0,01	3,15	0,02	-0,14	11,01	0,01	11,27	0,01	0,26	0,93	1,00
MN-TR-ADT-ND-5	88,7	0,3	87,44	0,09	-1,30	1,33	0,02	0,88	0,03	-0,45	4,8	0,8	8,1	0,3	3,27	3,55	9,28
MN-TR-ADT-BN-2	90,87	0,02	87,47	0,01	-3,40	0,35	0,06	0,35	0,09	0,00	3,85	0,04	5,01	0,02	1,16	3,59	1,22
MN-TR-ADT-BN-1	89,7	0,5	89,53	0,04	-0,21	0,4	0,1	0,37	0,01	-0,04	4,67	0,04	4,6	0,5	-0,04	0,22	0,49
MA-TR	88,71	0,01	87,20	0,04	-1,51	1,34	0,06	1,24	0,01	-0,10	4,55	0,04	5,47	0,01	0,92	1,77	3,65
MA-TR-BS-2	76,97	0,01	75,97	0,01	-0,99	2,67	0,02	2,85	0,03	0,18	10,24	0,01	10,76	0,02	0,52	1,13	-0,23
MA-TR-BS-1	83,41	0,02	82,76	0,42	-0,65	0,87	0,01	1,14	0,64	0,27	6	1	7,15	0,09	1,38	1,55	-0,46
MA-TR-MT-0,1	82,83	0,06	81,64	0,02	-1,19	1,3	0,2	1,48	0,06	0,21	7,20	0,09	7,88	0,01	0,67	1,39	-0,63
MA-TR-MT-0,3	82,7	0,1	80,92	0,04	-1,79	1,37	0,03	1,40	0,01	0,03	6,92	0,04	7,40	0,04	0,48	1,85	0,51
MP-TR	82,30	0,06	80,72	0,02	-1,58	1,28	0,02	1,46	0,06	0,18	5,7	0,1	6,68	0,04	1,01	1,89	0,40
MP-TR-MT-0,1	70,95	0,01	68,63	0,01	-2,32	2,45	0,02	2,84	0,01	0,39	7,18	0,01	8,88	0,02	1,70	2,90	1,10
MP-TR-MT-0,3	74,7	0,4	74,7	0,3	-0,06	1,95	0,01	1,66	0,02	-0,30	7	1	6,4	0,8	-0,87	0,92	0,53
MP-TR-BS-1	76,16	0,04	75,88	0,02	-0,28	1,7	0,2	1,62	0,06	-0,10	6,26	0,09	6,18	0,04	-0,09	0,31	0,67
MP-TR-BS-2	73,94	0,04	73,3	0,5	-0,69	2,04	0,03	2,1	0,1	0,09	6,59	0,01	7,68	0,04	1,09	1,29	1,69
	73,13	0,04	72,13	0,01	-1,00	2,20	0,02	2,13	0,06	-0,07	7,08	0,01	7,12	0,03	0,04	1,00	0,59
MN-BC	86,78	0,02	85,18	0,02	-1,60	0,45	0,09	0,49	0,03	0,04	5,27	0,02	5,55	0,03	0,29	1,62	-0,16
MN-BC-ND-10	88,8	0,6	89,9	0,4	1,06	0,51	0,02	0,51	0,09	0,00	5,22	0,01	5,32	0,02	0,10	1,07	0,07
MN-BC-ND-5	89,26	0,06	88,36	0,02	-0,90	0,67	0,09	0,62	0,01	-0,05	5,2	0,2	5,70	0,06	0,50	1,03	1,16
MN-BC-BN-2	89,42	0,01	88,36	0,04	-1,06	0,29	0,04	0,45	0,04	0,15	5,04	0,03	5,9	0,1	0,88	1,38	-1,00
MN-BC-BN-1	89,27	0,06	88,50	0,02	-0,77	0,4	0,1	0,57	0,04	0,15	4,86	0,02	5,85	0,06	0,99	1,26	-0,65
MN-BC-AB	84,68	0,03	82,91	0,02	-1,77	0,38	0,09	0,48	0,02	0,09	6,00	0,02	6,45	0,09	0,45	1,83	-0,58
MN-BC-AB-ND-5	91,52	0,09	89,70	0,01	-1,83	0,27	0,01	0,07	0,01	-0,20	3,9	0,6	6,1	0,3	2,22	2,88	3,25
MN-BC-AB-ND-10	90,87	0,01	89,6	0,2	-1,25	0,35	0,02	-0,08	0,09	-0,43	3,85	0,06	6,48	0,02	2,63	2,94	5,94
MN-BC-AB-BN-2	87,43	0,04	88,06	0,03	0,63	0,57	0,04	0,23	0,01	-0,34	6,27	0,01	7,3	0,5	1,02	1,25	3,41
MN-BC-AB-BN-1	89,70	0,04	88,18	0,02	-1,51	0,32	0,01	0,19	0,01	-0,13	4,78	0,06	6,34	0,01	1,56	2,18	2,12
MN-BC-ADT-ND-10	85,43	0,01	84,43	0,03	-0,99	0,47	0,03	0,49	0,03	0,02	5,90	0,02	6,92	0,04	1,02	1,42	0,54
MN-BC-ADT-BN-1	90	1	89,5	0,6	-0,66	0,31	0,01	0,05	0,01	-0,26	4,1	0,4	5,43	0,09	1,37	1,54	3,78
MN-BC-ADT-BN-2	87,25	0,09	86,18	0,06	-1,07	0,6	0,1	0,8	0,2	0,18	6,03	0,02	6,55	0,01	0,51	1,20	-1,11
MN-BC-ADT-ND-5	89,43	0,04	89,29	0,01	-0,14	0,41	0,04	-0,02	0,03	-0,43	5,14	0,04	6,19	0,04	1,04	1,14	4,71
MA-BC	89,4	0,1	87,18	0,06	-2,20	0,44	0,04	0,51	0,02	0,07	4,89	0,02	5,43	0,04	0,54	2,27	-0,19
MA-BC-MT-0,1	80,19	0,02	78,94	0,02	-1,25	0,44	0,03	0,93	0,03	0,49	6,79	0,01	7,65	0,02	0,86	1,59	-3,23
	82,46	0,02	79,8	0,3	-2,63	0,24	0,09	0,9	0,4	0,66	6,4	0,6	7	1	0,73	2,81	-5,02

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MA-BC-MT-0,3	83,55	0,06	81,49	0,02	-2,06	0,60	0,01	1,18	0,02	0,58	7,91	0,06	7,95	0,09	0,04	2,14	-4,13
MA-BC-BS-1	82,2	0,1	79,9	0,5	-2,21	0,76	0,04	1,30	0,04	0,54	7,71	0,01	8,78	0,04	1,07	2,52	-2,80
MA-BC-BS-2	81,42	0,06	80,38	0,01	-1,04	0,50	0,04	0,93	0,02	0,44	7,81	0,06	8,2	0,1	0,36	1,19	-2,87
MP-BC	66,12	0,02	65,86	0,07	-0,26	0,57	0,01	0,74	0,02	0,17	5,65	0,02	6,77	0,02	1,13	1,17	-0,49
MP-BC-MT-0,3	76,47	0,09	78	1	1,17	0,35	0,01	0,20	0,01	-0,15	5,18	0,02	4,29	0,01	-0,89	1,47	1,18
MP-BC-MT-1	70,13	0,01	69,69	0,09	-0,44	0,45	0,06	0,4	0,2	-0,07	6,35	0,06	6,1	0,2	-0,25	0,51	0,46
MP-BC-BS-1	67,67	0,04	67,75	0,04	0,08	0,75	0,01	0,62	0,03	-0,13	6,6	0,1	6,20	0,03	-0,34	0,38	0,81
MP-BC-BS-2	75,78	0,04	73,6	0,1	-2,19	0,16	0,06	0,41	0,02	0,25	4,25	0,06	5,55	0,02	1,30	2,56	-2,05

La Figura 11.52. muestra el diagrama cromático CIELAB en el que se han representado los dos morteros que más han variado sus coordenadas cromáticas tras el ensayo de envejecimiento en clima seco. El mortero MN-TR-AB-ND-10 (Figura 11.52.a), tras someterlo a las condiciones ambientales, tiende hacia el amarillo-verde, mientras que el mortero MA-BC-MT-0,1 (Figura 11.52.b) deriva hacia el amarillo. En ambos morteros, los valores de la coordenada L^* muestran un incremento positivo.

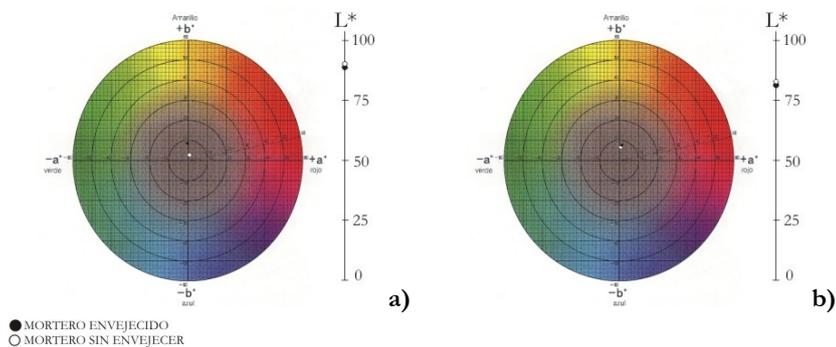


Figura 11.52. Diagrama cromático CIELAB. Comparación de la variación de las coordenadas cromáticas de los morteros compuestos antes y después de someterlos a ensayo de envejecimiento simulando clima seco. a) MN-TR-AB-ND-10; b) MA-BC-MT-0,1.

La Tabla 11.28. compara las variaciones de las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* , variación de color total ΔE y variación de tono Δh correspondientes a los morteros elaborados con piedra Tosca de Rocafort y Bateig Crema con y sin adición de biocidas, sometidas a

envejecimiento acelerado termohigrométrico simulando un clima templado.

Los morteros de cal-yeso y los acrílicos elaborados a partir de piedra Tosca de Rocafort exhiben, en general, unas variaciones de color total bajas con la adición de los biocidas, mientras que en los morteros de poliéster éstas son significativas.

Los morteros de cal-yeso elaborados a partir de piedra Bateig exhiben, en general, variaciones de color total más bajas con la adición de biocidas, mientras que en los morteros acrílicos y de poliéster éstas aumentan significativamente.

De la comparación de variación del color total de los morteros compuestos elaborados con los diferentes biocidas se deduce que: la adición del biocida Biotín N en los morteros de cal-yeso con Mowilith SDM 5 elaborados con Tosca de Rocafort, produce una variación de color total superior a la asociada al empleo del biocida New Des. En los morteros de cal-yeso con ácido bórico, es el empleo del biocida Biotín N el que produce una mayor variación de color total. En los morteros acrílicos, es el empleo del biocida Metasol el que produce un mayor aumento en la variación de color total y, en los morteros de poliéster lo es el biocida Biotín S. Sin embargo, en los morteros de cal-yeso y derivados elaborados con piedra Bateig, la variación de color total superior se produce al añadir New Des, mientras que el Biotín S produce los mayores desvíos de color en los morteros acrílicos y de poliéster.

Desde el punto de vista cromático, la adición del componente biocida en los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y piedra Bateig se traduce en un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo.

En los morteros compuestos de cal-yeso y acrílicos la incorporación del biocida produce una disminución de la luminosidad proporcionando un aspecto más oscuro a la superficie, si bien esta disminución de luminosidad es muy baja. Sin embargo, en los morteros de poliéster la adición del componente biocida produce un aumento del valor de la luminosidad proporcionando a la superficie del mortero un aspecto más claro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 11.28. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b* y sus correspondientes desviaciones estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono (Δh) de los morteros compuestos estudiados con y sin biocidas sometidos a envejecimiento acelerado termohigrométrico: clima templado.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	79,59	0,01	81,99	0,02	2,40	3,71	0,01	3,01	0,01	-0,70	11,90	0,02	10,11	0,01	-1,79	3,07	0,72
MN-TR-ND-5	87,58	0,01	88,14	0,04	0,56	1,60	0,02	0,3	0,1	-1,35	6	1	3,6	0,8	-1,91	2,41	12,17
MN-TR-ND-10	86,48	0,01	86,32	0,02	-0,16	1,58	0,02	1,3	0,6	-0,26	5,43	0,09	4,90	0,04	-0,52	0,60	1,13
MN-TR-BN-1	89,12	0,03	87,96	0,01	-1,16	1,15	0,06	1,1	0,4	-0,03	3,69	0,04	3,84	0,04	0,15	1,17	0,67
MN-TR-BN-2	89,30	0,01	88,1	0,6	-1,24	1,2	0,1	1,3	0,5	0,10	3,4	0,1	3,84	0,03	0,41	1,31	1,03
MA-TR-AB	82,57	0,02	81,29	0,02	-1,28	2,98	0,01	2,80	0,01	-0,18	10,11	0,02	9,09	0,01	-1,02	1,65	-0,73
MN-TR-AB-BN-1	92,08	0,06	90,67	0,81	-1,41	0,73	0,04	0,77	0,01	0,04	3,05	0,02	3,2	0,1	0,11	1,42	5,09
MN-TR-AB-BN-2	90,19	0,01	88,70	0,04	-1,49	0,96	0,02	0,79	0,01	-0,16	3,31	0,02	3,11	0,06	-0,20	1,51	-0,83
MN-TR-AB-ND-5	91,61	0,06	88,95	0,04	-2,66	0,88	0,02	1,04	0,03	0,16	3,38	0,06	3,78	0,02	0,40	2,70	1,82
MN-TR-AB-ND-10	87,36	0,02	87,08	0,04	-0,27	1,29	0,01	0,97	0,01	-0,32	3,8	0,1	3,98	0,09	0,20	0,46	-0,15
MN-TR-ADT	79,64	0,03	78,06	0,02	-1,59	3,78	0,02	3,59	0,01	-0,19	11,80	0,02	10,83	0,01	-0,97	1,87	-0,58
MN-TR-ADT-ND-10	88,5	0,8	87,01	0,01	-1,48	1,34	0,04	1,5	0,5	0,14	4,69	0,01	5,08	0,04	0,39	1,53	-0,92
MN-TR-ADT-ND-5	89,35	0,04	87,63	0,01	-1,73	0,45	0,02	0,54	0,04	0,09	4,9	0,2	4,96	0,02	0,07	1,73	-0,30
MN-TR-ADT-BN-2	89,12	0,04	88,36	0,03	-0,75	0,40	0,01	0,3	0,1	-0,06	4,66	0,03	3,65	0,02	-1,01	1,26	-0,41
MN-TR-ADT-BN-1	87,46	0,03	88,26	0,01	0,80	1,6	0,6	1,1	0,5	-0,49	5,41	0,02	4,49	0,01	-0,92	1,31	2,58
MA-TR	77,42	0,03	76,3	0,1	-1,16	2,69	0,02	2,83	0,01	0,15	10,28	0,03	11,08	0,02	0,80	1,42	0,31
MA-TR-BS-2	81,81	0,04	82	1	0,33	1,38	0,02	1,30	0,06	-0,09	6,9	0,8	6,76	0,04	-0,23	0,41	0,34
MA-TR-BS-1	83,06	0,02	81,60	0,09	-1,46	1,33	0,02	1,18	0,01	-0,15	6,95	0,04	5,86	0,02	-1,10	1,83	-0,55
MA-TR-MT-0,3	83,07	0,02	81,51	0,04	-1,56	1,33	0,06	1,43	0,06	0,11	7,17	0,04	7,24	0,01	0,06	1,56	-0,73
MA-TR-MT-0,1	82,50	0,01	81,9	0,1	-0,61	1,4	0,1	1,29	0,02	-0,05	6,41	0,04	6,2	0,6	-0,24	0,66	0,01
MP-TR	74,78	0,01	74,11	0,01	-0,66	1,75	0,02	1,70	0,02	-0,06	6,50	0,03	6,34	0,02	-0,16	0,69	0,11
MP-TR-MT-0,3	71,9	0,1	72,87	0,03	0,95	2,32	0,01	2,01	0,03	-0,31	6,8	0,8	7	1	-0,15	1,01	-2,94
MP-TR-MT-0,1	74,62	0,06	74,17	0,02	-0,45	2,0	0,2	1,53	0,01	-0,48	7,54	0,04	4,74	0,09	-2,80	2,88	2,03
MP-TR-BS-2	69,63	0,02	70,03	0,06	0,41	2,90	0,03	2,45	0,04	-0,45	7,36	0,04	6,07	0,04	-1,29	1,43	-2,81
MP-TR-BS-1	74,61	0,09	71,2	0,1	-3,46	1,80	0,02	2,3	0,1	0,47	6,07	0,03	6,5	0,1	0,40	3,52	-0,47
MN-BC	86,66	0,01	85,78	0,01	-0,88	0,39	0,01	0,31	0,03	-0,08	5,19	0,03	4,79	0,02	-0,41	0,97	0,58
MN-BC-ND-5	89,1	0,8	87,27	0,06	-1,87	0,56	0,01	0,61	0,03	0,05	4,66	0,04	4,25	0,01	-0,41	1,91	-2,44
MN-BC-ND-10	86,96	0,04	87,30	0,01	0,34	0,54	0,01	0,71	0,02	0,17	5,99	0,02	5,34	0,01	-0,65	0,75	-1,30
MN-BC-BN-1	88,96	0,04	88,51	0,06	-0,45	0,39	0,03	0,39	0,06	0,00	4,50	0,02	4,44	0,03	-0,06	0,45	0,69
MN-BC-BN-2	87,88	0,04	86,95	0,02	-0,93	0,60	0,01	0,4	0,1	-0,18	6,13	0,01	4,92	0,01	-1,22	1,54	-0,11
MN-BC-AB	84,77	0,01	83,57	0,04	-1,20	0,55	0,01	0,51	0,03	-0,04	6,72	0,03	6,21	0,01	-0,51	1,30	-0,02

MN-BC-AB-ND-10	90,67	0,04	90,5	0,6	-0,21	0,34	0,01	0,20	0,04	-0,14	4,2	0,1	4,2	0,8	0,01	0,26	1,90
MN-BC-AB-ND-5	89,95	0,02	87,38	0,04	-2,57	0,29	0,01	1,25	0,02	0,96	3,62	0,06	4,40	0,04	0,77	2,85	-11,27
MN-BC-AB-BN-2	90,53	0,01	89,74	0,04	-0,79	0,23	0,02	0,26	0,02	0,02	4,26	0,02	4,41	0,04	0,15	0,80	-0,22
MN-BC-AB-BN-1	90,2	0,6	88,90	0,03	-1,29	0,35	0,03	0,39	0,01	0,04	4,53	0,09	5,10	0,04	0,57	1,41	-0,01
MN-BC-ADT	85,13	0,01	84,44	0,02	-0,68	0,57	0,01	0,55	0,01	-0,02	6,64	0,01	6,10	0,02	-0,54	0,87	-0,27
MN-BC-ADT-BN-2	87	1	86,42	0,02	-0,98	0,51	0,01	0,57	0,06	0,06	5,64	0,01	5,7	0,8	0,07	0,98	-0,85
MN-BC-ADT-BN-1	88,84	0,09	88,49	0,02	-0,35	0,31	0,01	0,35	0,01	0,04	5,2	0,2	4,73	0,04	-0,51	0,63	-0,52
MN-BC-ADT-ND-10	88,95	0,04	87,85	0,06	-1,10	0,48	0,03	0,38	0,06	-0,10	5,32	0,03	5,07	0,04	-0,25	1,13	0,88
MN-BC-ADT-ND-5	89,8	0,1	88,3	0,1	-1,57	0,34	0,01	0,37	0,02	0,03	4,64	0,02	4,61	0,03	-0,04	1,57	-0,44
MA-BC	79,16	0,02	78,97	0,02	-0,18	0,81	0,01	0,92	0,01	0,11	7,71	0,01	7,74	0,02	0,03	0,22	-0,78
MA-BC-MT-0,3	82,89	0,06	81,9	0,7	-0,94	0,26	0,04	0,27	0,04	0,02	6,49	0,02	5,96	0,01	-0,53	1,08	-0,34
MA-BC-MT-0,1	83,05	0,01	82,18	0,04	-0,87	0,41	0,02	0,45	0,02	0,03	6,72	0,02	6,64	0,01	-0,08	0,88	-0,37
MA-BC-BS-1	81,69	0,06	83,03	0,04	1,33	0,46	0,02	0,59	0,01	0,14	8,16	0,06	8,19	0,03	0,03	1,34	-0,93
MA-BC-BS-2	83,42	0,02	82,34	0,04	-1,08	0,30	0,01	0,65	0,01	0,35	6,6	0,1	6,76	0,01	0,21	1,16	-2,84
MP-BC	67,30	0,02	67,63	0,02	0,33	0,38	0,03	0,15	0,02	-0,23	4,72	0,01	3,99	0,02	-0,73	0,83	2,40
MP-BC-MT-0,1	75,23	0,01	75,32	0,02	0,09	0,51	0,06	0,16	0,03	-0,35	5,4	0,5	4,64	0,04	-0,76	0,84	1,05
MP-BC-MT-0,3	72,71	0,01	73,58	0,02	0,88	0,20	0,01	0,10	0,04	-0,10	4,4	0,7	2,96	0,02	-1,46	1,70	0,34
MP-BC-BS-1	71,00	0,03	71,05	0,06	0,05	0,31	0,06	0,18	0,04	-0,13	6,1	0,7	5,52	0,01	-0,60	0,62	3,47
MP-BC-BS-2	75,33	0,01	73,9	0,1	-1,45	0,18	0,02	0,15	0,04	-0,03	5,0	0,4	4,9	0,6	-0,05	1,45	0,68

La Figura 11.53. muestra el diagrama cromático CIELAB en el que se han representado los dos morteros, que más han variado sus coordenadas cromáticas tras el ensayo de envejecimiento en clima templado. En ambos casos, las coordenadas tienden hacia el amarillo-rojo. La coordenada L^* sufre un ligero descenso de sus valores oscureciéndose los morteros.

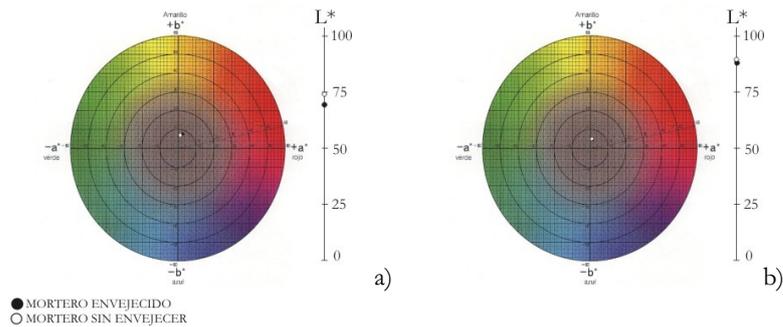


Figura 11.53. Diagrama cromático CIELAB. Comparación de la variación de las coordenadas cromáticas de los morteros compuestos antes y después de

someterlos a ensayo de envejecimiento simulando un clima templado. a) MP-TR-BS-1; b) MN-BC-ND-5.

En general, al comparar los resultados obtenidos en las Tablas 11.26-11.28, se observa que la adición del producto biocida en los morteros compuestos da lugar a valores de color total ligeramente más altos, especialmente en el clima tropical. Los morteros de cal-yeso y acrílicos con adición de biocida experimentan una disminución de la luminosidad proporcionando un aspecto más oscuro a la superficie, en cambio los morteros de poliéster se aclaran. Desde el punto de vista cromático los diferentes morteros compuestos elaborados con biocida experimentan un desplazamiento de color hacia el amarillo y hacia el rojo ligeramente más intenso que aquel que se observó en las experiencias de envejecimiento termohigrométrico de los morteros compuestos.

11.3.2.3. Envejecimiento acelerado por irradiación con luz Ultravioleta.

En tres probetas de cada uno de los diferentes morteros compuestos se efectuaron medidas colorimétricas antes y después de ser sometidas a ensayo de envejecimiento por luz ultravioleta, eligiendo como condiciones operativas el iluminante estándar CIE tipo D₆₅ (luz día, temperatura de color 6500° K) y el observador estándar 10°.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en el ensayo de envejecimiento acelerado por irradiación con luz ultravioleta se muestran en la Tabla 11.29. En general, se observa que la incorporación de biocidas en la matriz de los morteros altera su cromatismo en mayor medida que en los morteros preparados sin biocida.

De la comparación de variación del color total de los morteros compuestos elaborados con los diferentes biocidas se deduce que: la adición del biocida New Des en los morteros de cal-yeso con ácido bórico elaborados con Tosca de Rocafort, produce una variación de color total superior a la asociada al empleo del biocida Biotin N. En los morteros de cal-yeso con Mowilith SDM 5, es el empleo del biocida Biotin N el que produce una mayor variación de color total. En los morteros acrílicos, es el empleo del biocida Biotin S el que produce un

mayor aumento en la variación de color total y, en los morteros de poliéster lo es el biocida Metasol. Sin embargo, en los morteros cal-yeso elaborados con piedra Bateig, la variación de color total superior se produce al añadir New Des, Biotin N en sus derivados, mientras que el Metasol produce en los morteros acrílicos y de poliéster, las mayores variaciones de color total.

Las variaciones introducidas por la adición de los productos biocidas en los morteros compuestos de cal-yeso (MN) elaborados a partir de piedra Tosca de Rocafort, desde el punto de vista de la luminosidad, proporcionan al mortero compuesto un aspecto sensiblemente más oscuro. Sin embargo, en los morteros compuestos acrílicos (MA) y de poliéster (MP) elaborados con dicha roca, la adición del componente biocida aumenta la luminosidad proporcionando a la superficie del mortero un aspecto más claro.

En los morteros de cal-yeso y acrílicos elaborados con piedra Bateig, se observa una disminución en los valores de luminosidad lo cual se traduce en el aspecto ligeramente más oscuro de las probetas, si bien esta disminución de la luminosidad es muy baja. Asimismo, los morteros de poliéster elaborados con dicha piedra, exhiben valores de luminosidad significativos tras el envejecimiento, que se traducen en una mayor claridad de la superficie del mortero.

Desde el punto de vista cromático, la adición del componente biocida en los morteros compuestos elaborados con piedra Tosca de Rocafort y piedra Bateig se traduce en un desplazamiento del color hacia el amarillo y hacia el rojo.

Tabla 11.29. Variación de las coordenadas cromáticas L*, a*, b* y sus correspondientes desviaciones estándar, variación de color total (ΔE) y variación de tono Δh de los morteros compuestos estudiados con y sin biocidas sometidos a irradiación de luz ultravioleta.

Nombre	L*inicial	S	L*final	S	ΔL^*	a*inicial	S	a*final	S	Δa^*	b*inicial	S	b*final	S	Δb^*	ΔE	Δh
MN-TR	81,51	0,01	81,24	0,02	-0,28	3,12	0,01	3,25	0,02	0,13	10,27	0,02	11,38	0,02	1,11	1,15	0,97
MN-TR-ND-5	86,48	0,04	66,36	0,03	-20,12	1,75	0,01	0,85	0,02	-0,89	6,51	0,03	6,5	0,8	0,03	20,14	11,63
MN-TR-ND-10	88,69	0,03	88,72	0,01	0,03	1,22	0,04	0,32	0,01	-0,90	4,65	0,02	4,74	0,04	0,10	0,91	-6,19
MN-TR-BN-1	89,11	0,02	83,41	0,01	-5,70	1,43	0,02	0,21	0,01	-1,22	4,93	0,06	6,40	0,04	1,47	6,02	1,70
MN-TR-BN-2	88,75	0,01	88,19	0,04	-0,56	1,28	0,02	0,42	0,03	-0,86	3,5	0,1	4,85	0,03	1,38	1,71	14,38

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MN-TR-AB	81,51	0,01	80,12	0,02	-1,39	3,24	0,01	3,55	0,02	0,31	10,69	0,01	11,54	0,02	0,85	1,66	-0,23
MN-TR-AB-BN-1	89,02	0,03	92,12	0,03	3,10	1,27	0,01	0,15	0,04	-1,12	3,82	0,02	3,66	0,01	-0,17	3,30	3,70
MN-TR-AB-BN-2	90,22	0,02	90,08	0,06	-0,14	1,1	0,2	0,25	0,03	-0,85	3,45	0,02	4,94	0,04	1,49	1,73	12,70
MN-TR-AB-ND-5	91,28	0,06	88,92	0,01	-2,36	0,81	0,09	1,48	0,02	0,67	3,63	0,01	5,22	0,02	1,59	2,92	9,67
MN-TR-AB-ND-10	89,3	0,1	72,45	0,06	-16,89	0,99	0,04	0,33	0,01	-0,66	3,73	0,03	5,24	0,02	1,51	16,97	4,99
MN-TR-ADT	81,68	0,01	80,82	0,02	-0,87	3,01	0,01	3,17	0,03	0,16	10,11	0,01	11,03	0,02	0,91	1,27	0,53
MN-TR-ADT-ND-10	87,1	0,8	91,06	0,03	3,92	1,69	0,01	0,32	0,03	-1,36	5,96	0,02	4,06	0,03	-1,90	4,57	-0,07
MN-TR-ADT-ND-5	88,88	0,04	88,96	0,02	0,09	0,54	0,04	1,10	0,01	0,56	5,11	0,01	4,20	0,06	-0,92	1,08	-2,84
MN-TR-ADT-BN-2	88,6	0,4	71,28	0,01	-17,30	0,57	0,02	2,21	0,01	1,65	4,85	0,01	5,78	0,01	0,93	17,41	-8,28
MN-TR-ADT-BN-1	88,85	0,03	65,22	0,01	-23,63	0,96	0,02	0,93	0,04	-0,03	2,97	0,03	5,98	0,06	3,01	23,83	14,41
MA-TR	78,47	0,01	77,37	0,01	-1,10	2,29	0,01	2,59	0,03	0,29	9,03	0,02	10,46	0,02	1,43	1,83	0,37
MA-TR-BS-2	83,31	0,03	88,53	0,02	5,21	1,07	0,03	0,27	0,01	-0,81	5,79	0,01	4,47	0,04	-1,33	5,44	6,38
MA-TR-BS-1	82,69	0,01	88,34	0,01	5,65	1,17	0,02	0,36	0,01	-0,81	6,15	0,04	4,39	0,03	-1,76	5,97	7,43
MA-TR-MT-0,3	83,65	0,01	90,65	0,01	7,00	1,40	0,06	0,2	0,1	-1,20	7,23	0,02	3,58	0,02	-3,65	7,98	-4,14
MA-TR-MT-0,1	84,40	0,04	86,08	0,03	1,68	1,1	0,1	1,80	0,04	0,69	6,41	0,02	6,59	0,01	0,18	1,83	6,10
MP-TR	73,95	0,01	74,07	0,01	0,12	1,91	0,02	0,39	0,02	-1,52	6,87	0,02	5,74	0,02	-1,13	1,89	-1,76
MP-TR-BS-1	73,38	0,04	87,99	0,03	14,61	2,14	0,03	0,45	0,01	-1,69	5,9	0,5	4,43	0,01	-1,49	14,78	9,91
MP-TR-BS-2	66,42	0,03	63,44	0,02	-2,98	3,61	0,01	4,12	0,04	0,51	8,01	0,04	10	1	1,72	3,48	6,85
MP-TR-MT-0,1	73,19	0,02	66,99	0,01	-6,21	1,92	0,01	0,33	0,02	-1,58	7,38	0,04	6,38	0,09	-1,00	6,48	-8,37
MP-TR-MT-0,3	73,16	0,01	88,26	0,01	15,10	2,2	0,5	0,31	0,02	-1,85	6,07	0,03	4,70	0,03	-1,36	15,27	8,82
MN-BC	86,79	0,02	86,89	0,01	0,10	0,49	0,02	0,39	0,01	-0,10	5,31	0,03	5,79	0,01	0,48	0,50	1,43
MN-BC-ND-10	89,1	0,6	90,44	0,01	1,36	0,49	0,02	1,00	0,03	0,51	4,75	0,03	3,79	0,03	-0,97	1,75	1,34
MN-BC-ND-5	88,98	0,04	83,05	0,04	-5,92	0,48	0,01	1,12	0,02	0,64	4,58	0,06	5,90	0,02	1,32	6,10	4,64
MN-BC-BN-2	88,54	0,04	83,25	0,02	-5,29	0,46	0,01	1,30	0,06	0,83	5,00	0,01	7,36	0,01	2,36	5,85	2,42
MN-BC-BN-1	89,35	0,03	89,31	0,02	-0,04	0,50	0,03	1,3	0,1	0,77	4,57	0,06	5,38	0,01	0,81	1,12	2,36
MN-BC-AB	84,15	0,01	84,05	0,01	-0,10	0,48	0,02	0,38	0,01	-0,11	6,27	0,03	6,52	0,01	0,25	0,29	1,09
MN-BC-AB-BN-2	88,89	0,03	82,03	0,02	-6,86	0,28	0,04	0,43	0,01	0,16	5,98	0,02	7,45	0,02	1,47	7,02	-1,01
MN-BC-AB-BN-1	89,46	0,01	88,91	0,02	-0,56	0,42	0,03	0,25	0,04	-0,18	5,31	0,04	4,9	0,3	-0,46	0,74	10,25
MN-BC-AB-ND-10	91,95	0,01	88,81	0,01	-3,14	0,34	0,02	0,29	0,02	-0,05	3,89	0,02	4,66	0,01	0,77	3,24	2,59
MN-BC-AB-ND-5	90,93	0,04	88,34	0,03	-2,59	0,29	0,01	1,21	0,02	0,92	3,78	0,02	3,85	0,03	0,07	2,75	2,65
MN-BC-ADT	86,50	0,01	85,99	0,01	-0,51	0,49	0,03	0,41	0,01	-0,08	5,86	0,03	6,22	0,02	0,36	0,63	1,01
MN-BC-ADT-BN-1	90,14	0,01	87,36	0,03	-2,78	0,43	0,03	0,98	0,03	0,55	5,0	0,5	2,97	0,02	-2,07	3,52	3,41
MN-BC-ADT-BN-2	89	1	90,10	0,02	0,78	0,49	0,06	0,83	0,02	0,34	4,66	0,04	3,22	0,02	-1,45	1,68	11,59
MN-BC-ADT-ND-10	89,56	0,09	82,37	0,06	-7,19	0,4	0,3	1,15	0,01	0,80	4,70	0,03	6,57	0,01	1,88	7,47	-0,39
MN-BC-ADT-ND-5	89,22	0,04	88,7	0,1	-0,55	0,34	0,06	0,35	0,01	0,01	4,91	0,03	4,82	0,03	-0,08	0,55	10,38
MA-BC	80,27	0,01	79,90	0,02	-0,37	0,55	0,01	0,49	0,01	-0,07	6,28	0,02	6,80	0,02	0,52	0,64	0,93

MA-BC-BS-1	84,39	0,04	83,16	0,01	-1,23	0,30	0,02	0,19	0,03	-0,11	6,33	0,03	6,41	0,04	0,08	1,24	-0,26
MA-BC-BS-2	82,88	0,03	83,58	0,04	0,70	0,47	0,01	1,06	0,01	0,59	7,12	0,02	6,53	0,03	-0,59	1,09	1,92
MA-BC-MT-0,1	81,89	0,02	71,85	0,02	-10,05	0,55	0,01	1,94	0,01	1,39	6,77	0,06	6,13	0,02	-0,64	10,16	-4,59
MA-BC-MT-0,3	83,58	0,01	70,41	0,02	-13,16	0,34	0,03	1,86	0,04	1,51	6,1	0,1	6,95	0,01	0,89	13,28	10,05
MP-BC	75,22	0,01	70,77	0,01	-4,44	0,09	0,03	2,23	0,01	2,13	4,54	0,02	7,15	0,01	2,62	5,58	-2,79
MP-BC-BS-1	68,49	0,02	81,11	0,03	12,62	0,4	0,1	0,18	0,04	-0,20	6,11	0,01	6,97	0,03	0,86	12,65	0,48
MP-BC-BS-2	69,16	0,01	89,18	0,02	20,02	0,55	0,07	0,84	0,03	0,30	5,31	0,04	3,30	0,01	-2,01	20,12	-1,55
MP-BC-MT-0,1	69,49	0,01	89,02	0,06	19,53	0,7	0,2	0,13	0,02	-0,60	6,10	0,02	5,55	0,01	-0,55	19,55	-8,50
MP-BC-MT-0,3	73,96	0,03	89,3	0,1	15,38	0,33	0,04	0,95	0,01	0,61	5,51	0,02	3,51	0,04	-2,00	15,52	14,85

La Figura 11.54. muestra el diagrama cromático CIELAB en el que se han representado los dos morteros que más han variado sus coordenadas cromáticas tras el ensayo de irradiación con luz ultravioleta. En ambos morteros MN-TR-ADT-BN-1 y MP-BC-BS-2, las coordenadas tienden hacia el amarillo, mientras que la coordenada L^* sufre, en el primer caso, un notable descenso de sus valores oscureciéndose los morteros y, en el segundo caso, un incremento de los valores, aclarándose éstos.

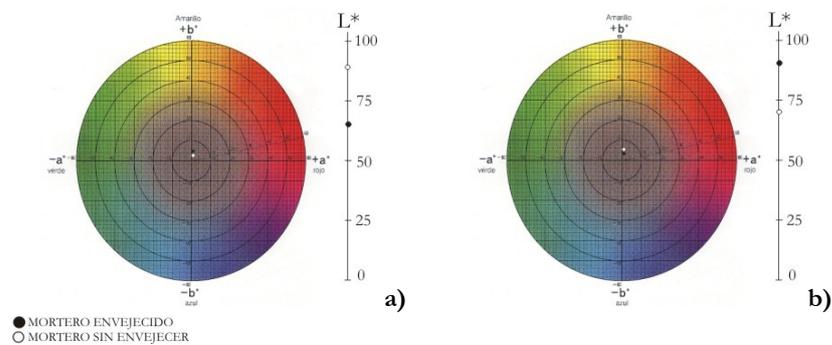


Figura 11.54. Diagrama cromático CIELAB. Comparación de la variación de las coordenadas cromáticas de los morteros compuestos antes y después de someterlos a ensayo de envejecimiento acelerado por irradiación con luz ultravioleta. a) MN-TR-ADT-BN-1; b) MP-BC-BS-2.

11.3.3 ESTABILIDAD FRENTE A AGENTES DE DETERIORO MICROBIOLÓGICOS.

11.3.3.1. Introducción.

Desde la Antigüedad hasta nuestros días, se ha hecho referencia a los fenómenos relacionados con el biodeterioro, en la medida en que transforman de manera irreversible el aspecto y superficie de los monumentos y obras de arte (Paine et al., 1933; Pochon y Jaton, 1968; Stzellezyk, 1981; Caneva y Salvadori, 1989; Griffin et al., 1991; May et al., 1993; Bock y Sand, 1993; Ortega Calvo et al., 1993; Urzi y Krumbein, 1994; Koestler et al., 1997).

Con el avance de la ciencia, a partir de la década de 1950, el estudio del biodeterioro de obras de arte se acrecienta debido a la creciente preocupación por la preservación del Patrimonio Cultural (Keller y Frederickson, 1952; Webley et al., 1963; Fusey y Hyvert, 1964 y 1966; Hueck-van der Plas, 1965 y 1968; Pochon y Jaton, 1967; Winkler, 1975). Son muchos los estudios publicados desde entonces que demuestran el interés suscitado por este tema (Ciarallo et al., 1985; Koestler et al., 1985; Giacobini et al., 1986; Tiano, 1986, 1987; Caneva y Altieri, 1988; Caneva y Salvadori, 1988; Griffin et al., 1991; Warscheid et al., 1992; Jain et al., 1993; May et al., 1993; Caneva et al., 1994; Mishra et al., 1995; Saiz-Jiménez, 1999; Zanardini et al. 2000).

Últimamente, se han publicado trabajos muy específicos, en cuanto al biodeterioro de monumentos pétreos, destacando los estudios sobre la acción de las microalgas (Giaccone et al., 1976; Richardson, 1976; Tomaselli et al., 1979; Danin, 1983; Tiano, 1987; Atlas et al., 1988, Bolívar Galiano, 1994; Bolívar y Sánchez-Castillo, 1997); sobre la actividad bacteriana (Groth y Saiz-Jimenez, 1999; Petushkova y Kandyba, 1999; Urzi y Leo, 2001; Gorbushina et al., 2002); sobre la acción de los líquenes (Gehrmann et al., 1989; García Rowe y Saiz Jiménez, 1991; Wendler y Prasartset, 1999); y sobre el biodeterioro por hongos y actinomicetos (de la Torre et al., 1991; Urzi y Krumbein, 1994; Wollenien et al., 1995 ; Burford et al.; 2003).

El interés por controlar y prevenir la colonización microbiana sobre elementos escultóricos se desarrolla a través del empleo de diversos biocidas, permeabilizadores e inhibidores de procesos metabólicos (Alakomi et al., 2004). Son numerosos los estudios sobre

biodeterioro empleando productos biocidas (Warscheid et al, 1989; Takamura et al., 1990; Santoro y Koestler, 1991; Nugari et al., 1993; Hirsch et al, 1995; Bolívar y Sánchez Castillo, 1996; Koestler, 2000, Blázquez, 2003), sin embargo, los resultados obtenidos no son satisfactorios debido a la formación en superficie de biofilms que, dificultan la penetración y, por tanto, la efectividad de estos productos biocidas (Krumbein et al., 1993, Tiano et al., 1993; Morton et al., 1998; May, 2003).

Finalmente, son pocos los estudios específicos en cuanto al empleo de biocidas incorporados a la matriz del mortero (CSIC NM008, 2004; Petermann et al., 2005, Portero et al., 2006). Sin embargo, estos primeros resultados son esperanzadores ya que los procedimientos propuestos consiguen un nivel satisfactorio de inhibición de la aparición de hongos, algas y demás microorganismos.

11.3.3.2. Antecedentes.

La alteración biológica es considerada hoy en día, uno de los aspectos a tener presente a la hora de intervenir un monumento artístico, por su carácter irreversible, en la mayoría de los casos. Su acción de deterioro es pausada pero implacable, llegando incluso a la ruina del propio monumento. Por este motivo, algunos autores sugieren que la mejor manera de garantizar la prevención del deterioro biológico (además del originado por factores físicos o químicos) es el control de las condiciones ambientales en que se encuentran las obras de arte.

En el desarrollo de esta tesis, se consideró muy interesante, incorporar a los morteros diversos biocidas que aumentaran su resistencia frente a posibles colonizaciones microbianas. De esta manera surgió la actual línea de investigación que constituye la continuación de una serie de trabajos realizados anteriormente, sobre el estudio de la eficacia de los biocidas incorporados a la matriz del mortero.

Los dos trabajos previos referidos (Petermann et al., 2005 y Portero 2006) que consistieron en una serie de estudios sobre la eficacia de los biocidas New Des y Biotín N incorporados en piedra artificial compuesta por un agregado de piedra natural y resina acrílica comercial atendiendo al crecimiento de algas, fueron realizados en condiciones ambientales simuladas proclives al biodeterioro. Ambos experimentos se

realizaron en el interior de una cámara LIEBHERR Profi Line manteniendo unas condiciones ambientales propicias para la colonización biológica de algas. Los parámetros aplicados fueron: iluminación semejante a la luz del día, con un fotoperíodo de 12 horas, temperatura constante entre 18°C y 20°C, y una humedad relativa del 60%, aproximadamente. Las probetas fueron sumergidas, para la realización del cultivo, en agua mineral, encontrándose ésta en constante oxigenación a través de conductos de aire conectados a un compresor Tetratec® y Rena Air 200 a 3 W. (Figura 11.55.a-b). El experimento consistió, para ambos estudios, en la extracción de las muestras en tres momentos diferentes (primera semana, cuarta semana, séptima semana) para ser examinada su colonización. En el primero de los estudios previos se llevó a cabo una inoculación de las muestras por separado con tres comunidades de algas (algas azules o cianobacterias, algas verdes y diatomeas) y, en el segundo estudio previo se determinaron los valores medios de colonización de las tres comunidades de microorganismos inoculadas simultáneamente (algas azules o cianobacterias, algas verdes y diatomeas), consiguiendo simular una situación más realista. La elección de estos microorganismos se llevó a cabo a partir de la identificación de colonias algales procedentes de la escultura existente en el centro de una fuente del Jardín de la Concepción en Málaga (Figura 11.56.), jardín tropical, datado sobre 1850 y, declarado Bien de Interés Cultural (1943) en la categoría de jardín histórico-artístico.



a)



b)

Figura 11.55.(a-b). Dispositivo con las probetas y los cultivos de algas. Oxigenación de los recipientes mediante tubos de aire comprimido.



Figura 11.56. Detalle de la fuente del Jardín de la Concepción de Málaga, declarado Bien de Interés Cultural. Toma de muestras de algas.

Las Figuras 11.57-60. muestran las diferentes especies de algas identificadas a lo largo de los dos ensayos desarrollados.

Tras la realización de estos estudios previos, las conclusiones extraídas fueron (estudio con el biocida New Des):

-La piedra Tosca de Rocafort es menos propensa a la colonización por algas que la piedra Bateig Crema. La adición de biocida previene la colonización biótica. La concentración del biocida New Des al 5% presenta mayor efectividad. Las algas verde-azuladas son las especies más resistentes.

-La colonización es menor cuanto menor sea el tamaño de partícula de las probetas.

-La proporción árido/conglomerante no desempeña un papel significativo en el crecimiento de algas, pero si es determinante del aspecto visual y resistencia mecánica.

Por otro lado, las conclusiones a las que llegamos en el segundo estudio previo, con el biocida Biotin N, fueron:

-El mortero acrílico Bateig Crema, con una proporción igual de árido que de conglomerante y con el aditivo biocida Biotin N, es el que mejores resultados exhibe, evitando el biodeterioro.

-La piedra de Bateig Crema es menos propensa a la colonización por algas que la piedra Tosca de Rocafort. La adición de biocida previene

la colonización biótica, sin embargo, la mayor o menor cantidad de éste en el mortero no es determinante.

-En cuanto al tamaño de la partícula (granulometría) y la proporción árido-conglomerante (bicomponente, resina líquida y carga), se podría afirmar que, la colonización será menor cuanto menor es el tamaño de partícula y, a igual proporción árido-conglomerante.

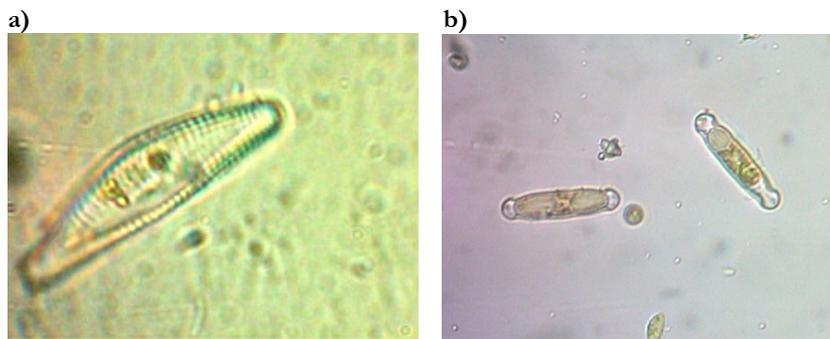


Figura 11.57. Ejemplos de microorganismos bióticos indexados: Diatomeas. (a) *Cymbella*, (b) *Navicula*.

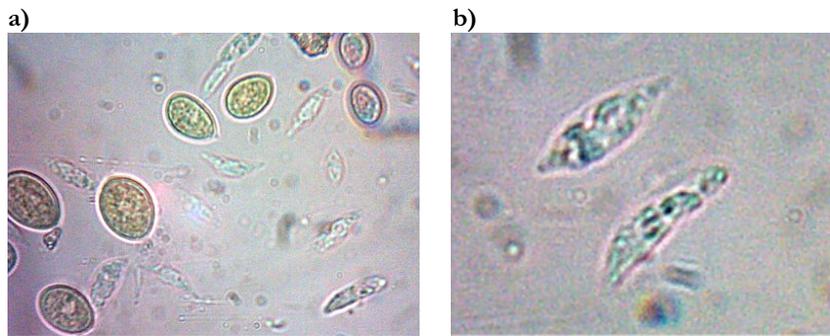


Figura 11.58. Ejemplos de microorganismos bióticos indexados: Algas verdes. (a) *Chlorococcum*, (b) *Scenedesmus*.



Figura 11.59. Ejemplo de microorganismo biótico indexado: Alga azul, género *Aphanotece* gelatinoso.



Figura 11.60. Ejemplo de microorganismo biótico indexado: Alga verde, género *Ulothrix* (filamentoso sin vaina).

11.3.3.3. Procedimiento metodológico.

En este apartado y, a partir de los resultados obtenidos en los estudios previos, se considera el comportamiento de los diferentes morteros experimentales ante la colonización por microorganismos, con la finalidad de conocer la viabilidad de su aplicación en el campo de la conservación y restauración del patrimonio escultórico-ornamental.

El experimento llevado a cabo en esta Tesis Doctoral se ha dirigido a la determinación de la eficacia de cuatro tipos de biocida (Tabla 10.22.d) incorporados en las series de morteros experimentados los cuales, como se resume en la Tabla 11.30, poseen diferentes características biocidas. A diferencia de los dos estudios previos antes mencionados en los que se simulaba las condiciones de biodeterioro de forma artificial, en este caso, el experimento se planteó como un biodeterioro en un ambiente natural. Las probetas (2x1x0,5 cm) se emplazaron en la base de la escultura “Alcudia” (1996), del artista Miguel Ortiz Berrocal, situada en el Campus de la Universidad Politécnica de Valencia (Figura 11.61.a-b y 11.62.a-b). La elección de dicho

emplazamiento se llevó a cabo considerando que la escultura se encuentra a la intemperie, está circunscrita en una alberca, recibe una irrigación con agua diariamente a través de un sistema de riego por aspersión y se encuentra próxima al mar. Por tanto, las probetas se encuentran en constante contacto con agua y humedad.

Tabla 11.30. Biocidas empleados en los morteros experimentados (Blázquez, 2003).

PRODUCTO-ADITIVO	ACTIVIDAD
New Des	Bactericida/fungicida
Biotin N	Fungicida/Algicida/Bactericida
Biotin S	Bactericida/Algicida/Fungicida
Metasol TK 100 SG	Fungicida



a)



b)

Figura 11.61. Escultura “Alcudia” (1996) del artista Berrocal. Ubicación de las probetas de morteros compuestos. Riego por aspersión. Campus de Vera. Universidad Politécnica de Valencia.



a)



b)

Figura 11.62 Probetas durante el ensayo. Detalle de las probetas preparadas en varios grupos para sus tres extracciones consecutivas.

Las condiciones ambientales (temperaturas medias, humedades relativas, y precipitaciones), durante el tiempo que las probetas de morteros han estado expuestas al exterior, se reproducen en la siguiente gráfica (Datos registrados por el Centro de Meteorológico Territorial de Valencia) (Figura 11.63.).

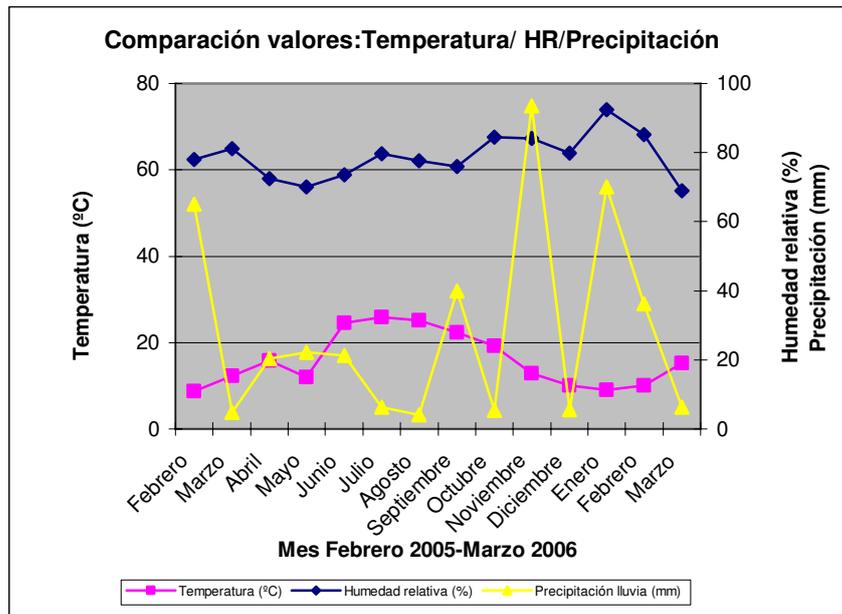


Figura 11.63. Gráfico resumen de los valores de temperatura, humedad relativa, y precipitaciones.

Resultados y discusión

Los resultados presentados han sido obtenidos tras tres meses (primera extracción), cinco meses (segunda extracción) y seis meses (tercera extracción) de exposición de las probetas con el fin de poder comparar la evolución del proceso de colonización.

El crecimiento biológico en la superficie de las probetas se estima mediante un índice de colonización que nos refiere a un rango

porcentual de recubrimiento superficial. De esta forma podemos semicuantificar la biomasa algal que va colonizando los distintos sustratos que a su vez han sido elaborados con distintos productos biocidas. El índice de colonización toma los valores siguientes:

- (-) = sin colonización;
- (+) = 0-1%;
- (++) = 2-10%;
- (+++)= 11-50%;
- (++++)= 51-75%;
- (+++++)= 76-100%.

Cabe señalar, en primer lugar que, la colonización biológica de las muestras, durante los seis meses que ha durado el experimento ha sido muy baja. Tan solo se pueden apreciar en algunas probetas manchas microscópicas de color verdoso, presuntamente algas, si bien, ha sido imposible determinar las especies que pudieran estar presentes (Figura 11.64-66).



Figura 11.64. Imagen obtenida con microscopio óptico (80X) de la superficie del mortero cal-yeso Bateig Crema con el aditivo Mowilith SDM 5 tras tres meses de exposición. Presencia de microorganismos. (primera extracción).



Figura 11.65. Imagen obtenida con microscopio óptico (80X) de la superficie del mortero poliéster Tosca de Rocafort tras tres meses de exposición. Presencia de microorganismos (primera extracción).



Figura 11.66. Imagen obtenida con microscopio óptico (80X) de la superficie del mortero cal-yeso Bateig Crema tras tres meses de exposición. Presencia de microorganismos (1ª extracción).

Atendiendo a la presencia y proporción de biocida incorporado en las probetas, se observa claramente como existe una mayor proporción de probetas con presencia biológica en el grupo que no contiene biocida (Tabla 11.31).

Se observa que en las probetas realizadas con mortero cal-yeso, aparece colonización en menor proporción. Los morteros acrílico y de poliéster, son más propensos a la colonización biológica (Tabla 11.31).

Tabla 11.31. Índice de colonización en función del tipo de mortero compuesto experimentado.

Mortero	Piedra	Aditivo	Biocida	1ª Extr.	2ª Extr.	3ª Extr.
MN	BC	ADT	Biotin N 1%	+	+	-
MN	BC	AB	New Des 10%	-	-	-
MN	BC	AB	New Des 5%	-	-	-
MN	BC		New Des 10%	-	-	-
MN	BC		Biotin N 2%	-	-	-
MN	TR		New Des 5%	-	-	-
MN	BC	ADT	New Des 10%	-	-	-
MN	BC		New Des 5%	+	+	-
MN	TR		Biotin N 1%	-	-	-
MN	BC		Biotin N 1%	-	-	+
MN	TR	AB	Biotin N 1%	-	-	-
MN	TR	ADT	New Des 10%	-	-	-
MN	TR	AB	Biotin N 2%	-	-	-
MN	BC	ADT	Biotin N 2%	+	+	-
MN	TR		New Des 10%	-	-	-
MN	TR	ADT	New Des 5%	+	+	-
MN	TR	AB	New Des 5%	-	-	-

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

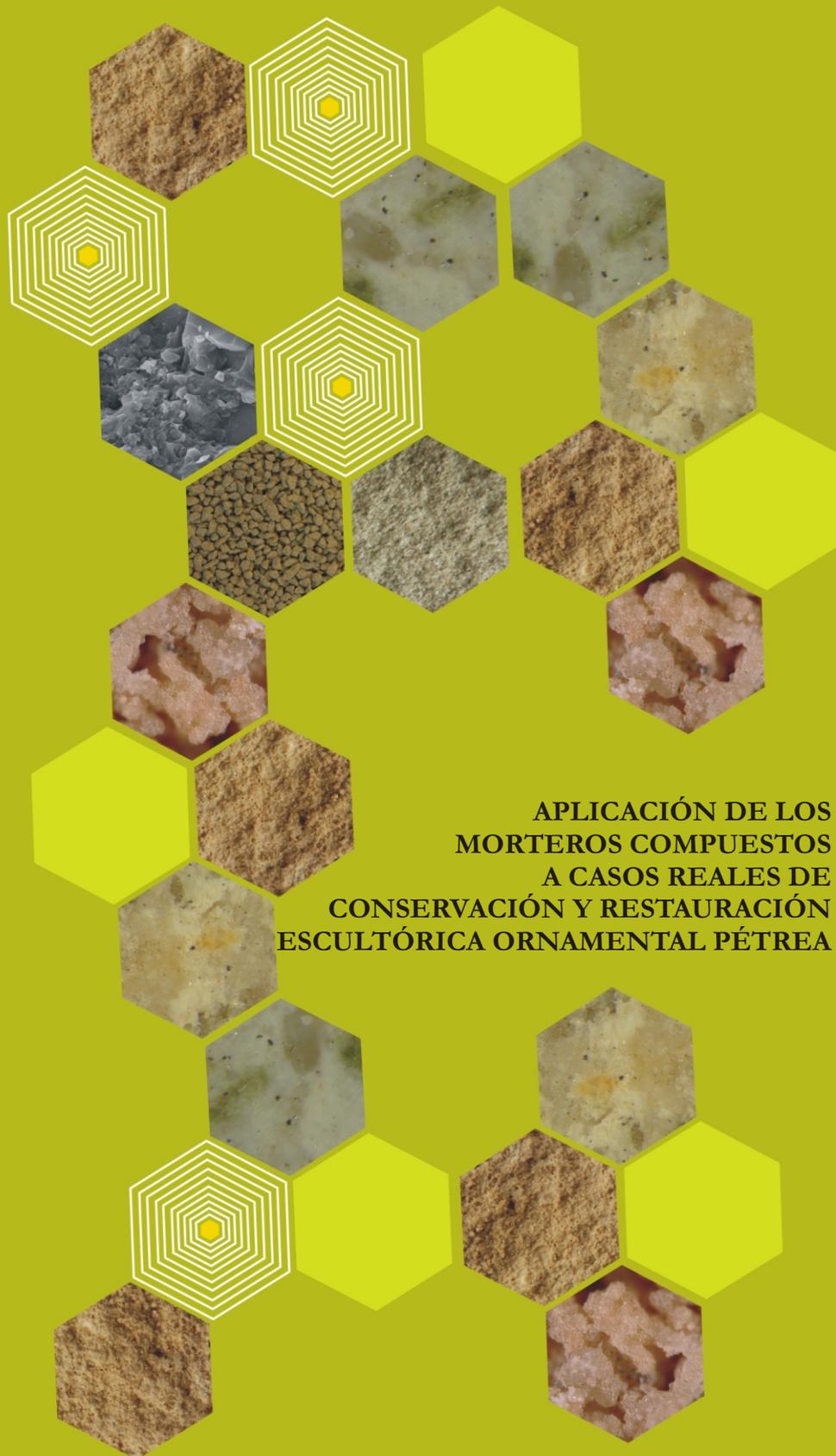
MN	TR		Biotin N 2%	-	-	-
MN	BC	ADT	New Des 5%	+	-	-
MN	BC	AB	Biotin N 2%	-	-	-
MN	TR	ADT	Biotin N 2%	+	+	-
MN	TR	ADT	Biotin N 1%	-	-	-
MN	BC	AB	Biotin N 1%	+	+	+
MN	TR	AB	New Des 10%	-	-	-
MN	BC			+	-	+
MN	BC	ADT		+	+	+
MN	BC	AB		+	-	-
MN	TR			-	-	-
MN	TR	ADT		+	-	-
MN	TR	AB		+	-	-
MA	BC		Metasol 0,3%	+	-	+
MA	BC		Biotin S 1%	+	-	+
MA	TR		Biotin S 2%	-	-	-
MA	TR		Biotin S 1%	-	-	-
MA	TR		Metasol 0,3%	-	+	-
MA	TR		Metasol 0,1%	-	-	-
MA	BC		Metasol 0,1%	+	+	-
MA	BC		Biotin S 2%	+	-	+
MA	BC			+	+	-
MA	TR			-	-	-
MP	BC		Biotin S 1%	-	-	+
MP	BC		Metasol 0,1%	-	+	+
MP	TR		Metasol 0,1%	-	-	-
MP	BC		Metasol 0,3%	+	+	+
MP	TR		Biotin S 2%	-	-	-
MP	TR		Biotin S 1%	-	-	-
MP	BC		Biotin S 2%	+	+	-
MP	TR		Metasol 0,3%	-	-	-
MP	TR			+	-	+
MP	BC			-	-	+

Si se atiende a la piedra natural que compone las muestras, se observa una presencia de colonias de microorganismos considerablemente mayor en las probetas realizadas con piedra Bateig Crema. Esto demostraría una mayor resistencia al crecimiento biológico de la piedra Tosca de Rocafort.

En cuanto a la presencia de colonización biológica es ligeramente mayor en las probetas que tienen menor proporción de biocida, independientemente del tipo de conglomerante y material pétreo empleado (Tabla 11.31).

Al escaso crecimiento de microorganismos producido en la experiencia llevada a cabo se le podrían atribuir dos causas. En primer lugar, y comparándolo con los dos trabajos previos realizados referidos (Petermann et al., 2005 y Portero 2006), hay que señalar que a diferencia de los anteriores, realizados en una cámara que crea las condiciones ambientales más propicias para el desarrollo de las especies biológicas, el experimento actual se ha realizado en condiciones ambientales reales, que no tienen por qué ser las más propicias, influyendo posiblemente de forma negativa el período estacional en que se llevó a cabo (otoño e invierno). En segundo lugar, el agua que ha estado mojando las probetas a diario, ha sido tratada químicamente para su potabilización (Cl^- 139 mg/l, NO_3^- 100 mg/l, Ca^{2+} 127 mg/l, SO_4^{2-} 159 mg/l, Mg^{2+} 100 mg/l) lo que posiblemente haya influido de forma negativa en el desarrollo de especies biológicas.

Se podría afirmar que el mortero cal-yeso con el árido de piedra Tosca de Rocafort, con biocida incorporado, sería la más resistente ante la colonización biológica.



**APLICACIÓN DE LOS
MORTEROS COMPUESTOS
A CASOS REALES DE
CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN
ESCULTÓRICA ORNAMENTAL PÉTREA**

12. APLICACIÓN DE LOS MORTEROS COMPUESTOS A CASOS REALES DE CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN ESCULTÓRICA-ORNAMENTAL PÉTREA.

12.1. Introducción.

En este apartado se describen las experiencias llevadas a cabo con el empleo de los morteros compuestos ensayados en esta Tesis Doctoral en intervenciones de sellados, reposiciones y obtención de réplicas sobre obra real. Los dos casos considerados corresponden a la realización de la réplica de la Creu de Terme ubicada en el actual cementerio de la localidad de la Pobla LLarga (Figura 12.1.) y, la obtención de la prótesis y/o reposición de la mano derecha de la escultura de San Vicente Mártir, ubicada en la cripta arqueológica de la cárcel que lleva su nombre en Valencia (Figura 12.2).

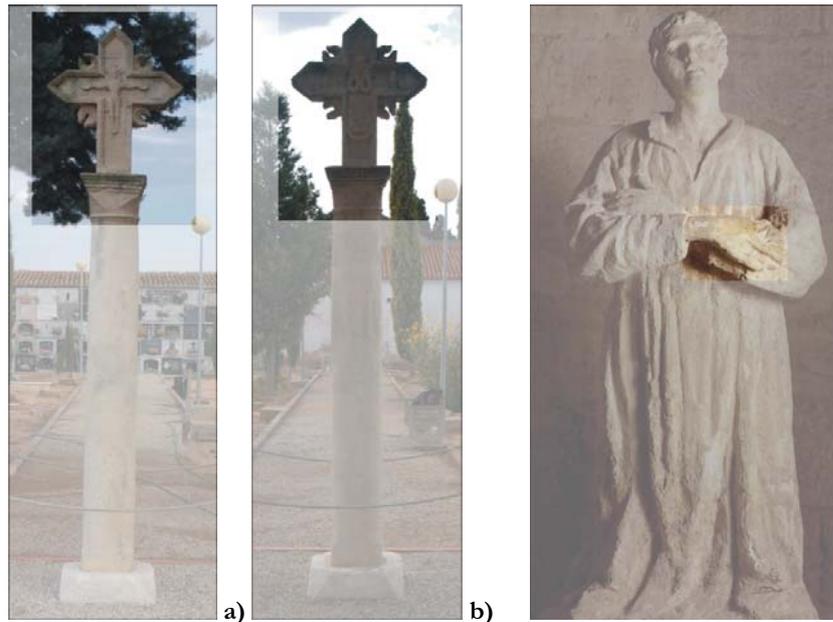


Figura 12.1.(a-b). Detalle, anverso y reverso de la Creu de Terme.

Figura 12.2. Escultura de San Vicente Mártir (Foto tomada de Català, 1998).

12.2. Aplicación in situ. Los sellados.

La intervención de sellados, como ya se comentó en el apartado 8.2.1., es una tarea de relleno y nivelación de las zonas con pérdida de material, de manera que se reduzca la deposición de partículas perjudiciales así como la penetración y circulación de agua hacia el interior de la estructura pétreo con el consiguiente deterioro que ello conlleva.

En este caso se describe la intervención de sellado efectuada in situ en el conjunto procedente de la Pobla LLarga después de la fase de intervención que supuso el anclaje de la réplica de la cruz y la columna. La finalidad del sellado es conseguir la uniformidad visual de la superficie pétreo y, anular la penetración de posibles contaminantes (Figura 12.3.a).

El método consistió en el modelado directo de la zona hueca resultante de la unión irregular de la columna y la cruz. Se empleó el mortero de cal-yeso con árido Bateig Crema y con Mowilith SDM 5 (MN-BC-ADT) por sus características adherentes, porosidad similar al original y resistencia a los agentes atmosféricos. La aplicación se efectuó en una sola operación dejando ligeramente recrecido el nivel de relleno para la posterior manipulación de acabado con gradina y papel abrasivo corindón. Finalmente se aplicó una patinatura de acabado (ver apartado 8.2.1.) (Figura 12.3.b).



Figura 12.3. Intervención de sellado. a) Antes y b) después. Uniformidad visual.

12.3. Aplicación por medio de prótesis. La reposición.

Como ya se indicó en el apartado 8.2.2., la reposición es la técnica de reproducción de fragmentos, cuyo tamaño y forma, ofrece cierta dificultad. En este caso, el fragmento faltante se modela, generalmente con plastilina o arcilla, se realiza el molde y, posteriormente, se vierte el mortero. Finalmente, la prótesis se encola a la zona de fractura mediante pernos de anclaje.

12.3.1. Descripción de la obra.-

Según Catalá (1998), la escultura de San Vicente Mártir “es una figura orante labrada en piedra toba caliza de autor anónimo datada alrededor de 1800-1876. De estilizado canon figurativo, su apariencia arcaizante, acaso buscada de propósito, obedece, en tal caso, a procurarle cierto efectismo teatral evanescente, en recurso impropio de convencional imagen de culto, más no para lograr la recreación - impregnada de cierto pathos- , en el propio recinto que tuvo lugar la dramática escena, del supremo acto en que el diácono Vicente, sentenciado a horrendo martirio por confesar heroicamente su fe, se dispone a ofrecer su vida en holocausto” (Archivo S.I.A.M.).

12.3.2. Estado de conservación.-

El estado de conservación que presenta la obra (Figura 12.4.) evidencia los fortuitos avatares sufridos a lo largo de su existencia histórica y material. La obra se encuentra recubierta con una capa de yeso de espesor variable, con una acusada acumulación de suciedad superficial (polvo,...), pérdida de volumetría debido a golpes, abundantes manchas de morteros de cemento y yeso, así como, una antiestética reconstrucción volumétrica correspondiente a la mano derecha del Santo, procedente de una intervención anterior (Archivo S.I.A.M., 1970).

La escultura en cuestión, desde el punto de vista petrológico, está labrada con una caliza travertínica, muy porosa, con abundantes restos fósiles.

12.3.3. Proceso de intervención.-

El objetivo de actuación se centra en la obtención de una prótesis, a partir de los morteros estudiados, acorde a la estética del conjunto.

Dos son los métodos que se desarrollan para la obtención de reposiciones a partir de la puesta a punto del modelado y molde, el método de colada y/o el método de estratificado. La elección de uno u otro, estará en función del tamaño, forma y peso de la reposición. En este caso concreto, la intervención se centraba en la reposición de una pieza de tamaño relativamente pequeño: la mano derecha del Santo. El método empleado fue la técnica de colada.

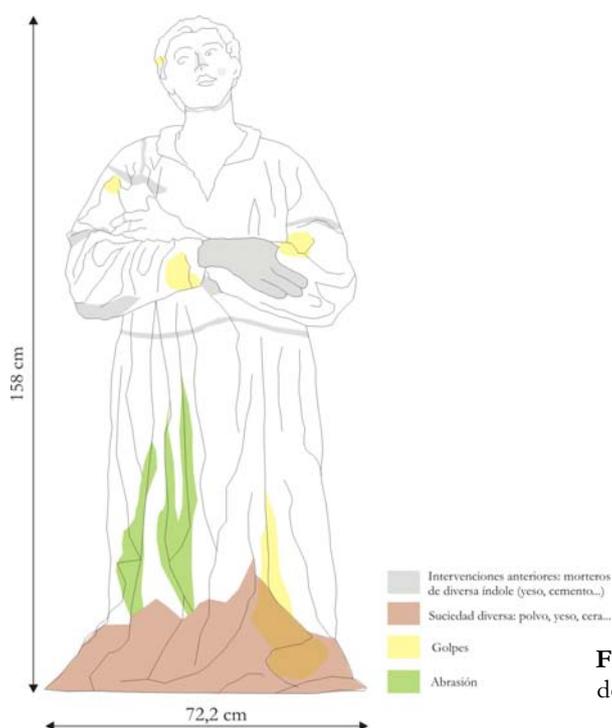


Figura 12.4. Cartografía de patologías. Estado de conservación.

La metodología de obtención de la reposición o prótesis se inicia con el modelado en plastilina del faltante (Figura 12.4.) siguiendo la estética del conjunto. Posteriormente, se plasma en superficie la textura de la piedra original Tosca de Rocafort (Figura 12.5). A continuación, se realiza el molde por el procedimiento de estratificado (ver apartado 8.2.3.2.2) (Figura 12.6.). Obtenido el molde (Figura 12.7.), se prepara la mezcla del mortero acrílico con el material pétreo Tosca de Rocafort (MA-TR) (ver apartado 10.4.1.4.) y se vierte en el interior del molde. Una

vez endurecido se desmoldea y se trata la superficie con papel abrasivo obteniendo una textura similar al material pétreo original (Figura 12.8). Finalmente, a la prótesis se le incorporan dos pernos de anclaje de fibra de vidrio que la ajustarán a la pieza original (Figura 12.9).



Figura 12.4. Modelado en plastilina del faltantes.

Figura 12.5. Aplicación de la textura travertínica.

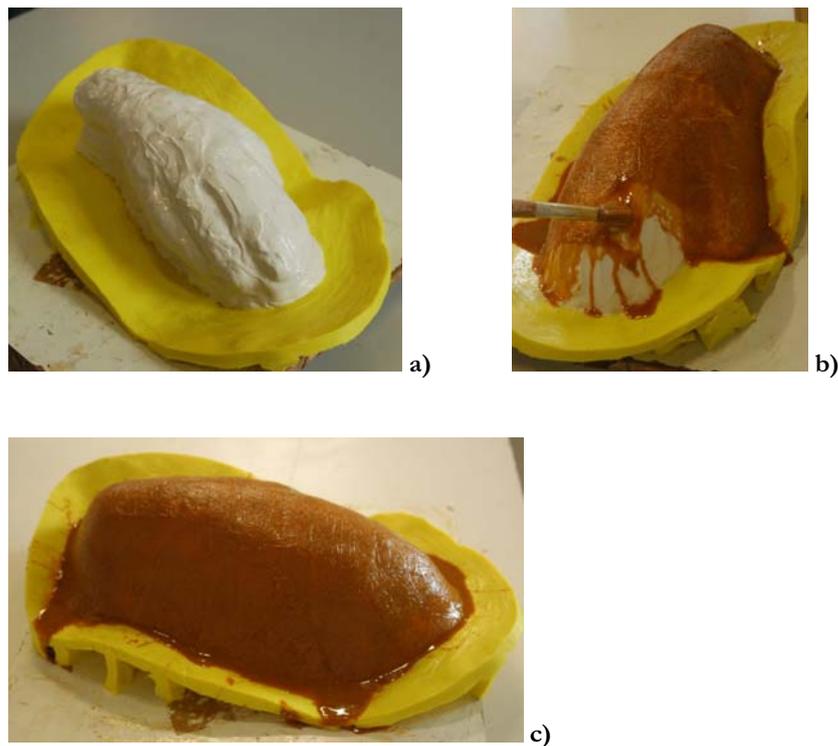


Figura 12.6.(a-c). Realización del molde de silicona (a) y contramolde rígido de poliéster (b-c).



Figura 12.7. Molde finalizado. Impronta fiel al original.



Figura 12.8. Prótesis obtenida tras el desmoldeo.

Figura 12.9. Prótesis con pernos de sostén de fibra de vidrio que la ajustarán a la pieza original.



12.4. Aplicación total. La réplica.

En este apartado la obra a intervenir se encuentra directamente expuesta a la intemperie frente a los agentes naturales causantes del deterioro. En este caso se precisa la realización de una réplica total que conserve el original en condiciones de temperatura y humedad controladas.

12.4.1. Descripción de la obra.-

El Peiró está formado por la columna, capitel y cruz y, mide aproximadamente, 340 cm de altura.

12.4.2. Estado de conservación.-

El estado de conservación de la cruz muestra como los agentes atmosféricos suponen un grave peligro para la preservación de las obras de arte a la intemperie. Presenta una fuerte abrasión de la superficie debido a las continuas oscilaciones de temperatura, humedad y precipitaciones que sufre la pieza en el exterior. También, el fuerte ataque biológico indica la presencia constante de humedad, así como de fauna aviar (estorninos, gorriones, etc.) que alteran notablemente la estructura y estética de la pieza (Figura 12.10.).

El material pétreo se trata de una biocalcarenita con abundantes fósiles y, color crema debido a la cantidad de óxidos de hierro presentes en la roca.

12.4.3. Proceso de intervención.-

El objetivo de la intervención se centra en obtener una réplica del original, sin que ello suponga un falso histórico, permitiendo trasladar el original a un espacio controlado.

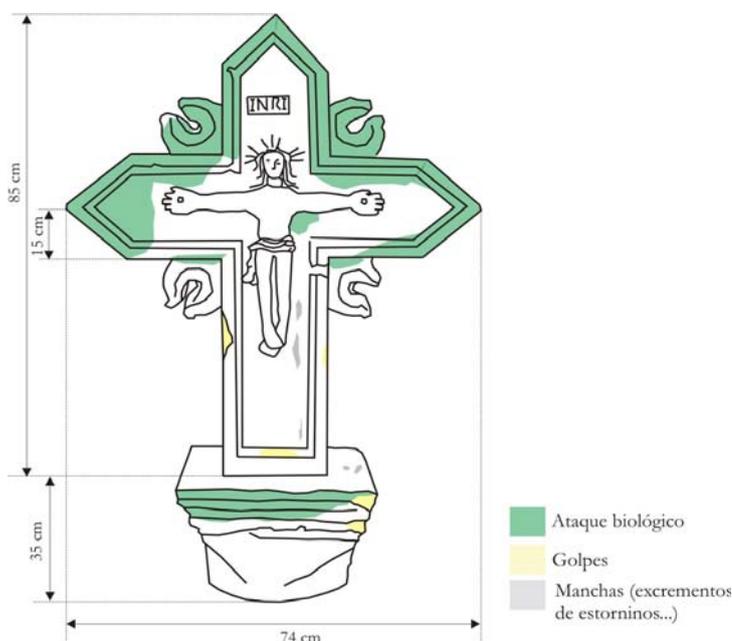


Figura 12.10. Cartografía de patologías. Estado de conservación.

Dos son también, los métodos que se pueden desarrollar para la obtención de réplicas a partir de la puesta a punto del molde: el método de colada y/o el método de estratificado. La elección de uno u otro, estará en función del tamaño, forma y peso de la réplica. En este caso concreto, la intervención se centraba en la réplica de una pieza de dimensiones relativamente grandes (Figura 12.10). El método de estratificado fue el más idóneo, ya que garantizaba una impronta fiel y sin ninguna tensión que afectase a la estabilidad de los morteros y el aspecto formal de la reproducción.

La metodología de intervención se inició con el desmontaje de la cruz ubicándola en un espacio controlado de humedad y temperatura. En este espacio se realiza un exhaustivo estudio de la pieza y se prepara la superficie para la elaboración del molde. En esta pieza, en particular, por ser un material poroso, se empleó como desmoldeante un film "PARAFILM M®" que, por medio del calor manual se adhiere a la superficie del original sin que ello afecte su superficie (Producto

“PARAFILM M®”, suministrado por los laboratorios Pechiney Plastic Packaging, Chicago, Il 60631) (Mas et al., 2006).

Protegida la pieza se elabora el molde de elastómero silicónico y madreforma rígida de poliéster mediante la técnica de estratificado (ver apartado 8.2.3.2.2.).

Obtenido el molde, (éste se elaboró en dos piezas: anverso y reverso. Figura 12.11.). Se prepara la mezcla del mortero MP-BC (ver apartado 10.4.1.4.). Se eligió este tipo de mortero por sus cualidades de resistencia a los agentes ambientales y ligereza estructural (ver conclusiones).

A continuación, con el sistema de estratificación se puede operar con el molde abierto en posición horizontal, lo cual posibilita un cómodo acceso a todo él, pudiéndose aplicar el mortero fácilmente sobre toda la superficie de las dos piezas del molde. Éste se aplica en estratos mediante espátula de modelar. La primera capa no debe de exceder de 0,5 cm, con lo cual se evitarán despegamientos y tensiones (Figura 12.12.). Comenzada la gelificación de esta primera capa se procede a aplicar una segunda capa intermedia de tejido o fibra de vidrio mat 300 y refuerzos de varillas roscadas consiguiendo un grosor total de 1 cm en ambas piezas. (El grosor idóneo viene en función de su resistencia mecánica. Para una figura de tamaño natural es suficiente de 8 a 10 mm.) Comenzada la gelificación de esta segunda capa, se procede al montaje de las dos cajas de soporte o madreformas con sus respectivas membranas de silicona y pasando las perforaciones de las pestañas con tornillos apretados y tuercas (Figura 12.13.).

Montado el molde, aplicaremos una tercera capa cubriendo la junta de separación de las membranas de elastómero y reforzándolas con fibra de vidrio mat 300 o tejido (Figura 12.14.). Para asegurar que esta tercera capa no produzca alteración cromática sobre la línea de la junta, que no fuere cubierta por la primera, el procedimiento consiste en preparar, a la vez, la cantidad de mortero correspondiente a las tres aplicaciones. Se formula una parte para la primera aplicación, otra para la segunda y el resto para las juntas, garantizando con ello, una uniformidad exacta de textura, forma y cromatismo en toda la superficie.

En este caso, la reproducción queda hueca pero se requiere la aplicación de un vástago que una estructuralmente la cruz con la

columna. Para ello se cerró la apertura con fibra de vidrio mat 300 (Figura 12.15.a) y se insertó el perno rellenándose el vacío restante con arlita 8-16 (arcilla expandida) impregnada con resina AL-100 (Figura 12.15.b).

Polimerizado el mortero y el relleno, se lleva a cabo el desmoldeo. Una vez obtenida la réplica se manipula la superficie como si de piedra natural se tratara. En este caso, el acabado superficial se efectuó mediante chorro de vidrio pulverizado SOFT GLASS G3 (5 bares de presión) y labra con gradina fina (Figura 12.16.).

Finalmente se montó la réplica sobre la columna (Figura 12.17.) se selló la zona de contacto (ver apartado 12.2.) y, se reintegró cromáticamente mediante una patinatura acorde al conjunto (Figura 12.18.).

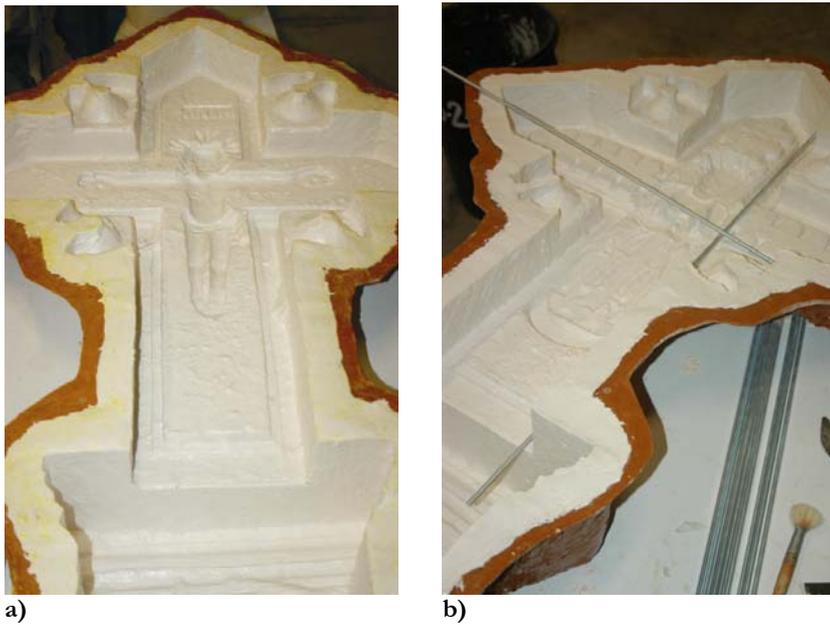


Figura 12.11. Molde de silicona y contramolde/madreforma rígida de poliéster.



Figura 12.12. Aplicación del mortero mediante sistema de estratificación operando con el molde abierto en posición horizontal.



Figura 12.13. Montaje de las dos piezas.



Figura 12.14. Tercera capa cubriendo la junta de separación de las membranas de elastómero.

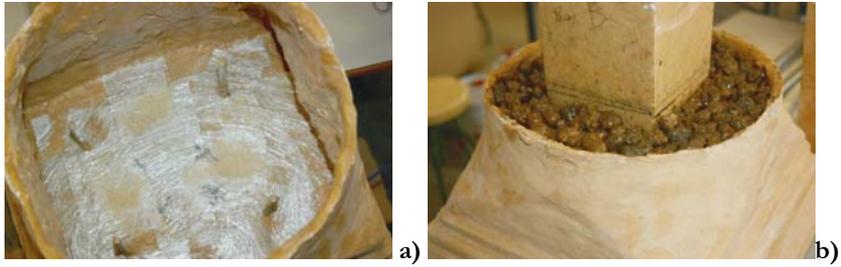


Figura 12.15. a) Reproducción hueca. b) Aplicación de un vástago. Carga de relleno.



Figura 12.16. Acabado superficial mediante chorro de vidrio pulverizado y gradina fina.



Figura 12.17. Montaje de la réplica sobre la columna.

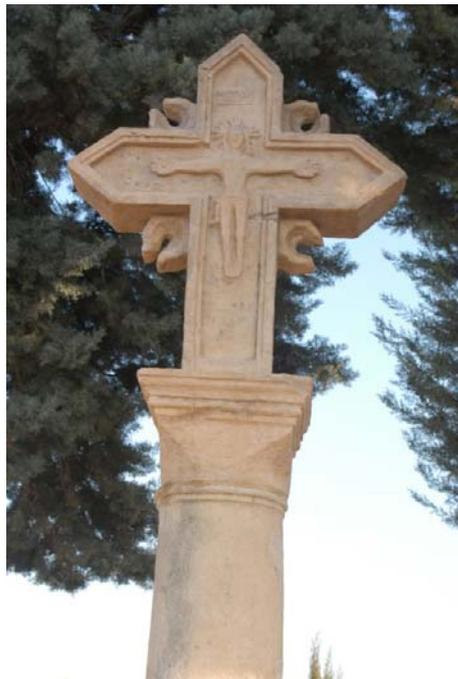
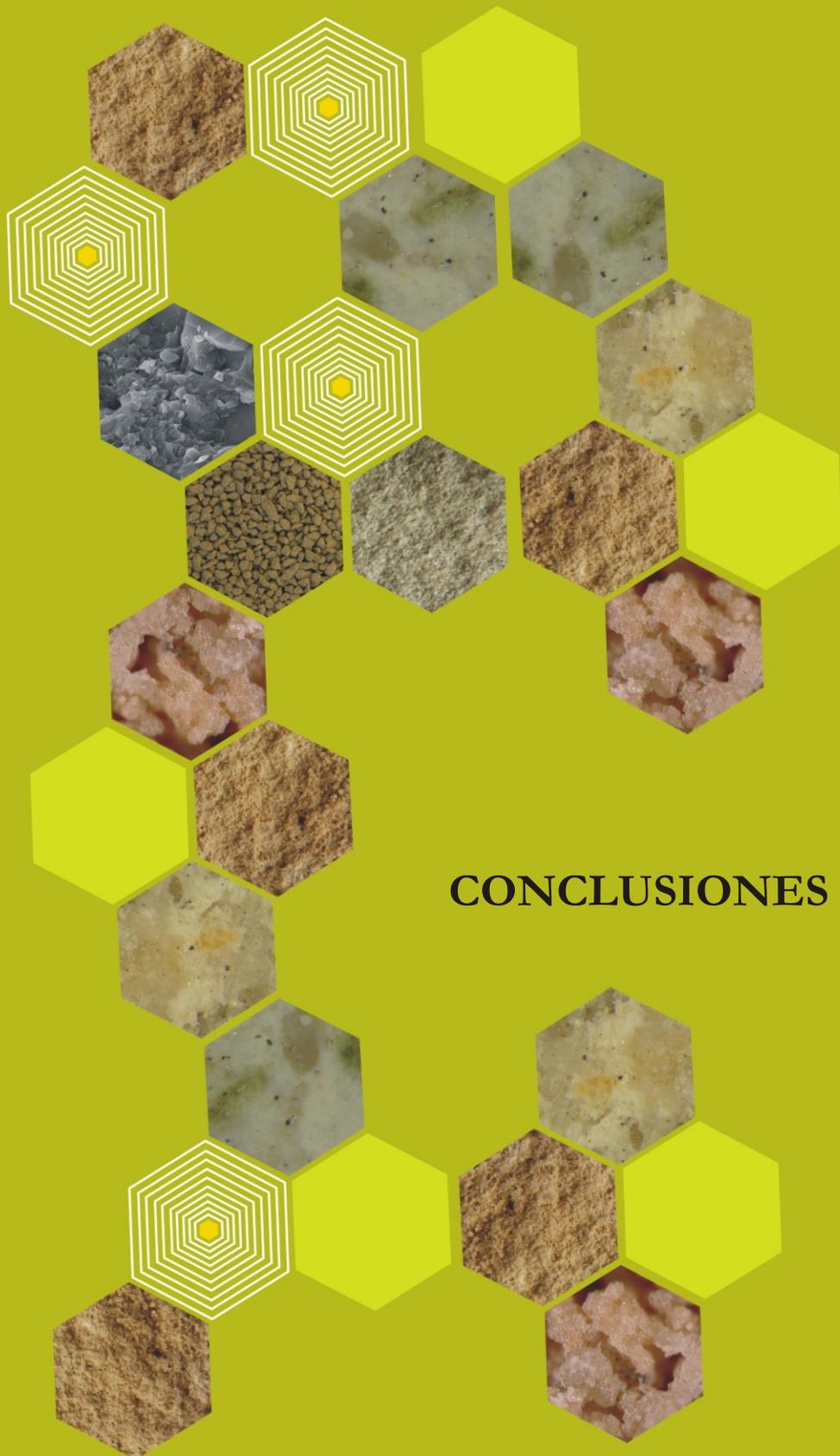


Figura 12.18. Patinatura. Acabado final. Uniformidad visual.



CONCLUSIONES

13. CONCLUSIONES.

A continuación se indican las conclusiones más importantes obtenidas en esta Tesis Doctoral acerca de las características de los diferentes morteros compuestos estudiados, destinados a resolver problemas de sellados, reposiciones y réplicas, en elementos pétreos escultórico-ornamentales.

1.- El estudio estereológico evidencia el carácter homométrico de las fracciones de material pétreo micronizado Tosca de Rocafort y Bateig Crema sometidos tras el proceso de molienda y tamizado.

2.- La composición óptima, para los morteros compuestos elaborados con Tosca de Rocafort y Bateig Crema, a partir de los valores obtenidos de los parámetros cromáticos L*, a*, b*, es:

MORTERO POLIÉSTER				
MP-BC	BATEIG CREMA			COMPOSICIÓN (% peso)
	ÁRIDO (0,80-1,00) mm			64
	ÁRIDO (0,06-0,25) mm			19,5
	CONGLOMERANTE ESTRATIL AL 100	resina	poliéster	16,5
MP-TR	TOSCA DE ROCAFORT (TR)			COMPOSICIÓN (% peso)
	ÁRIDO (0,25-0,42) mm			66,7
	ÁRIDO (0,06-0,25) mm			16,7
	CONGLOMERANTE ESTRATIL AL 100	resina	poliéster	16,7

CONCLUSIONES

MORTERO ACRÍLICO		
	BATEIG CREMA	COMPOSICIÓN (% peso)
MA-BC	ÁRIDO (0,80-1,00) mm	56,9
	CONGLOMERANTE resina acrílica bi-componente PLASTICRETE P-CAST A 02	42,7
	ADITIVO pigmento sombra natural Bayer	0,46
	TOSCA DE ROCAFORT	
MA-TR	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	39,7
	ÁRIDO (0,06-0,25) mm	9,9
	CONGLOMERANTE resina acrílica bi-componente PLASTICRETE P-CAST A 02	49,6
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,2
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	0,5
	MORTERO CAL-YESO	
	BATEIG CREMA	COMPOSICIÓN (% peso)
MN-BC	ÁRIDO (0,42-0,80) mm	46,6
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,3
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,7
	DISOLVENTE agua destilada	17,5
	ADITIVO pigmento Bayer sombra natural	0,9

MORTERO CAL-YESO		
	BATEIG CREMA	COMPOSICIÓN (% peso)
MN-BC- ADT	ÁRIDO (0,42-0,80) mm	46,6
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,3
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,7
	DISOLVENTE agua destilada	17,5
	ADITIVO pigmento Bayer sombra natural	0,9
	ADITIVO Mowilith SDM5	10 (respecto al agua)
	MORTERO CAL-YESO	
MN-BC- AB	ÁRIDO (0,42-0,80) mm	46,6
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,3
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,7
	DISOLVENTE agua destilada	17,5
	ADITIVO pigmento Bayer sombra natural	0,9
	ADITIVO ácido bórico	0,64 (respecto al agua)
	MORTERO CAL-YESO	
MN-TR	TOSCA DE ROCAFORT	COMPOSICIÓN (% peso)
	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	46,2
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,1
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,5
	DISOLVENTE agua destilada	17,3
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,6
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	1,3

CONCLUSIONES

MORTERO CAL-YESO		
	TOSCA DE ROCAFORT	COMPOSICIÓN (% peso)
MN-TR- ADT	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	46,2
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,1
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,5
	DISOLVENTE agua destilada	17,3
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,6
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	1,3
	ADITIVO Mowilith SDM5	10 (respecto al agua)
	<hr/>	
MN-TR- AB	ÁRIDO (0,25-0,42) mm	46,2
	CONGLOMERANTE yeso ALAMO 70	23,1
	CONGLOMERANTE cal aérea en polvo	11,5
	DISOLVENTE agua destilada	17,3
	ADITIVO pigmento BAYER ocre 920	0,6
	ADITIVO pigmento BAYER sombra calcinada	1,3
	ADITIVO ácido bórico	0,64 (respecto al agua)

3.- Los valores de absorción-desorción exhibidos por los morteros acrílicos son similares a los de las piedras frescas de cantera. Los valores de los morteros de cal-yeso son ligeramente superiores a éstos, mientras que los de los morteros de poliéster son notablemente más bajos, prácticamente nulos.

4.- Todos los morteros compuestos ensayados poseen densidad real inferior a la de las correspondientes piedras frescas de cantera. Los morteros de cal-yeso exhiben valores de densidad real ligeramente más bajos que la roca fresca. Esta disminución del valor de densidad se hace

mayor en los morteros acrílicos y de poliéster. Asimismo, los morteros de cal-yeso presentan diferencias de densidad real y aparente superiores a los encontrados en la roca fresca, lo cual evidencia su mayor porosidad. Por el contrario, los morteros acrílicos y de poliéster presentan diferencias de densidad real y aparente muy bajas confirmando su escasa porosidad.

5.- Los mayores valores de contenido de humedad de saturación obtenidos en los morteros de cal-yeso muestran que éstos serán susceptibles de sufrir más rápidamente una alteración física, química y biológica que los morteros de matriz sintética.

6.- Los morteros acrílicos y de poliéster exhiben valores de coeficiente de saturación bajos, mientras que los de los morteros de cal-yeso se asemejan a los de las piedras frescas de cantera.

7.- Los valores de porosidad de los morteros de cal y yeso y sus variantes, especialmente con el aditivo Mowilith SDM 5 (MN-TR-ADT y MN-BC-ADT), son similares a los obtenidos por las piedras frescas de cantera, mientras que los morteros de matriz sintética exhiben valores de porosidad muy bajos, especialmente los morteros de poliéster (MP).

8.- Los morteros de poliéster presentan valores de carga de rotura a compresión y flexión muy superiores a los de los morteros de cal-yeso y acrílicos, aproximándose éstos últimos a los de los de la piedra fresca.

9.- El ensayo tribológico pone de manifiesto la resistencia obtenida en los diferentes morteros compuestos ante una acción de rozamiento continuo con y sin adición de lubricante. Los morteros compuestos de cal-yeso exhiben una mayor pérdida de masa por acción de rozamiento en estado seco, sin embargo, sus derivados y los acrílicos muestran la mayor pérdida de masa en estado húmedo. Contrariamente, los morteros de poliéster se mantienen inalterables.

10.- Los morteros compuestos sin adición de biocida experimentan variaciones de color total bajas, especialmente los de cal-yeso; además, exhiben valores de luminosidad relativamente bajos, confirmando al mortero un aspecto ligeramente más oscuro. Las variaciones más significativas en el tono se han producido en los ensayos simulando clima tropical y seco. En general, se ha observado una deriva hacia el amarillo y

CONCLUSIONES

el rojo en los tres tipos de morteros compuestos, siendo ésta más acentuada en el mortero MA-TR.

11.- La adición del producto biocida en los morteros compuestos proporciona valores de color total ligeramente más altos, especialmente en el clima tropical. Los morteros de cal-yeso y acrílicos con adición de biocida experimentan una disminución de la luminosidad proporcionando un aspecto más oscuro a la superficie. Desde el punto de vista cromático los diferentes morteros compuestos elaborados con biocida tienden a un desplazamiento de color hacia el amarillo y hacia el rojo.

12.- Los morteros compuestos con mayor porosidad son los más fuertemente alterados en el ensayo de resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, exhibiendo mayor pérdida de masa. Los morteros de cal-yeso y acrílicos, en general, tienen un comportamiento similar al de las piedras frescas de cantera, mientras que los morteros compuestos elaborados con el conglomerante poliéster, debido a su escasa porosidad, se mantienen inalterables.

13.- También, la diferente porosidad de los morteros compuestos explica la desigual pérdida de masa obtenida por la acción de la cristalización salina, con variaciones de masa ligeramente mayores en los morteros acrílicos que en los de poliéster. Los morteros de cal-yeso han tenido un comportamiento singular ya que han experimentado un aumento de masa debido a la precipitación de las sales en su interior, a la vez que han sufrido pérdidas superficiales de material asociadas al tránsito de la disolución salina por la red porosa de los morteros.

14.- La exposición de los morteros compuestos a la acción de SO_2 atmosférico ha permitido diferenciar el grado de ataque alcanzado por éstos frente al material fresco de cantera. El crecimiento de microcristales CaSO_4 depende del tipo de conglomerante y el tamaño de micronizado del árido. Los morteros elaborados a partir de una matriz sintética y menor tamaño de partícula han sido los menos propensos a degradarse por la acción del SO_2 .

15.- Los morteros de matriz sintética (acrílica y poliéster), sometidos a la degradación natural, sufren la mayor alteración durante los tres primeros meses de exposición, sin embargo, en los tres meses siguientes la

variación es mínima. En los morteros compuestos de cal-yeso la variación aumenta gradualmente durante las 4400 horas de ensayo.

16.- El empleo de retardadores y aceleradores, como era de esperar, modifican las características originales del mortero. Los morteros de cal-yeso con adición de Mowilith SDM 5 y ácido bórico aumentan notablemente el tiempo de fraguado, especialmente en este último caso. En los morteros de poliéster los tiempos de endurecimiento pueden variar al añadirse el iniciador y el catalizador de la reacción, siempre en función de la temperatura y humedad del ambiente.

17.- En la valoración psicofísica y táctil, los morteros compuestos que evidencian mayor idoneidad para la reintegración de faltantes, independientemente de que sean empleados en sellados, reposiciones y réplicas, son el mortero cal-yeso para ambos micronizados y, el mortero de poliéster con Tosca de Rocafort y el mortero acrílico con piedra Bateig crema.

18.- Los tres morteros compuestos admiten un trabajo de labra muy idónea, conforme al trabajo realizado sobre la piedra fresca de cantera. Esto permite reproducir fragmentos con texturas idénticas al original.

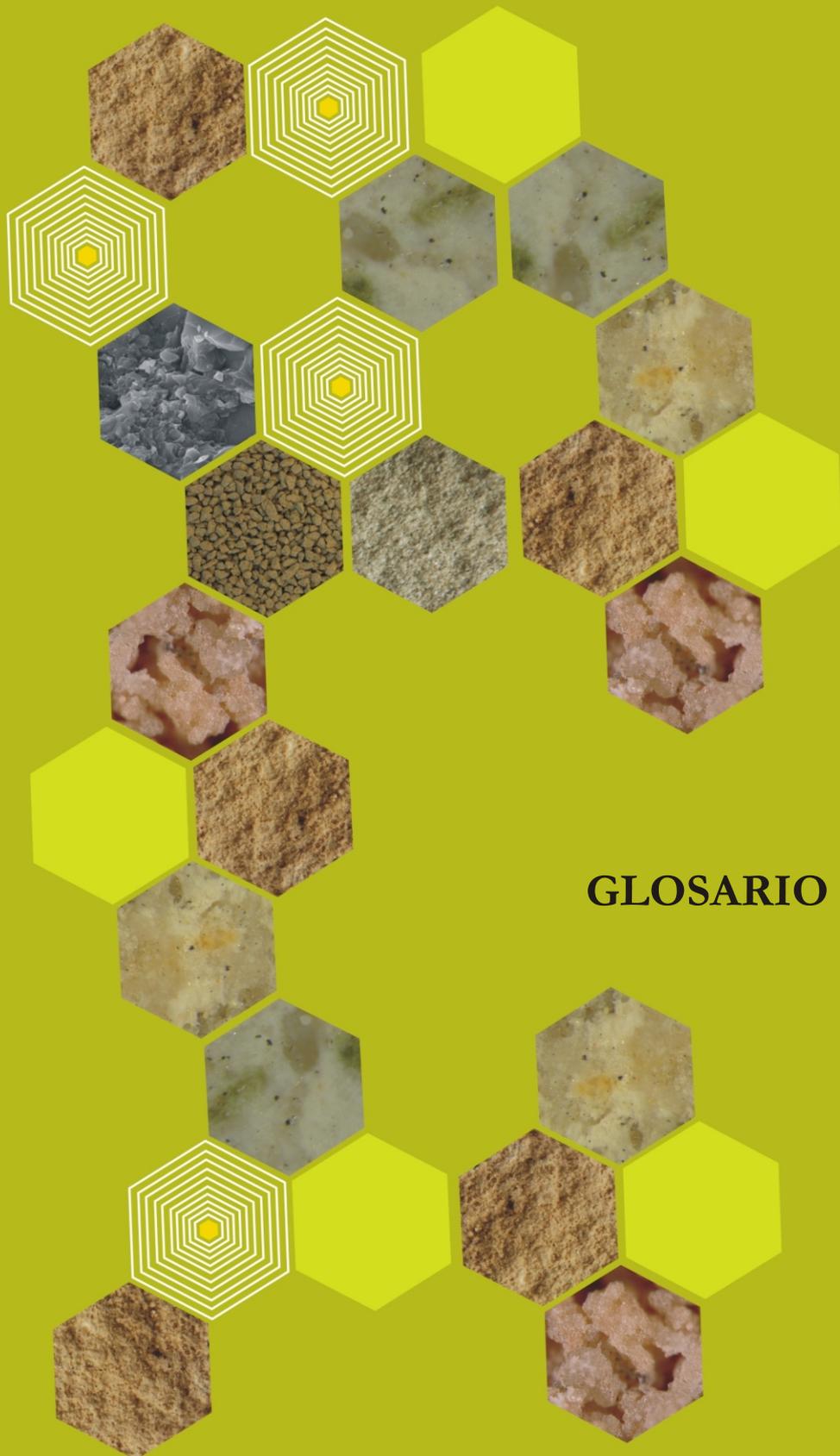
19.- Los morteros acrílico y de poliéster sometidos a ensayo de estabilidad frente a agentes de deterioro biológico son los más propensos a la colonización biológica, frente a los morteros compuestos de cal-yeso, que evidencian una mayor resistencia al biodeterioro. La piedra Tosca de Rocafort exhibe una mayor resistencia al crecimiento biológico frente a la piedra Bateig que presenta una presencia ligeramente mayor de colonización. Los morteros compuestos sin adición de producto biocida presentan mayor colonización biológica. Los morteros compuestos que incorporan biocida exhiben índices de colonización bastante similares. La presencia de colonización biológica es, también, muy similar en todo el intervalo de concentraciones de biocida considerados en este estudio, si bien es ligeramente menor en las probetas que tienen mayor proporción de biocida.

20.- El ensayo de envejecimiento acelerado por irradiación con luz ultravioleta pone de manifiesto que la incorporación de los productos biocidas en el seno de los morteros altera su comportamiento cromático.

CONCLUSIONES

21.- Las anteriores conclusiones se resumen en la siguiente tabla, en la que se especifica el mortero compuesto más apropiado en función del tipo de intervención y de las condiciones de exposición.

INTERVENCIÓN	CONDICIONES DE EXPOSICIÓN		
	INTERIOR	EXTERIOR	
		CON BIOCIDA	SIN BIOCIDA
SELLADOS	MN-TR/ MN-BC	MN-TR-ADT-BN-2 MN-BC-ADT-BN-1	MN-TR-ADT MN-BC-ADT
REPOSICIONES	MA-TR/ MA-BC	MA-TR-BS-2 MA-BC-MT-0,1	MA-TR/ MA-BC
RÉPLICAS	MP-TR/ MP-BC	MP-TR-BS-2 MP-BC-BS-1	MP-TR/ MP-BC



GLOSARIO

14. GLOSARIO.

Adiciones: Son sustancias inorgánicas, puzolánicas o con hidraulicidad latente que finamente molidas pueden añadirse al mortero en proporciones mayores que los aditivos que tienen como función modificar algunas de las propiedades del mortero o reducir la cantidad de cemento a utilizar.

Aditivos: Son aquellas sustancias o productos que, incorporados al mortero, hormigón o pasta antes o durante el amasado y/o durante un amasado suplementario, en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada en dicho mortero, hormigón o pasta -en estado fresco o endurecido- de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento; no deben actuar desfavorablemente en la calidad de la ejecución de la obra, la durabilidad y/o la resistencia a los agentes atmosféricos. (UNE 83-200-84).

Aglomerante: Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico, por ejemplo el barro (Real Academia Española).

Arena: En la clasificación de tamaños de partículas de la BS (BS 1377:1995 y BS 5930:1981) arena es un material granular de un tamaño que oscila entre 0,06 mm y 2 mm. No obstante, como arena para hormigón, el límite granulométrico superior nominal es 5 mm y también hay limitaciones en la distribución granulométrica (BS 882:1983).

Árido fino: áridos que pasan mayoritariamente un tamiz normalizado BS 410 de 5 mm y quedan retenidos en un tamiz de 75 μm , y sólo contienen el porcentaje de material grueso que permite la norma BS 882 para las diferentes zonas granulométricas.

Caliza arrecifal: Caliza compuesta de restos fósiles de organismos arrecifales, tales como los corales, briosos, algas y esponjas.

Cámbrico: El período más antiguo del Paleozoico, entre 590 y 505 Ma, y su sistema estratigráfico correspondiente. El nombre procede de Cambria el nombre romano de Gales.

Cemento: Depósito químico –ortoquímico o terrígeno- que une entre sí a los clastos y la matriz.

Conglomerante: Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos, por ejemplo el yeso, la cal, el cemento (Real Academia Española).

Clástico: Término referido a una roca o sedimento, compuesto principalmente por fragmentos rotos de rocas o minerales preexistentes que han sido transportados individualmente de su lugar de origen.

Clasto: Armazón o conjunto de granos en contacto o separados.

Compactación: Proceso por el que las partículas del suelo o del árido (con o sin ligante) se empaquetan, causando un aumento en la densidad.

Criba: Aparato para separar por tamaños similar a un tamiz, que consiste (normalmente) de una superficie que está atravesada por orificios de tamaño y forma característica. El cribado es una operación de separación granulométrica que se realiza utilizando una criba.

Descascarillado: Partículas o fragmentos que se desprenden de la roca como resultado de la acción del hielo u otros cambios físicos o químicos.

Diagénesis: Es la formación de nuevos minerales, por reacción de los minerales de las rocas y el medio ambiente, al cambiar las condiciones físico-químicas. Los materiales de nueva formación se llaman autógenos o diagenéticos, en contraposición a los detríticos o alotígenos que proceden de otra roca preexistente. Son minerales autógenos el cuarzo, los carbonatos, feldespatos, yeso...

Dosificación: Es la proporción en volumen o en peso de los distintos materiales integrantes del mortero (aglomerante/árido), y dependerá de la finalidad del mortero, de su composición y de la resistencia mínima deseada (UNE 83-800-94).

Escala de dureza de Mohs: Escala de resistencia al rayado, ordenada en función de la dureza relativa de los minerales más corrientes que, en orden de dureza creciente son: 1, talco; 2, yeso; 3, calcita; 4, fluorita; 5, apatito; 6, ortoclasa; 7, cuarzo; 8, topacio; 9, corindón; 10, diamante.

Granulometría: Proporción de los diferentes tamaños presentes en un árido, determinada por tamizado; distribución granulométrica.

Hormigón: Material formado por un conglomerante, generalmente, cemento, con árido fino y grueso, y agua para formar tras el endurecimiento un conglomerado, es decir, un mortero con árido grueso. Además, puede contener aditivos y/o adiciones que modifiquen sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido.

Lacustre: Relacionado con materiales formados en o por los lagos, por ejemplo depósitos de playas lacustres.

Ligante: Cualquier agente cementante de suelos o áridos, por ejemplo, agua, arcilla, cemento, cal, resinas sintéticas...

Litificado: Hecho de roca. La litificación es el proceso de consolidación de un sedimento hasta convertirse en roca sólida.

Lixiviado: Eliminación selectiva de componentes solubles de una masa de suelo o roca por la acción de aguas percolantes.

Luz de maya: Aberturas de la superficie cribante, o el tamaño de dichas aberturas.

Machacadora de mandíbulas: Aparato de trituración consistente en una placa trituradora fija y casi vertical y otra móvil inclinada que se mueve de tal modo para ampliar y reducir alternativamente la separación entre ambas placas.

Masivo: En Geología, sin estratificación, esquistosidad o foliación; se aplica especialmente a cuerpos rocosos ígneos pero puede utilizarse para describir estratos potentes en rocas sedimentarias.

Matriz: Granos más finos situados entre los clastos, normalmente limos y arcillas.

Mesozoico: Era siguiente al Paleozoico, va desde hace 230 a 70 Ma. Incluye los sistemas Triásico, Jurásico y Cretácico.

Metamorfismo: Cambios mineralógicos y estructurales de las rocas en su estado sólido en respuesta a las condiciones físicas y químicas.

Metamorfismo de contacto: Proceso de metamorfismo térmico localizado, resultado de la intrusión (y en menor medida la extrusión) de magma en las rocas, los cambios se producen en o cerca del contacto por el calor y los materiales que emanan del magma y por algunas deformaciones que se producen por el emplazamiento de las masas ígneas.

Metamorfismo dinámico: Cambios en la estructura y mineralogía de la roca, producidos a escala regional por trituración y cizalla en la corteza de la Tierra; pueden producirse elevadas temperaturas, lo que podría conducir a una completa recristalización de las rocas.

Metamorfismo regional: Metamorfismo que afecta a una región amplia y que suele producirse por el profundo enterramiento del material en la corteza de la Tierra.

Metasomatismo: Implica un cambio químico en la composición mineralógica de las rocas. Como ejemplo se tiene la transformación de la caliza (CaCO_3) en dolomía $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, por sustitución de una parte del calcio de la caliza por magnesio en la dolomía.

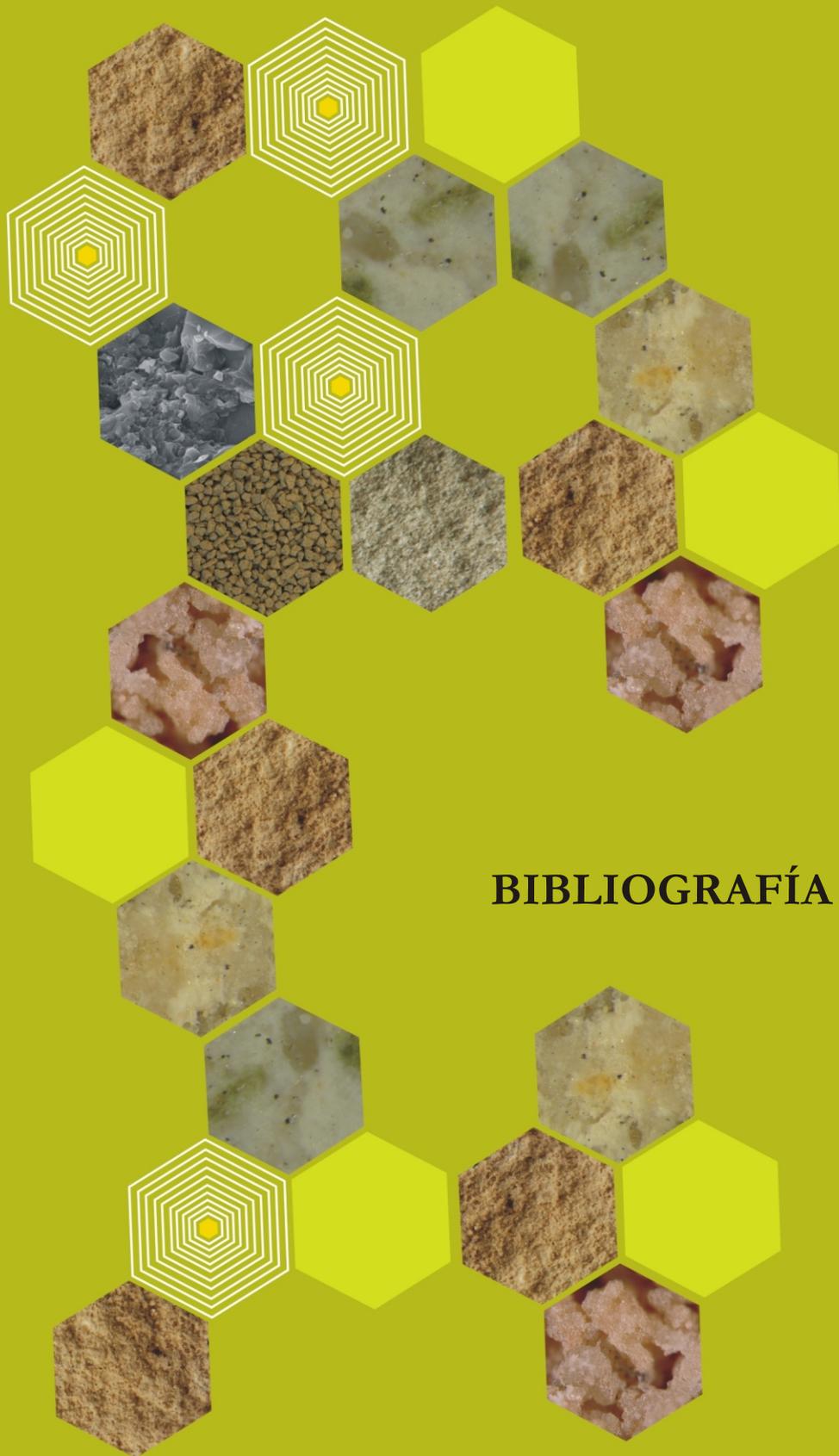
Mortero: Mezcla de conglomerante inorgánico –yeso, cal, cemento,...- árido y agua, a veces, con ciertas sustancias orgánicas y/o inorgánicas, que mejoren sus propiedades. Los componentes de dicho mortero deben estar en tales proporciones que permitan que la mezcla sea trabajable cuando está fresca y con propiedades físico-mecánicas aceptables (UNE 83-800-94).

Pasta: Material formado por un conglomerante, yeso, cal o cemento, mezclado con agua.

Precámbrico: Período de tiempo (unos 4.000 millones de años) que discurre desde la consolidación de la Tierra hasta el comienzo de la era Paleozoica, y sus correspondientes series estratigráficas.

Terciario: Era que sigue al Mesozoico, que cubre el período desde los 65 a los 2 Ma, y su correspondiente serie estratigráfica.

Trabajabilidad: Facilidad de manejo de una mezcla de mortero u hormigón para colarla en su forma final.



BIBLIOGRAFÍA

15. BIBLIOGRAFÍA.

15.1. REFERENCIAS.

ABALLE, M.; LÓPEZ RUÍZ, J.: Historia y situación actual de la microscopía electrónica de barrido y del microanálisis por rayos X. En: Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X, C.S.I.C., Editorial Rueda, 1996.

ALAKOMI, H. L.; ARRIEN, N.; GORBUSHINA, A. A.; KRUMBEIN, W. E.; MAXWELL, I.; MCCULLAGH, C.; ROBERTSON, P.; ROSS, N.; SAARELA, M.; VALERO, J.; VENDRELL, M.; YOUNG, M. E.: Inhibitors of biofilm damage on mineral materials (Biodam). In: M. Klingspor Rotstein (ed.) Proceedings of the 10th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, in press. 2004.

ALCALDE MORENO, M.: Sintomatología de alteraciones de las Catedrales de Sevilla, Cádiz y Almería. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla, 1989.

ALCALDE MORENO, M.; VILLEGAS SÁNCHEZ, R.; FRANCISCO VALE, J; MARTÍN PÉREZ, A.: Diagnósis y tratamiento de la piedra: I.- La alteración de la piedra en los monumentos. II.- Consolidantes e hidrofugantes. Productos para el tratamiento de materiales pétreos. Monografías del I.E.T./C.E.S.I.C. nº 400. Madrid, 1990.

ALCALDE MORENO, M.: Factores y mecanismos de deterioro. Indicadores de alteración de los materiales pétreos. Propuesta de una terminología. Curso técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación. Granada, 1997.

ALCALDE MORENO, M.; VILLEGAS SÁNCHEZ, R.: Indicadores de alteración de los materiales pétreos. En Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Cuadernos Técnicos nº 8. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Junta de Andalucía Consejería de cultura. Granada, 2003.

ALESSANDRINI, G.; BONECCHI, R.; BUGINI, R.; FEDELI, E.; PONTICELLI, S.; ROSSI, G.; TONIOLO, L.: Bramante in Milan: The Cascina Pozzobonelli. Technical Examination and Restoration. Studies in Conservation. Vol 34, pp : 53-66, 1989.

ALESSANDRINI, G.; BUGINI, R.; FOLLI, L.; REALINI, M.; TONIOLO, L.: The compositional ratios of mortars. Comparison between chemical and petrographical methods. Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Vol. 2, pp: 667-675, 1992.

ALESSANDRINI, G.; BOCCI, A.; BROGLIA, E.; PERUZZI, R.: Conservation treatments for Italian sandstone: laboratory tests. Masonry International, Vol. 7. Nº 1., 1993.

ALESSANDRINI, G.; PERUZZI, R.; ALDI, A. ; FANTASMA, F. : Noto calcarenite (SR) : the protective treatments and the evaluation of the effectiveness. Proc. 8th Int. Cong. on Deterioration and conservation of stone, Berlin, 1996.

ALONSO, F. J.: Características petrofísicas y alterabilidad de calizas y dolomías. Tesis doctoral. Dpto. Petrología Universidad de Oviedo. 1986.

ALONSO MATILLA, L. A.: Propuesta de una normativa previa en la restauración de materiales líticos de los conjuntos escultóricos del patrimonio. VIII Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Valencia 20, 21, 22 y 23 de Septiembre de 1990.

- ALONSO PASCUAL, J.J.; GOMEZ LOPERA, F.: Electron Microscopy, architecture and the environment, in Valencia. Electron Microscopy. Eurem 92, Granada. Spain. Volume 2. 1992.
- ALTIERI, A.; FUNICIELLO, R.; LUPIA PALMIERI, E.; ZUPPI, G.M.: Caratteri dell'alterazione delle pietre da costruzione in Venezia: azione dello zolfo atmosferico su rocce carbonatiche. Atti del 2° Covegno Nazionale di Igiene Ind. Roma, 1975.
- ALVÁREZ, A.; ARGEMI, M.; DE LAORDEN, V.; DOMENECH, X.; GERBAL, J.; NAVARRO, A.; PRADA, J. L.; PUGES, M.; ROCABAYERA, R.; VILASECA, L.: Physical, chemical and biological weathering detected in the romanic portal of the Sant Quirze de Pedret church (XIc.) In: V. Fassina, H. Ott, F. Zezza (eds.), Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Proceedings of the Third International Symposium, Venice, June 22-25, pp: 365- 369. 1994.
- ÁLVAREZ DE BUERGO, M.; GONZÁLEZ LIMÓN, T.: Restauración de edificios monumentales. Estudio de materiales y técnicas instrumentales. CEDEX. Madrid, 1994.
- AMOROSO, G.G.; FASSINA, V.: Stone Decay and Conservation, Elsevier, Amsterdam, 1983.
- ANDREWS, H.: Gypsum and anhydrite plasters. London, 1948.
- ANFOSSI, D.; BOZZA, F.; RICHIARDONE, R.: La dispersione di inquinanti in atmosfera a scala locale. Le Scienza, n. 29, 1979.
- AÑORBE URMENETA, M.: Valoración del deterioro y conservación en piedra monumental. CEDEX. Madrid, 1997.
- ARNAIZ, M.; MARTÍN A.: Alteración de materiales pétreos de obras monumentales. Acción de la contaminación ambiental. Consejo Superior de Investigaciones Científicas N° 340, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid, 1977.
- ARREDONDO y VERDU, F.: Yesos y cales. Servicio de publicaciones. Revista Obras Públicas E. T. S. Ingenieros y Caminos, Madrid, 1991.

ASHURT, J.: Mortars, plasters and renders in conservation. Ed. EASA, New York, 1986.

ASHURT, J.: Mortars for stone building. Conservation of building and decorative stone. Vol. 2, pp. 78-96, 254, London, 1990.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA NORMALIZACIÓN (AENOR). Norma UNE 83-200-84. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Clasificación y definiciones.

ATLAS, R.M.; CHOWDHURY, A. N.; GAURI, K. L.: Microbial calcification of gypsum-rock and sulphated marble. Studies in Conservation 33 (3):149-153. 1988.

AA.VV. *Áridos. Manual de prospección, explotación y aplicaciones*. 2ª ed. Editor López Jimeno, Carlos. Entorno gráfico. Madrid. 1994.

BALART GIMENO, R; LÓPEZ MARTÍNEZ, J.; SÁNCHEZ NÁCHER, L.; NADAL GISBERT, A.: Introducció als materials polimèrics i compostos. Renaixença i futur. Monografies de la Universitat Politècnica de València sobre ciència, tecnologia i art. 2001.

BARBA, C.: Componentes básicos del microscopio electrónico de barrido (MEB) y de la microsonda electrónica (MSE). En: Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X, C.S.I.C., Editorial Rueda, 1996.

BASSI, M.; CHIANTANTE, D.: The role of pidgeon's excrements in stone biodeterioration. Int. Biodeterioration Bull 12 (3), 1976.

BELLO, M. A., MARTÍN, A.: Análisis de la composición química principal de materiales pétreos empleados en obras de arte. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Año V, nº 20, 1997

BENITO SORIA, A.: Clasificación de las rocas. Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración, colocación. Entorno Gráfico S.L. Capítulo 3, 77-80, 1996.

- BERCHEZ GÓMEZ, J. Monumentos de la Comunidad Valenciana. Catálogo de monumentos y conjuntos dclarados e incoados. Tomo X. Arquitectura religiosa. Valencia. Generalitat Valenciana, 1995.
- BERTOLACCINI, M. A.; CERGNIGLINI, S.; FASSINA, V.; TORRACA, G. : Study of seme gaseous and particulate pollutants in the atmosphere of Venice (1972-1973) and their effect on the deterioration of Strian Stone. International Centre for the Preservation and the Restoration of Cultural Property, Roma, 1975.
- BLÁZQUEZ MARTÍN, A. B.: Estudio de biocidas para el control de las comunidades microbianas presentes en los sillares de la Catedral de Alcalá de Henares. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia, Junio 2003, Madrid.
- BOCK, E.; SAND, W.: The microbiology of masonry bio deterioration, Journal of Applied Bacteriology 74, 1993.
- BOLÍVAR GALIANO, F.; GARCÍA ROWE, J.: Biodeterioro de la fuente del claustro principal del Hospital de S.juan de Dios de Granada. Cuadernos de Arte de la Universidad de Granada, 25:107-205, 1994
- BOLÍVAR GALIANO, F. Diagnosis y tratamiento del deterioro por microalgas en los Palacios Nazaríes de la Alhambra. Tesis Doctoral. Ed. Univ. de Granada, 1994.
- BOLÍVAR GALIANO, F. y SÁNCHEZ CASTILLO, P. Preliminary results on the study of the algal biodeterioration within tha Alhambra (Granada, Spain). En: International Biodeterioration and Biodegradation, 9: 210-216. Inst. Chem.Eng. Rgby, 1995.
- BOLÍVAR, F. C.; SÁNCHEZ CASTILLO, P. M.: Evaluación de los Tratamientos Algicidas realizados en la Alhambra. En: E. Sebastián Pardo, I. Valverde Espinosa y U. Zezza (eds.), Libro de Comunicaciones del III Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. CEDES-MOPTA y Universidad de Granada, pp: 494-498. 1996.
- BOLÍVAR GALIANO, F. y SÁNCHEZ CASTILLO, P. Biomineralization processes in the Fountains of the Alhambra

- (Granada, Spain).En: International Biodeterioration and Biodegradation, 12: 205-215, Rugby, 1997.
- BOLÍVAR GALIANO, F. y SÁNCHEZ CASTILLO, P. Biodeterioro del Patrimonio Artístico por cianobacterias, algas verdes y diatomeas. En: PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 24: 52-63, Sevilla 1998.
- BORELLI, E.; LAURENZI TABASSO y PROIETTI. S. "Caratterizzazione di stucchi da impiegare per il restauro della Colonna Traiana e della Colonna Traiana e della Colonna di Marco Aurelio a Roma. Scheda di analisi n.878, ICR, Roma 1985.
- BRAMKAMP, R. A. y POWERS, R. W.: Classification of Arabian Carbonate Rocks. Geol. Soc. Am. Bull. vol. 69, nº 10, pp. 1305-1318, 1958.
- BRANDI, C.: Teoría de la restauración. Alianza editorial, Madrid, 1977.
- BRUSIE, J.P.: Acrylic Esther Polymers. In Enciclopedia of Polymer Science and Technology, Ed by H. F. Mark, N. G. Gaylord, N. M. Bikales, Interscience Pub., J. Wiley & Sons, New York, Vol. 1, 1964, pág: 246-336.
- BURFORD, E. P.; FOMINA, M.; GADD, G. M.: Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals. Mineralogical Magazine 67 (6): 1127 –1155 (29). 2003.
- BUSSCHER, H.: Surface free energy and the adhesion of oral bacteria. Rijksuniversiteit, Groningen, 1985.
- CABRERA GARRIDO, J.M.: Causas de alteración y métodos de conservación aplicables a monumentos hechos con piedra. Revista Materiales de Construcción nº 147, p.8, 1979.
- CAGNETTI, P.; CIRILLO, M. C.: Modelli di diffusione degli inquinanti in atmosfera, Acqua Aria, Sett, 1985.
- CAMÍ y SANTAMERA. Escultura en piedra; La técnica y el arte de la escultura en piedra, explicados con rigor y claridad. Colección Artes y Oficios. Parramón ediciones S.A. 2000.

- CAMUFFO, D.: Meccanismi di diffusione degli inquinanti, in Fattori de deterioramento, DIMOS, parte II, mod. 1, ICR, Roma, 1979.
- CANEVA, G.: Ruolo delle vegetazione nella degradazione di murature ed intonaci, Tai del Convengo Scienza e Beni Culturali L'intonaco. Storia, Cultura e Tecnología, Bressanone, pp.199-209, 1985.
- CANEVA, G.; ALTIERI, A.: Biochemical mechanisms of stone weathering induced by plant growth. In: J. Ciabach (comp.), 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol.1 Nicholas Copernicus University Press Department, Torun, pp: 32-44. 1988.
- CANEVA, G.; SALVADORI, O.: Biodeterioration of Stone. In: L. Lazzarini and R. Pieper (eds.), Deterioration and Conservation of Stone, Studies and Documents on Cultural Heritage 16, Unesco, Paris, 1989.
- CANEVA, G.; ROCCARDI, A.: Harmful flora in the conservation of roman monuments. En Int. Congr. Biodet. Cultural Property, Lucknow, India, pp. 212-218, 1991.
- CANEVA, G.; NUGARI, M. P.; SALVADORI, O.: La biología nel restauro, Nardini, Firenze, 1994.
- CARBONELL DE MASY, M.: Conservación y Restauración de Monumentos: Piedra, cal, arcilla. Vanguard Grafic, Barcelona, 1993.
- CARDIANO, P.: Epoxy-silica hybrids as stone restoration materials. *Annali di Chimica* 93 (11): 947-958, 2003.
- CARRINGTON, D.; SWALLOW, P.: Lime and lime mortars. Part Two. *Journal of Architectural Conservation*, n° 1, March, pp: 937-938, 1995.
- CASAS SICART, C.; SAIZ JIMÉNEZ, C.: Los briofitos de la Catedral de Sevilla, *Collectanea Botanica*, Vol. 13 (1), 1982.
- CATALÁ GORGUES, M. A.: Cripta arqueológica de la cárcel de San Vicente Mártir. Ayuntamiento de Valencia, 1998.

- CATALAN, A.: Arquitectura gótica valenciana s. XIII-XV. Monumentos de la Comunidad Valenciana. Catálogo de Monumentos y Conjuntos declarados e incoados. Tomo I. Edición Octubre 2000. Generalitat Valenciana. Conselleria de Cultura i Educació. Direcció General de Promoció Cultural i Patrimoni Artístic.
- CAYEUX, L.: Les roches sédimentaires de France, roches carbonatées. Paris Masson et Cie., 1935.
- CAZALLA VÁZQUEZ, O.; DE LA TORRE LÓPEZ, M^a J.: Morteros de restauración y morteros antiguos. Técnicas de estudio. Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Cuadernos Técnicos. Instituto Andaluz del Patrimonio, 2003.
- CERECEDA, M..L.: El material pétreo utilizado en la construcción del Ayuntamiento de Alicante. Su alteración y tratamientos. Actas del VIII Congrés de Conservació de Béns Culturals, Valencia, pp.426-438, Valencia, 1990.
- CERECEDA, L. M.; ALONSO PASCUAL, J.; MARTINEZ PASTOR, V.; ALCAIDE ROMERO, J. S.: Caractéristiques du gres naturel de bateig très utilisé dans l'architecture. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa. 1992.
- CIARALLO, A.; FESTA, L.; PICCIOLI, C.; RANIELLO, M.: Microflora action in the decay of stone monuments. In: G. Felix (ed.), Proceedings of the 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Press Polytechniques Romandes, Lausanne, vol 2, pp: 607-616. 1985.
- CHAVARRIA, J.: *Moldes*. Aula de cerámica. Parramón. Ediciones S.L.1999.
- CHOVIN, P.; ROUSEL, A.: La pollution atmospherique. C. Presses universitaires de France, Paris, 1968.
- CLARKE, B.L. "Some recent research on cleaning external masonry in Great Britain", Proc. of the Meeting. The treatment of stone, pp.19-44, Bologna 1972.

- CLEMENTS, F. E.; SHELFORD, V. E.: Bioecology. John Wiley, New York, 1939.
- COOPER, R.; RUDOLH, E. D.: The rol of lichens in soil formation and plants successions. Ecology, Vol. 34, 1958.
- COREMANS, P.; THISSEN, J.: L'Introduction des lames minces dans l'examen des peintures, Bulletin de l'Institut Royal du Patrimoine Artistique, II, 41-45, Bruxelles, 1959.
- COREMANS, P.: La conservación de Bienes Culturales, UNESCO, 1979.
- CORTÉS, V.; MARTÍN, A.: Effects of atmospheric pollution fluorides on stone alteration. I. Siliceous materials. Proc. 3rd Int. Cong. Deterioration and preservation of stones, Venezia, 1979.
- CSIC NM 008: Mortero con propiedades biocidas. José María Bielza, 2004.
- DANIN, A.: Weathering of limestone in Jerusalem by cyanobacteria. Journal of Geomorphology, 27: 413-421. 1983.
- DAVIS, A.; SIMS, D.: Weathering of polymers. Applied Science Publishers, Essex, Reino Unido, 1983.
- DE CASTRO, E.: Recherche sur l'effficacité d'un nouveau produit de consolidation et de protection appliqué sur les briques. Doc. RILEM VTP 58 80/5.
- DE GENNARO, FUSCALDO, M.D.; COLELLA, C.: Weathering mechanims of monumental tuff-stone masonries in downtown Naples. Science and technology for cultural heritage". Journal of the Comitato Nazionale per la Scienza e la Tecnologia dei Beni Culturali". CNR, 2, pp. 53-61, 1993.
- DE GRADO, A.; PUCHE, O. y CALVO, B.: Characteristics and weathering. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo". Atti del 3° Simposio Internazionale, pp.589-593, Venezia, 1994.

DE LA TORRE, M. A.; GOMEZ-ALARCON, G.; MELGAREJO, P.; SAIZ-JIMENEZ C.: Fungi in weathered sandstone from Salamanca cathedral, Spain. *The Science of the Total Environment* 107:159-168. 1991.

DE LA TORRE LOPEZ, M. J.; RODRIGUEZ GORDILLO, J.; SEBASTIAN PARDO, E.: Characterization of mortars in the Alcazaba of the Alhambra (Granada, Spain). 7th Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa. 1992.

DE LUXAN GÓMEZ DEL CASTILLO, M^a P., DORREGO, F., SOTOLONGO, R.: Morteros de cal y yeso. Tecnologías tradicionales y soluciones actuales. *Oficios artesanales*, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (C.S.I.C.). Revista R & R, n° 1, Febrero 1997.

DEL MONTE, M. Microbioerosions and deposits on stone monuments: pitting and calcium oxalate patinas. *Advanced Workshop. Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stone*. p.14, Pavia, Italy, 1990.

DE WITTE, E.: A comparative study of tree consolidation methods on limestone. *Studies in Conservation*, 22. pp: 190-196, 1977.

DE WITTE, E.; CHAROLA, A.E.; SHERRYL, R.P.: Preliminary tests on commercial stone consolidants, 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, Reprints, Vol. 2, 1985.

DI AKUMAKU, E.; AUSSET, P. STERFLINGER, K., WOLLENZIEN, U; KRUMBEIN, W. E.; LEFÉVRE, R.A. On the problem of the rock blackening by fly-ash, fungal and other biogenic particles, and their detection in Mediterranean marbles and monuments. *La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo. Atti del 3° Simposio Internazionale*, pp.305-310. Venezia, 1994.

DI BENEDETTO, A. T.: The suitability of polymer composites as protective materials. *Proc. of the Int. Conf. Of the Nat. Ac. Of Sciences. Conservation of historic stone buildings and monuments*, Washington, 1981.

- DURAN SUAREZ, J.; GARCIA CASCO, A.; SANCHEZ NAVAS, A.; RODRIGUEZ GORDILLO, J.: Caracterización de las alteraciones en pilares de travertino de la Iglesia del Salvador (Granada). Propuestas restauradoras. Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía, 16. 1993.
- EGGEBRECHT, A. et al.: El Antiguo Egipto, 3000 años de historia y cultura del imperio faraónico. Plaza & Janés Editores, S.A. Manchen, 1984.
- ESBERT ALEMANY, R. M.; MARCOS, R.: La deterioración de las piedras de la Catedral de Oviedo. Materiales de Construcción, nº 186, 1982.
- ESBERT ALEMANY, R. M.: Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. Materiales de construcción, vol. 38, nº 209, 1988.
- ESBERT ALEMANY, R. M. et al: Metodología del tratamiento de la piedra en monumentos. Jornadas sobre conservación y tratamiento de la piedra en monumentos y en la construcción. Madrid, 1990.
- ESBERT, R. M.; GROSSI, C. M.; VALDEON, L.; ORDAZ, J.; ALONSO, F.J.; MARCOS, R. M.: Estudios de laboratorio sobre la conservación de la Catedral de Murcia (I), Materiales de Construcción, 40, 1990.
- ESBERT ALEMANY, R. M.; ÁLVAREZ DE BUERGO, M.; et al: Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos cerámicos. Manual de diagnosi, nº 5. COAATB, Barcelona 1997.
- ESCULTURAS DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Vicerrectorado de Coordinación de Cultura y Territorio. UPV. 2001, ISBN 84-9705-117-3.
- EUROPEAN COMMISSION. *Baroque artificial marble*. Environmental impacts, degradation and protection. Enviart. Edited by Christian Wittenburg. Contract nº ENV 4-CT 95-0103. Research report nº 9. 1999.

- FERNÁNDEZ ARROLA, A.: Comportamiento de tres resinas sintéticas termoendurecibles utilizadas como aglutinante de morteros para su aplicación en la realización de réplicas de escudos de armas alaveses como medida conservadora. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, Lejona, 1999.
- FERREIRA, A. P.; DELGADO, J.; COSTA, DR.: Behavior of water repellents in granites under accelerated ageing tests. Proc. 3rd Int. Symp. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo, Venecia, 1994.
- FERRER GRACIÁ, M^a. J.: Propuesta de intervención en edificios construidos con arenisca en el área de la Marina Alta, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Tesis doctoral, UPV. Valencia, 2003.
- FOGED, N.: Diatoms from the Alhambra, Granada, Spain. *Nova Hedwigia*, 27 (3/4):881-901, 1976.
- FOGED, N. Diatoms of fountains, reservoirs and some other humid and dry localities in Rome (Italy). *Nova Hedwigia*, 38: 433-470, 1983.
- FOLK, R. L.: Practical petrographic classification of limestone. *Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull.* V. 43, n° 1, 1951.
- FOLK, R. L.: Spectral subdivision of limestone types. En: W.E. Ham (ed) *Classification of carbonate rocks*. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1, 62-84, 1962.
- FORT, R ; BERNABEU, A. ; GARCÍA DEL CURA, M. A.; LÓPEZ DE AZCONA, M. C.; ORDÓÑEZ, S.; MINGARRO, F.: La Piedra de Novelda: una roca muy utilizada en el patrimonio arquitectónico. *Materiales de Construcción*, Vol. 52, n° 266, pp: 19, CSIC, abril/mayo/junio, 2002.
- FRANCOVICH, R.: La Cerámica Medievale a Siena e nella Toscana Meridionale (secc. XIV-XV), *Ricerche di Archeologia Altomedievale e Medievale*, N° 5-6, 1979.

- FURLAN, V., BISSEGGER, P.: Les mortiers anciens: Historie et essais d'analyse scientifique. *Revue Suisse d'Art et d'Archeologie*, vol 32, 166-178, 1975.
- FURLAN, V.; PANCELA, R.: Examen microscopique en lumière réfléchie de ciments, bétons et mortiers, *Chantiers*, 13 (11), 25-30, 1982.
- FUSEY, P.; HYVERT, G.: Les altérations physicochimiques et biologiques des gres des monuments Khmers. *Compets Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 258: 6573-6575. 1964.
- FUSEY, P.; HYVERT, G.: Biological deterioration of stone monuments in Cambodia. *Monograph of the Society for Chemical Industry*, 23: 125-129. 1966.
- GALÁN MARÍN, C.: Caracterización de u mortero polimérico con resina de poliéster insaturado y árido de albero para su aplicación en construcción. Tesis doctoral, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 2001.
- GARCÍA DE MIGUEL, J. M.; SÁNCHEZ, L.; PUCHE, O.; GONZÁLEZ AGUADO, M. T.: Study of the monumetal stone from Madrid district. 7th Int. Cong. On Deterioration and Conservation of Stone, 47-56. Lisboa, 1992.
- GARCÍA DE MIGUEL, J. M.; SÁNCHEZ, L.; PUCHE, O.; GONZÁLEZ AGUADO, M. T.: Characterization and deterioration causes of the Novelda Stone. III Int. Sym. On the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. 547-554, Venecia, 1994.
- GARCÍA GALLEGO, J.: Técnicas aplicadas de limpieza, consolidación y restitución, en *Tratamientos y Conservación de la piedra en los monumentos*, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid, pp. 65-82, Madrid, 1994.
- GARCÍA GALLEGO, J.: Réplica del techo de la Gran Sala de Polícromos de las Cuevas de Altamira. *Restauración y Rehabilitación*, nº1. Madrid, 1994.

- GARCÍA MURILLO, S.: Estudio de los procesos de bioalteración de la piedra de la Catedral de Pamplona. Tesis doctoral. Universidad de Navarra, Pamplona, 1995.
- GARCIA-ROWE, J.; SAIZ-JIMENEZ, C.: Lichens and Bryophytes as Agents of Deterioration of Building Materials in Spanish Cathedrals. *International Biodeterioration* 28: 151-163. 1991.
- GARCÍA, S.: El estado de conservación de la piedra de la Catedral de Pamplona afectada por organismos vivos. *GOROSTI. Cuadernos de CCNN de Navarra*, nº 12, 1996.
- GARCÍA VALLÉS, M.; BLAZQUEZ, F.; MOLERA, J. VENDRELL SAZ, M.: Studies of patinas and decay mechanisms leading to the restoration of Santa María de Montblanc (Catalonia, Spain). *Studies in Conservation*, 41, 1996.
- GARCÍA VALLÉS, M.; VENDRELL SAZ, M.; MOLERA, J.: Patinations as a constructive and destructive process: the case of "Reails Collegis"(16th century, Catalonia, Spain). *International Institute of Restauration of Buildings and Monuments*, 2(5), 1996.
- GARÍN ORTIZ, F. M^a. et al.: Catálogo Monumental de la Ciudad de Valencia, Valencia, 1983.
- GASPAR TEBAR, D.: El yeso. Aplicaciones en restauración. Propiedades y características. III Curso Internacional de Conservación y Restauración del Patrimonio: Yaserías y Estucos. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid. 1995.
- GEHRMANN, C. K.; PETERSEN, K.; KRUMBEIN, W. E.: Silicole and calcicole lichens on jewish tombstones - Interactions with environment and biocorrosion, In: VIth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Suppl. Vol., pp: 33-38. 1989.
- GIACCONE, G. ; VELLOCCIA RINALDI, M. L. ; GIACOBINI, C. : Forme biologiche delle alghe esistenti sulle sculture all'aperto. In: R. Rossi-Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone I*, Bologna, pp: 245-266. 1976.

- GIACOBINI, C.; ROCCARDI, A.; TIGLIÉ, I.: Introduzione. Ricerche sul biodeterioramento. In: G. Biscoutin, *Manutenzione e conservazione del costruito fra tradizione ed innovazione*. Scienza e Beni Culturali, LP Ed., Padova, pp: 687, 690. 1986.
- GILI BAS, E.: *Coloración de materias plásticas*. Centro español de plásticos. 1990.
- GISBERT AGUILAR, J. y CARRILLO VIGIL, L.: *Tipos de rocas. Bloque I Rocas: propiedades y criterios de calidad*. Fundación Uncastillo. Dpto. Geología. Universidad de Zaragoza. Equipo Arbotante, 2001.
- GIUSTI, A.: *Sculture da Conservare*. Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, Orificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro di Firenze. Editore Vallardi & Associati, 1990, Firenze.
- GÓMEZ LOPERA, F.: *Estudio para la restauración de algunos monumentos de Valencia. Análisis de la alteración de la piedra*, Tesis doctoral, UPV, Valencia, 1985.
- GORBUSHINA, A. A.; LYAKOVA, N. N.; VLASOV, D. Yu.; KHIZHNYAK, T. V.: *Microbial Communities on the Monuments of Moscow and St. Petersburg: Biodiversity and Trophic Relations*. *Microbiology*, 71 (3): 350-356. 2002.
- GRABAU, A. W.: *Principles of stratigraphy*. New York. A. G. Seiler & Co., 1913.
- GRIFFIN, P. S.; INDICTOR, N.; KOESTLER, R. J.: *The biodeterioration of stone, a review of deterioration mechanisms: Conservation case histories and treatment*. *International Biodeterioration*, 28, 1991.
- GROSSI, G. M.; ESBERT, R.: *Las sales solubles en el deterioro de las rocas monumentales. Revisión bibliográfica*. *Materiales de construcción*, Vol. 44, nº 235, pp.15-30, 1994.
- GROTH, I.; SAIZ-JIMENEZ, C.: *Actinomycetes in hypogean environments*. *Geomicrobiology Journal*, 16:1-8. 1999.

GUERRERO MONTES, M. A.: Diagnóstico del estado de alteración de la piedra del palacio consistorial de Sevilla. Universidad de Sevilla. Tesis Doctoral (1990).

GUERRERO MONTES, M. A.; VALE, J.; FORTEZ, M.; VÁZQUEZ, M. A.; GALÁN, E.: Hydric behaviour and alterability of limestone as selection criteria for reposition. Proc. VI Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, 1988.

HAMBLIN, D. J.: Las primeras ciudades. Ed. Salvat. Barcelona 1977.

HENDERSON, M. E.; DUFF, R. B.: The release of metallic and silicate ions from minerals rock and soils by fungal activity. Journal of Science, Vol. 14, nº 2, 1964.

HUECK-VAN DER PLAS, E. H.: The biodeterioration of materials as a part of hylobiology. Material und Organismen 1 (1):5-34. 1965.

ICR-CNR: Microflora autotrofa ed eterotrofa: tecniche di indagine visiva. Normal 19/85, 1985.

IGLESIA, A.; GARCÍA DEL CURA, M. A.; ORDÓÑEZ, S.; BERNABEU, A.: Estudio de los filosilicatos de la Piedra Bateig (Neógeno de la Provincia de Alivante), Geogaceta, 23, pp: 79-83, 1998.

ÍÑIGUEZ HERRERO, J.: Altération des calcaires et des grès utilisés dans la construction. Ed Eyrolles, París, 1967.

Italian NORMAL Committee. Normativa Manufati Lapidei del CNR, Centro National del Restauro –ICR. Istituto Centrale del Restauro. NORMAL 7/81. Assorbimento d'acqua per immersione totale: capacità di imbibizione. Rome, 1981.

JAIN, K. K.; MISHRA, A. K.; SINGH, T.: Biodeterioration of Stone: a review of mechanisms involved. In: K.L.Garg, Neelima Garg, and K.G.Mukerji (eds.), Recent Advances in Biodeterioration and Biodegradation, vol.1, Naya Prokash, Calcutta, pp: 323-354. 1993.

JEDREZEJEWSKA, H.: Old mortar in Poland: A new method of investigation. Studies in Conservation, 5, nº 4, 132-138, 1960.

- JOHNSON, J. HARLAN: An introduction to the study of organic limestones. Colorado Sch. Mines Quart. vol. 146, nº 2, 1951.
- JONES, D.; WILSON, M. J.: Chemical activity of lichens on mineral surfaces. A review, en Int. Biodet. Bulletin 21 (2), 1985.
- KELLER, N. D.; FREDERICKSON, A. F.: The rol of plants and colloid acids in the mechanisms of weathering, en American Journal of Sciences, 250, 1952.
- KENYON, K.: Excavations at Jericho, vol 3 y 4, Londres 1981-1982.
- KIESLINGER, A.: Les principaux facteurs d'altération des pierres à bâtir. Colloques sur l'altération des pierres. Pub. Conseil Internat. Monum. et des Sites (ICOMOS), París, 1968.
- KOESTLER, R. J.; CHAROLA, A. E.; WYPSKI, M.; LEE, J. J.: Microbiologically induced deterioration of dolomitic and calcitic stone as viewed by scanning electron microscopy. In: G. Felix (ed.), Proceedings of the. 5th Int. congress on deterioration and conservation of stone, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Vol. 2., pp. 617-626. 1985.
- KOESTLER, R.J.; SANTORO, E.D.; PREUSSER, F.; RODARTE, A.: A note on the reaction of methyl tri methoxy silane to mixed cultures of microorganisms. Biodeterioration Research, 1, 1986.
- KOESTLER, R. J., SANTORO, E. D.: Assessments of the susceptibility to biodeterioration of selected polymers and resins. To report to the Getty Conservation institute, California, 1988.
- KOESTLER, R. J.; WARSCHEID, T. H.; NIETO, F.: Biodeteioration risk factors and their management. In: Snethlage, R., Baer, N. S. (eds), Saving our Cultural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures. Wiley, New York, 1997.
- KOESTLER, R.. J.: Polymers as food for microbes. En: Ciferri, Tiano & Mastromei (eds.) Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage;

- pp. 153-168. Klewer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000.
- KORSHAK, V. V.; VINOGRADA, S. V.: Polyesters. Pergamon. Press. Oxford, 1965.
- KOUZELI, K.: Black crust removal methods in use. Their effects on pentelic marble surfaces. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa. 1992.
- KRYNINE, P. D.: The megascopic study and field classification of sedimentary rocks. Jour Geology. vol. 56, nº 2, pp. 130-165, 1948.
- KRUMBLEIN, W. E.; POCHON, J.: Ecologie bastérienne des pierres altérées des monumnets. Annales de l'Institut Pasteur, t.107, n. 4142, París, 1964.
- KRUMBEIN, W. E.; DIAKUMAKU; PETERSON; WARSCHEID; URZÌ, C.: Interactions of microbes with consolidants and biocides used in the Conservation of rocks and mural paintings. In: M.J. Thiel (ed.), Conservation of Stone and Other Materials, Vol. 2: Prevention and treatments, Paris, pp: 589 - 596. 1993.
- KUMAR, R.; GINELL, W.S.: Evaluation of consolidants for stabilization of weak maya limestone, Int. Coll. Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, Roma 19/21, 1995.
- KUMAR, R., y otros. Biodeterioration of stone in tropical environments: an overview. The Getty Conservation Institute, California. 1999.
- LABORDA, F; ORTIZ, M. L.; ARROYO, I.: Microbiological study carried out on the roman aqueduct at Segovia (Spain). La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo. Atti del 3° Simposio Internazionale, pp. 359-363. Venezia, 1994.
- LAFFARGA OSTERET, J., OLIVARES SANTIAGO, M.: Materiales de construcción. Tecnología de la Arquitectura y de la Construcción. EDITAN, 119, 1995.

- LAFFARGA OSTERET, J., OLIVARES SANTIAGO, M.: Los materiales composites y su aplicación en la ejecución de obras arquitectónicas. Asociación española de materiales compuestos. Actas del I Congreso Nacional de Materiales Compuestos, pp. 539, Sevilla, 1995.
- LARA ORTEGA, S. et al.: La Lonja, Un monumento del II para el III milenio. Delegación de Cultura. Ajuntament de València. Fundación Valencia III Milenio, 2000.
- LATORRE LLORENS, F.: Inventario, catalogación y sistematización de las canteras históricas utilizadas en la construcción de los edificios de la ciudad de Valencia. Master técnicas de intervención en el Patrimonio Arquitectónico. Obra inédita. 1992.
- LAURENZI TABASSO, M. y MECCHI, A.M., “Studio di protettivi per marmo”. ICR, Rapporto interno, 1985.
- LAURENZI TABASSO, M.; SAMMURI, P.: Evaluation of mortars for use in conservation from the standpoint of the release of soluble salts. Preprints of the 7th ICOM Triennial Meeting, Copenhagen, 1984.
- LAZZARINI, L.; FASSINA, V.: Studio Scientifico sullo stato de conservazione delle Pierre e dei marmi della porta della Carta-Venecia. Tai. 3^o Cong. Int. Deterioramento e Conservazione della pietra. Venecia, 1979.
- LAZZARINI, L.; LAURENZI TABASSO, M.: Il Restauro della Pietra, CEDAM, Padova, 1986.
- LEWIN S. Z.; CHAROLA, E.: Scanning electrón microscopy in the diagnosis of diseased stone. Scanning electrón microscopy, vol I, 1972.
- LUCKART, S.: Stone deterioration at the Cologne Cathedral due to air pollution, The Conservation of Stone, Bologna, 1975.
- MALINOSWIKI, R.: Ancient mortars and concretes, durability aspects. Mortars, cements and grout used in Conservation of Historic

- Buildings. Proceeding of the Symposium, ICCROM, Rome, pp:341-350, 1981.
- MAMILLAN, M.: La gelivite des materiaux. Aun. Inst. Tech. Bât. Frav. Pub, nº 235-236, Paris, 1967.
- MARTÍNEZ RAMÍREZ, S. et al.: Effects of “acid rain” on the degradation of lime mortar. Proc. 8th Int. Cong. on Deterioration and conservation of stone, Berlin, 1996.
- MASCIA, L.: Los efectos de los aditivos en los plásticos. Ed. INDEX, pp:12, 1974.
- MAS I BARBERÀ, X.: Estudio y desarrollo de morteros compuestos a partir de micronizados de material pétreo y aglomerantes sintéticos, aplicados a solucionar problemas de sellados, reposiciones y réplicas de elementos escultórico-ornamentales del Patrimonio Artístico. Trabajo de investigación. Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universidad Politécnica de Valencia, 2004.
- MAS I BARBERÀ, X.; GRAFIÀ SALES, J. V.; SANMIGUEL SAMPEDRO, L.; MARCO GISBERT, S.; ORTÍ MATEU, V.; ROIG SALOM, J.: Aplicación de un nuevo material filmógeno como desmoldeante -interfaz soporte/elastómero- en la reproducción de piezas porosas. 16th International Meeting on Heritage Conservation, Valencia, 2006.
- MAS TOMÁS, M. A.: Hacia una metodología de actuación de la restauración de edificios construidos en piedra. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Valencia, 1990.
- MATTEINI, M.; MOLES, A.; TOSINI, I.: Interazioni tra i materiali costitutivi dei manuffati e le sostanze utilizzate per il calco : controllo di alcune procedure. De Sculture da Conservare. Ministero per i Beni Culturali a Ambientali, Orificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro di Firenze. Editto da Vallardi & Associati, 1990, Firenze.

- MAY, E.; LEWIS, F. J.; PEREIRA, S.; TAYLER, S.; SEAWARD M. R. D.; ALLSOPP, D.: Microbial deterioration of building stone: a review. *Biodeterioration Abstracts* 7 (2): 109-123. 1993.
- MAY, E.: Microbes on building stone- for good or ill? *Culture*, 24 (2): 5-8. 2003.
- MAZZOLA, M.; FREDIANI, P.; BRACCI, S.; SALVINI, A.: New strategies for the síntesis of partially fluorinated acrylic polymers as possible materials for the protection of stone monuments. *European Polymer Journal* 39:1995-2003.
- MELO, M. J.; BRACCI, S.; CAMAITI, M.; CHIANTORE, O.; PIACENTI, F.: Photodegradation of acrylic resins used in the conservation of stone. *Polymer Degradation and Stability* 66: 23-30. 1999.
- MISHRA, A. K.; GARG, K. L.; JAIN, K. K.; KAMLAKAR, G.; RAO, V. P.: Microbiological deterioration of stone: an overview. In: G.Kamlakar and V. Pandit Rao (eds.), *Conservation, Preservation and Restoration: Traditions, Trends and Techniques*, Birla Archeological and Cultural Reseach Institute, Hyderabad, pp: 217-228. 1995.
- MIRWALD, P.W.; ZULMANZIG, J.: The influence of air pollution on natural stone. *Goldschmidt informiert*, 1/86, pp.10-19, 1986.
- MIRAVETE, A.; LARRODÉ, E.; CASTEJÓN, L.; CLEMENTE, R.; JIMÉNEZ, M. A.; LIZARANZU, M.; CUARTERO, J.; REVUELTA, D.; MILLÁN, C.; CALVO, J.; TOLOSANA, N.; PERALTA, J. L.: *Materiales compuestos I y II*. INO Reproducciones S.A. Zaragoza, 2000.
- MORTON, I. H. G.; GREENWAY, D. L. A.; GAYLARDE, C. C.; SURMAN, S. B.: Consideration of some implications of the resistance of biofilms to biocides. *International Biodeterioration and Biodegradation* 41: 247-259. 1998.
- NUGARI, M. P.; PIETRINI, A. M.: Trevi fountain: an evaluation of inhibition effect of water repellents on cyanobacteria and algae. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 40 (2-4), 1997.

- ODDY, W. A.; BLACKSHAW, S. M.; BAKER, S.: The consolidation of limestone sculptures with polyethylene glycol for indoor display. Proc. of the Int. Congr., The Conservation of Stone I, pp.485-497, Bologna, 1976.
- OLIVARES SANTIAGO, M.; GALÁN MARÍN, C.; ROA FERNÁNDEZ, J.: Los Composites: características y aplicaciones en la edificación. Informes de la construcción, Vol. 54, nº 484, 2003.
- OLIVEIRA, M. M.; FASCIO, M.; SANTIAGO, C.C.; AMARAL, A. M.: Behavior of lithic surfaces treated with carnauba wax. Proc. 8th Int. Cong. on Deterioration and conservation of stone, Berlin, 1996.
- ORDAZ, J.; ESBERT, R.: Glosario de términos relacionados con el deterioro de las piedras de construcción. Materiales de construcción, vol. 38, nº 209, 1988.
- ORDÓÑEZ, S.; CARCÍA DEL CURA, M. A.; FORT, R.; LOUIS, M.; LÓPEZ DE AZCONA, M. C.; MINGARRO, M.: Physical properties and petrographic characteristics of some Bateig stone varieties. En 7th Int. Cong. International Association of Engineering Geology, pp: 3595-3603, Rotterdam, 1994.
- ORTEGA-CALVO, J. J.; HERNANDEZ-MARINE, M.; SAIZ-JIMENEZ, C.: Mechanical deterioration of building stones by cyanobacteria and algae. Biodeterioration and Biodegradation, 8. 1990.
- ORTEGA CALVO, J. J.; HERNANDEZ MARINE, M.; SAIZ JIMENEZ, C.: Experimental strategies for investigating algal deterioration of stone. 7^o International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisboa, 15-18 jun.1992.
- ORTEGA-CALVO, J. J.; HERNÁNDEZ-MARINÉ, M. C.; SAIZ-JIMENEZ, C.: Cyanobacteria and algae on historic buildings and monuments. Recent advances in Biodeterioration and Biodegradation, I: 173-203, 1993.
- ORTEGA HUERTAS, M.; DE LA TORRE LÓPEZ, M. J.: La microscopía electrónica de barrido. Aplicaciones en el estudio y

- conservación del Patrimonio Histórico. En cuadernos Técnicos, 2. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 1996.
- PAINÉ, S. G.; LINGGOOD, F. V.; SCHIMMER, F.; TRUPP, T.C.: The Relationship of micro-organisms to the decay of stone. Philosophical transactions of the Royal Society, London, 1933.
- PARDO JUEZ, A. Técnicas de replicado para piezas paleontológicas. Universidad de Zaragoza. 1991.
- PAULY, J. P.: Maladie alvéolaire conditions de formation et d'évolution. Symposio : de Conservation of Stone I. Bologna, 1976.
- PETERMANN, J.; BOLÍVAR GALIANO, F.; MAS-BARBERÀ, X.; UCEDA, B.; PORTERO DE LA TORRE, R: Studies of the efficiency of the biozyde New Des incorporated in artificial stone composed of ground natural stone and a commercial acrylic resin concerning the growth of algae. 13th International Biodeterioration and Biodegradation Symposium. Madrid, 2005.
- PETTIJOHN, F. J.: Rocas sedimentarias. Ed. Eudeba. Buenos Aires, 1970.
- PETUSHKOVA, J.; KANDYBA, P.: Aeromicrobiological studies in the Moscow cathedrals. Aerobiologia 15: 193- 201. 1999.
- PINGARRÓN, F. Arquitectura religiosa del siglo XVII en la ciudad de Valencia. Colección estudis 12. Ajuntament de València, 1998.
- PITARCH ROIG, A. M.; VALIENTE SOLER, J. M.; AZNAR MOLA, J.: Materiales de construcción: Conglomerados: pastas, morteros y preliminares de hormigón. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial UPV, pp 20, Valencia, 2003.
- POCHON, J.; COPPIER, O.: Rôle des bacterias sulfato-reductrices dans l'altération biologique des pierres des Monuments. Comp. Rend. Acad. Sciences, 1950.

- POCHON, J.; JATON, C.: The role of microbiological agencies in the deterioration of stone. *Chemistry and Industry*, 9: 1587-1589. 1967.
- POCHON, J.; JATON, C.: Biological factors in the alteration of stone, *Biodeterioration of Materials*, Elsevier, Amsterdam, 1968.
- POMBO, S.; NICHOLSON, K.; URQUHART, C.M.: Effects of artificial weathering on the porosity and physical properties of two Scottish sandstone. *Proc. 4th Int. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Rhodes, 1997.
- PORTERO DE LA TORRE, R.; BOLÍVAR GALIANO, F.; MAS-BARBERÀ, X.; DOMÉNECH CARBÓ, M^a T.; PETERMAN, J.: Estudio de la eficacia del biocida Biotin N incorporado en piedra artificial compuesta por un agregado de piedra natural y resina acrílica comercial atendiendo al crecimiento de algas. *16th International Meeting on Heritage Conservation*, 2006.
- PLESTER, J.: Cross sections and chemical analysis of paint samples, *Studies in Conservation*, London, 1956.
- PROSPER I SORIANO M^a. P.; MATAS I GARCIA, J. M.: Arquitectura civil i religiosa en la Ciutat de València. *Lo Rat Penat. Ajuntament de València. Delegació de Cultura*, 1996.
- RAMOS CARPIO, M. A.; DE MARÍA RUIZ, M. R.: Ingeniería de los materiales plásticos, Ed. Díaz de Santos. pp: 199, Madrid, 1988.
- RENISON, G. C.: Consideraciones y criterios que determinan el tipo de mezclas a utilizar en trabajos de albañilería, (Internet: <http://www.construir.com/C/consulta/Renison/document/mezcla.htm>), 2000.
- RICCI, S.; PIETRINI, A. M.: Caratterizzazione della microflora algale presente sulla fontana dei Quattro Fiumi, Roma. *III. Int.Symp.on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. 1994.
- RICHARDSON, B. A.: Control of moss, lichen and algae on stone. In: R.Rossi-Manaresi (Ed.), *The Conservation of Stone I*, Bologna, pp: 225- 231. 1976.

- RIECKEN, B.; SCHWAMBORN, B.: Laboratory simulation of aggressive climatic conditions-theoretical background and experimental results. Int. Coll. Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, Roma 19/21, 1995.
- RILEM. Reunión Internatinales des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux de et les Construccions. Comm. Pierres, Groupe 25 PEM. Essais Recommandés Pour Mesurer L'altération Des Pierres Et Evaluer L'efficacité Des Méthodes De Traitement. Protection Et Erosion Des Monuments. Essai n° V.3 : Tenue au gel, 1980, pp. 238-244.
- RILEM. Reunión Internatinales des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux de et les Construccions. Comm. Pierres, Groupe 25 PEM. Essais Recommandés Pour Mesurer L'altération Des Pierres Et Evaluer L'efficacité Des Méthodes De Traitement. Protection Et Erosion Des Monuments. Essai n° V. 1b : Cristallisation par immersion totale, 1980, pp. 234-236.
- RIVAS, T. ; PRIETO, B. ; SILVA, B.: Gypsum formation in granitic rocks by dry deposition of SO₂. Proc. Int. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes, 1997.
- ROIG SALOM, J. L.: Estudio de la alteración de materiales pétreos en los monumentos de la ciudad de Valencia. Posibles tratamientos de conservación. Tesis doctoral. Facultad de Bellas Artes. Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universidad Politécnica de Valencia, 1995.
- ROIG SALOM, J. L.: Restauración y realización de réplicas de dos estatuas del Puente de Aragón. La Universidad Politécnica Restaura, Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universidad Politécnica de Valencia, 1997, Valencia.
- ROIG SALOM, J. L. et al.: Memoria del Proyecto I+D : GV99-178-1-15. Conselleria de Cultura, Educació i Esport de la Generalitat Valenciana.
- ROIG SALOM, J. L.: Restauración de las estatuas de la fachada de la Iglesia Parroquial de Vallada, Valencia. La Universidad Politécnica

Restaura, Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universidad Politécnica de Valencia, 2001, Valencia.

ROIG-SALOM, J. L.; DOMÉNECH-CARBÓ, M. T.; DE LA CRUZ-CAÑIZARES, J.; BOLÍVAR-GALIANO, F.; PELUFO-CARBONELL, M. J.; PERAZA-ZURITA, Y.: (2003) SEM/EDX and vis spectrophotometry study of the stability of resin-bound mortars used for casting replicas and filling missing parts of historic stone fountains. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 375 (8): 1176-1181.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M.; TORRACA, G.: Note on conservation treatment of stone objects. Deterioration and protection of stone monuments. *Proce. Int. Symp.*, pp.6-12, Paris, 1978.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M.: Characterization of stuccoes for the restoration of stone: some considerations. Summary in *Pro. Of the Ivth Int. Symp., Deter. And conserv. of stone*, Lousville, 1982.

ROSIER, P. *Le moulage*. Ed. Dessain et Tolra. 1998.

ROTA ROSSI-DORIA, P.: Mortars for restoration: basic requirements and quality control. *Materiaux et construction*. Vol 19, n° 114, pp: 445-448, 1986.

ROTA ROSSI-DORIA, P.: Report on the RILEM Workshop Ancient mortars and mortars for restoration. *Materiaux et construction*. Vol 23, pp: 235-238, 1990.

ROYUELA TAMAYO, F.; FERNÁNDEZ CANOVAS, M.: Las resinas epoxi: terapéutica eficaz para algunas patologías de la construcción. Conferencias técnicas sobre resinas epoxi en la construcción. Barcelona, 1978.

RUDOLF, J.: *El libro de la química moderna*. Barcelona, 1973.

SAIZ-JIMENEZ, C.: Biogeochemistry of Weathering processes in monuments. *Geomicrobiology Journal*, 16: 27-37. 1999.

- SANTIAGO GODOS, V.: La restauración de la piedra natural. Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración, colocación, Capítulo 24, Madrid, 1996.
- SABBIONI, C.: Characterization of atmospheric particles on monuments by scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray analices. *Electron microscopy*, 2, 1992.
- SAMENÑO PUERTO, M.: Factores biológicos de alteración. En Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Cuadernos Técnicos nº 8. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Junta de Andalucía Consejería de cultura. Granada, 2003.
- SAN ANDRES, M.; TIJERO, J.: Amarilleamiento de barnices y fijativos por exposición a la luz ultravioleta, Actas del VIII Congreso de Conservación y restauración de Bienes Culturales, Valencia 20-23 septiembre, 1990.
- SÁNCHEZ LÓPEZ, S.: Aditivos para materiales plásticos: antioxidantes y estabilizadores de U.V. Grupo Noriega Editores. Editorial LIMUSA, S.A. 1992.
- SANTIAGO GODOS, V.: La restauración de la piedra natural, en Manual de Rocas Ornamentales: prospección, explotación, elaboración y colocación, Entorno Gráfico S. L., Madrid, 1996.
- SANTINI, M.: Applicazione del metodo spettrofotometrico nelle determinazioni colorimetriche sui dipinti, *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro*, N° 23-24, IPZS, Roma, 1955.
- SBORDONI-MORA, L.: Les materiaux des enduits traditionels. Mortars, cements and grout used in Conservation of Historic Buildings. Proceeding of the Symposium, ICCROM, Rome, pp: 375-383, 1990.
- SCHAFFER, R.J.: The effects of air pollution on building on stone works, p.75, Londres, 1975.
- SCHUMANN, W.: Guía de los minerales y de las piedras preciosas. Ed. Omega, 381, 1987.

- SELWITZ, CH.: Epoxy resins in Stone Conservation. Research in Conservation, The Getty Conservation Institute, Los Ángeles, 1992.
- SERRA, M.; SARACE, G.: Study of the reactions between gaseous sulphur dioxide and calcium carbonate. Collogne International. UNESCO-RILEM, 3.7, Paris, 1978.
- SIKIOTIS, D.; KIRKITSOS, P.: The adverse effects of gaseous nitric acid on stone monuments. Proc. 3rd Int. Symp. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo, Venezia, 1994.
- SNEYERS, R. V.; HENAU, P. J.: La Conservación de la piedra. La Conservación de los Bienes Culturales. Museos y Monumentos, XI. UNESCO, 223-249, Paris, 1969.
- STZELLEZYK, A. B.: Microbial biodeterioration: stone. Economic microbiology, Vol 6, Academic Press, London, 1981.
- SUÁREZ, L.; REGUEIRO, M.: Áridos naturales y de machaqueo para la construcción. 2^a Ed. Publicación especial n^o 9 sobre Ingeniería Geológica. Colegio Oficial de Geólogos de España, pp: 131, 1994.
- TABASSO, M. L.; MECCHI, A. M.: Envejecimiento natural y artificial para evaluar los tratamientos para impermeabilización del mármol, Materiales de construcción Vol. 42, n^o 226, 1992.
- TAKAMURA, N.; FUNIE, K.; WATANABE, M. M.: Unique response of Cyanophyceae to copper. Journal of Applied Phycology, 2: 293-296. 1990.
- TENNENT, N. H.; TOWNSEND, J. H.: The photofading of dyestuffs in epoxy, polyester and acrylic resins, Preprints of the 7th Triennial Meeting ICOM Committee for Conservation, Copenhagen, 10-14 septiembre, 1984.
- TIANO, P.: Problemi biologici nella conservazione delle opere in marmo esposte all'aperto. In: Restauro del marmo. Opere e problemi, OPD Restauro, Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali, Firenze, pp: 47-53. 1986.

- TIANO, P.: Biological deterioration of exposed works of art made of stone. In: LHG Morton (ed.), *The biodeterioration of constructional materials*, Biodeterioration Society. Lancashire Pol., pp: 37-44. 1987.
- TIANO, P.; ACCOLLA, P.; TOMASELLI, L.: Effectiveness of some biocides against algal biodeterioration. In: M.J. Thiel (ed.), *Conservation of Stone and other Materials*, vol. 2: Prevention and treatments, Paris, pp: 573-580. 1993.
- TIANO, P.; CAMAITI, M.; ACCOLLA, P.: Methods for the evaluation of products against algal biocenosis of monumental fountains. In: *Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments*. ICCROM, Roma. 1995.
- TIANO, P.; BIAGIOTTI, L.; BRACCI, S.: Biodegradability of products used in monuments' conservation. En: Ciferri, Tiano & Mastromei (eds.) *Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*; pp.169- 181. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000.
- TITE, MS; MANIATIS, Y.: Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope. *Nature*, vol 257, 1975.
- TOMASELLI, L.; MARGHERI, M. C.; FLORENZANO, G.: Indagine sperimentale sul ruolo dei cianobatteri e delle microalghe nel deterioramento di monumenti e affreschi. In: 3° Congresso Internazionale sul Deterioramento e Conservazione della Pietra, Venezia, pp: 313- 325. 1979.
- TORRACA, G.: L'état actuel des connaissances sur les altérations des pierres. Causes et méthodes de traitement. *Rev. Matériaux et constructions RILEM*, n° 42, Vol. 7, Paris, 1974.
- TORRES BALBÁS, L.: Precedentes de la Decoración Hispanomusulmana. En *Crónica Arqueológica de la España Musulmana*. XXXVII. Al-Andalus, 407-435, 1955.
- TURCO, T.: *Il Gesso. Lavorazione, trasformazioni Impieghi*. Editore Ulrico Hoepli, Milano, 1990.

TWENHOFEL, W. H.: Principles of sedimentation. 2d ed. New York. Mc Graw-Hill Book Co. inc, 1950.

UNE. Instituto Español de Normalización. UNE-EN 196-1: 1996, Abril. Método de ensayos de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

URZÌ, C.; KRUMBEIN, W. E.: Microbial impacts on the Cultural Heritage. In: Durability and Change: The Science, Responsibility, and Cost of Sustaining Cultural Heritage. W.E. Krumbein, P. Brimbelcombe, D.E. Cosgrove and S. Staniforth (eds.), Wiley and Sons Ltd., Chichester, pp: 107-135, 1994.

URZÌ, C.; DE LEO, F.: Sampling with adhesive tape strips: an easy and rapid method to monitor microbial colonization on monument surfaces. *Journal of Microbiology Methods* 44:1-11. 2001.

VAILLANT CALLOL, M.; DOMÉNECH CARBÓ, M^a T.; VALENTÍN RODRIGO, N.: Una mirada hacia la conservación preventiva del Patrimonio Cultural, Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2003.

VALE, J. F.: Un sistema universal para experiencias de simulación ambiental, aplicación al estudio de la alteración de materiales pétreos en atmósferas contaminadas. Tesis doctoral. E. S. Ingenieros industriales. Univ. Sevilla, 1982.

VALLE, A. Changes in vapour water transmission of stone materials impregnated with silicon and acrylic resins. V Cong. Int. Sur L'Alteration et la conservation de la pierre. Lausanne. pp: 899-908, 1985.

VAN GRIEKEN, R.; FOBE, B.: Advanced micro-analytical techniques for the study of material deterioration. Advanced Workshop. "Analytical Methodologies for the Investigation and Damaged Stone". Pavia (Italy). 1990.

VAVENE, P. Sur la taille de la pierre antique, medievale y moderne. CNRS, 1975.

- VELILLA SÁNCHEZ, N.: Caracterización de rocas ornamentales y de construcción de uso en los edificios históricos. Cuadernos técnicos. Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Instituto andaluz del Patrimonio Histórico. 2003.
- VENDRELL SAZ, M.; KRUMBEIN, W.E.; URZI, C.; GARCIA VALLÉS, M.: Are patinas of Mediterranean monuments really related to the rock substrate? 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol.2, Berlin. 1996.
- VENUAT, M.: Aditivos y tratamientos de morteros y hormigones. Editores técnicos Asociados, S.A. Barcelona, pp: 29-50, 1972.
- VILES, H. A.; MOSES, C. A.: SEM based studies of the combined effects of salt and biological weathering on calcareous building stones. In: J. Riederer (ed.), Deterioration and Conservation of Stone, Proceedings of the Eight International Congress, Berlin, September 30- October 4, pp: 557- 561. 1996.
- VILLEGAS, R.: Efecto de la contaminación atmosférica sobre materiales pétreos. La alteración de la piedra de la Catedral de Sevilla. Estudios de tratamientos de conservación. Proyecto fin de carrera. E. S. Ingenieros Industriales. Univ. Sevilla, 1989.
- VILLEGAS, R.; VALE, J. F.: Evaluación de tratamientos de hidrofugación aplicados a piedras de Catedrales andaluzas II. Ensayo de alteración acelerada en atmósfera contaminada. Materiales de construcción, Vol. 43, n° 232, 1993.
- VV. AA. "Ravalement des façades. Choix des méthodes de nettoyage". Centre Scientifique et Technique de la Construction. Note de Information Technique 121, p.14, Bruxelles, 1978.
- WARKE, P. A.; SMITH, B. J.: Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests. *Geomorphology* 22: 347-357. 1998.
- WARSCHEID, T.; KRUMBEIN, W. E.: Biodeterioration studies on soapstone, quartzite and sandstone of historical monuments in Brazil and Germany: Preliminary results and evaluation for

- restoration practices. In: J. Delgado Rodrigues, F. Henriques and F. Telmo Jeremias (eds.), 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Portugal, pp: 491-500. 1992.
- WEBER, H.; ZINSMEISTER, K.: Conservation of natural stone. Guidelines to Consolidation, Restoration and Preservation. Expert-Verlag, Munich, 1990.
- WEBLEY, D. M.; HENDERSON, M. E. F.; TAYLOR, E. F.: The microbiology of rocks and weathered stones. *Journal of Soil Science* 14: 102-112, 1963.
- WENDLER, E.; PRASARTSET, C.: Lychen growth on old Khmer-style sandstone monuments in Thailand: damage factor or shelter? In: ICOM-CC 12th Triennial Meeting, Lyon. Vol. II, pp: 750-755. 1999.
- WILSON, J. L.: Carbonate facies in Geologic History, Springer-Verlag, New York, 1975.
- WILLIAMS, D. E.; COLEMAN, N. T.: Cation exchange properties of plant root surfaces, en *Plant and Soil*, II, 1950.
- WINKLER, E. M.: Decay of Stone. ICC Conference on Conservation of stone and wooden objects, Vol I, New York, 1970.
- WINKLER, E. M.: Stone decay by plants and animals. En *Stone Properties, durability in Man's Environment*, Springer Verlag, New York, 1975.
- WINKLER, E. M.: Simple field determination of stone coors, Colloque International UNESCO-RILEM, Paris, 1978.
- WOLLENIEN, U.; DE HOOG, G. S.; KRUMBEIN, W. E.; URZÌ, C.: On the isolation of microcolonial fungi occurring on and in marble and other calcareous rocks. *The Science of the Total Environment* 167: 287-294. 1995.
- YATES, T.; BUTLIN, R.: Predicting the weathering of Portland limestone buildings. In: B.J. Smith, P.A. Warke (eds.), *Processes of Urban Stone Decay*, Proceedings of SWAPNET '95, Belfast, May 19-20, pp: 194-204. 1996.

YOUNG, G.S.; WAINWRIGHT, I.: The control of algal biodeterioration of a marble petroglyph site. *Studies in Conservation*, 40 (2), 1995.

ZANARDINI, E.; BRUNI, S.; CARIATI, F.; SORLINI, C.: Investigation on red alterations present on the marbles of various artistic stoneworks. 3^{er}d International Conference on Biodeterioration of Cultural Property, 4-7 July 1995, Bangkok. (ICBCP-3), 1995.

ZANARDINI, E.; ABBRUSCATO, P.; GHEDINI, N.; REALINI, M.; SORLINI, C.: Influence of atmospheric pollutants on the biodeterioration of stone. *International Biodeterioration & Biodegradation*, (45): 35-42. 2000.

15.2. BIBLIOGRAFÍA

A.H.M.V. Llibre de Sotsobrería de Murs i Valls (1380-1631) Año 1395-1396 n° 7. Sig d 3

BORGIOLI, L. Polimeri di sintesi per la conservazione della pietra, Collana i Talenti, Il Prato, 2002.

CABRERA GARRIDO, J.M.: Causas de alteración y métodos de conservación aplicables a monumentos hechos con piedra. *Revista Materiales de Construcción*, n° 147, p.8, 1979.

DE LA TORRE, M. J. Et al (1992): Characterization of mortars in the Alcaraba of the Alhambra (Granada, Spain). 7th. Int. Congr. On Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa.

Doc. NORMAL 1/80: Alterzione Microscopiche del materiali lapidei. Lécico, C.N.R., Roma, 1980.

El trabajo de la piedra. Guía práctica de la cantería. 3^a Edición. Escuela taller de restauración. Centro histórico de León. Editorial Los Oficios S.L. León. 1993. ISBN 8487469450.

KOTLIK, P. Et al. Some ways of polymerizing methyl metacrylate in sandstone. *Studies in Conservation*, 25. pp: 1-13, 1980

Mármoles de España. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. ISBN 847840063 X. 1991.

OLIVARES SANTIAGO, M.: Composites: los nuevos materiales de la construcción. Composición y características técnicas. In: *Façanes lleugeres, els nous plafons*. Col·legi d'aparelladors i arquitectes tècnics de Barcelona. Barcelona, 1997.

VALLE, A. et al.: Changes in vapour water transmission of stone materials impregnated with silicon and acrylic resins. V Cong. Int. *Sur l'alteration et la conservation de la pierre*. Lausanne. pp: 899-908, 1985.

15.3. WEBS.

<http://aata.getty.edu/NPS/>

<http://www.mailxmail.com>

<http://www.dowcorning.com/>

http://www.ge-iic.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1

<http://www.rehabilit.es/>

<http://www.productosjemg.com/jemg.html>

<http://www2.rgu.ac.uk/schools/mcrg/mcrghome.htm>

<http://www.materialconnexion.com/PA1.asp>

<http://www.mpa.es/>

<http://www.phaseitalia.it>

<http://www.productosdeconservacion.com/inicio.htm>

<http://www.weber-cemarksa.es/>

<http://www.rohmhaas.com/>

http://www.rhodia.com/us/home_tunel.asp

<http://www.chemia.com.ar/Contactese.htm>

<http://www.ctseurope.com>

<http://www.matls.com>

<http://composite.about.com>

<http://www.centor.com>

<http://www.idesinc.com>

<http://nobelium.berkeley.edu/%7Elpruitt/me223/dbase.html>

<http://setas%2Dwww.larc.nasa.gov/LDEF/index.html>

