

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Química

Materiales pétreos empleados en monumentos.  
Estudio de características físicas y alterabilidad por  
factores ambientales

Autor: Carlos Gutiérrez Acal

Tutor: Rosario Villegas Sánchez

**Dpto. Ingeniería Química y Ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Química

**Materiales pétreos empleados en monumentos.  
Estudio de características físicas y alterabilidad por  
factores ambientales**

Autor:

Carlos Gutiérrez Acal

Tutor:

Rosario Villegas Sánchez

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Trabajo Fin de Grado: Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales

Autor: Carlos Gutiérrez Acal

Tutor: Rosario Villegas Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

*Sevilla, 2023*

---

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

## Agradecimientos

---

*A mis padres, que aún sin ver el final no dejaron de creer*

*A mi perro, que durmió largas horas mientras yo escribía*

*Y a mis abuelos, que no han podido ver el final*

*Sevilla, 2023*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>8</b>
<b>Índice</b>	<b>10</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>11</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>12</b>
<b>1 Introducción y objetivo</b>	<b>15</b>
<b>2 Antecedentes</b>	<b>16</b>
2.1. <i>Rocas del Patrimonio Monumental andaluz y español</i>	16
2.2. <i>Estudios Previos</i>	24
2.3. <i>Descripción de los factores de alteración</i>	25
<b>3 Estudio Experimental</b>	<b>30</b>
3.1 <i>Introducción</i>	30
3.2 <i>Método</i>	31
3.3 <i>Materiales</i>	32
3.3.1 <i>Descripción de la piedra de la Cantera del puerto de Santa María</i>	32
3.3.2 <i>Descripción de la piedra de la Cantera de Murcia</i>	32
3.3.3 <i>Descripción de la piedra de la Cantera del Escorial</i>	32
3.3.4 <i>Descripción de la piedra de la Cantera de Jerez</i>	33
3.3.5 <i>Descripción de la piedra de la Cantera de Jaén</i>	34
3.4 <i>Descripción de los ensayos realizados</i>	35
3.4.1 <i>Determinación de la Porosidad y densidad</i>	35
3.4.2 <i>Colorimetría</i>	38
3.4.3 <i>Dureza</i>	40
3.4.4 <i>Absorción de agua por capilaridad</i>	42
3.4.5 <i>Peeling Test</i>	44
3.4.6 <i>Absorción de gota</i>	46
3.4.7 <i>Ensayo de alteración 1</i>	47
3.4.8 <i>Ensayo de alteración 2</i>	48
3.4.9 <i>Otros Ensayos</i>	49
<b>4 Resultados</b>	<b>50</b>
4.1 <i>Introducción</i>	50
4.2 <i>Resultados</i>	52
4.2.1 <i>Densidad y Porosidad</i>	52
4.2.2 <i>Colorimetría</i>	56
4.2.3 <i>Dureza</i>	58
4.2.4 <i>Absorción por Capilaridad</i>	61
4.2.5 <i>Peeling Test</i>	66
4.2.6 <i>Absorción de gota</i>	68
<b>5 Conclusiones</b>	<b>70</b>
<b>6 <u>Bibliografía</u></b>	<b>79</b>

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

7 Normas de ensayo

81

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

<i>Tabla 2-1. Factores de alteriación</i>	26
<i>Tabla 4-1. Especímenes seleccionados y su porosidad</i>	50
<i>Tabla 4-2. Resultados Densidad (g/cm<sup>3</sup>) y Porosidad (%)</i>	54
<i>Tabla 4-3. Comparativa resultados dureza ensayo alteración 1</i>	59
<i>Tabla 4-4. Comparativa resultados dureza ensayo alteración 2</i>	60
<i>Tabla 4-5. Incremento de peso al final de los ensayos de absorción por capilaridad</i>	64
<i>Tabla 4-6. Tasa de Absorción Capilar</i>	65
<i>Tabla 4-7. Masa (g) desprendida en antes y después de los ensayos de alteración</i>	67
<i>Tabla 5-1. Resultados generales</i>	70
<i>Tabla 5-2. Grupos de piedras ordenadas por porosidad</i>	72
<i>Tabla 5-3. Cambio final</i>	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

<i>Figura 2-2. Catedral de Murcia</i>	18
<i>Figura 2-3. Catedral del Escorial</i>	20
<i>Figura 2-4. Catedral de Jerez</i>	22
<i>Figura 2-5. Catedral de Jaén</i>	23
<i>Figura 3-1. Probetas de Murcia catalogadas</i>	36
<i>Figura 3-2. Probetas saturadas y Probetas tras periodo de vacío</i>	36
<i>Figura 3-3. Probeta saturada</i>	37
<i>Figura 3-4. Balanza modificada para la pesada hidrostática</i>	37
<i>Figura 3-5. Colorímetro Minolta</i>	39
<i>Figura 3-6. Proceso de medida del color</i>	39
<i>Figura 3-7. Durómetro</i>	40
<i>Figura 3-8. Proceso de medida de dureza</i>	41
<i>Figura 3-9. Preparación del ensayo de absorción de agua por capilaridad</i>	42
<i>Figura 3-10. Ensayo de absorción de agua por capilaridad</i>	43
<i>Figura 3-11. Muestras del peeling test</i>	44
<i>Figura 3-12. Realización del peeling test</i>	45
<i>Figura 3-13. Gota recién vertida</i>	46
<i>Figura 3-14. Detalle gota</i>	46
<i>Figura 3-15. Disposición horno ensayo alteración 1</i>	47
<i>Figura 3-16. Base de arena húmeda para el ensayo de alteración 2</i>	48
<i>Figura 4-1. Probetas seleccionadas para realizar los ensayos de alteración</i>	51
<i>Figura 4-2 Densidad vs Porosidad Pto Santa María</i>	53
<i>Figura 4-3 Densidad vs Porosidad Murcia</i>	53
<i>Figura 4-4 Densidad vs Porosidad Jerez</i>	53
<i>Figura 4-5 Densidad vs Porosidad Jaén</i>	53
<i>Figura 4-6 Densidad vs Porosidad El Escorial</i>	54
<i>Figura 4-7. Valores <math>\Delta E</math> en la Colorimetría</i>	56
<i>Figura 4-8. Diferencias de dureza</i>	58
<i>Figura 4-9. Absorción grupo 1 previo ensayo</i>	62
<i>Figura 4-10 .Absorción grupo 1 post ensayo</i>	62
<i>Figura 4-11. Absorción grupo 2 previo ensayo</i>	63
<i>Figura 4-12. Absorción grupo 2 post ensayo</i>	63
<i>Figura 4-13. Masa desprendida en Peeling Test</i>	66
<i>Figura 4-14. Incremento de tiempo de absorción de gota</i>	68
<i>Figura 5-1. Absorción por capilaridad previa vs post alteración</i>	74

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

---

La piedra ha sido y es un material de construcción muy usado a lo largo de la historia, en toda construcción de cierta envergadura, debido a sus propiedades técnicas y estéticas, entre ellas su durabilidad y su capacidad de resistir el deterioro. Sin embargo, existen muchos factores (externos e internos) que afectan a las construcciones y otras obras en piedra, causando su alteración. Las fuentes de deterioro pueden ser las características del material (composición química, propiedades mecánicas) o de otros materiales en contacto con él, las condiciones ambientales y los agentes antropogénicos (siendo la contaminación ambiental uno de los más relevantes).

Los materiales que se emplean en la construcción o la restauración de edificios deben someterse a pruebas que evalúen su durabilidad y resistencia frente a los agentes de deterioro ambiental. Para ello, se utilizan los ensayos de alteración acelerada, que simulan las condiciones extremas a las que pueden estar expuestos los materiales. Sin embargo, no todos los ensayos son igualmente aplicables a todos los materiales.

Por ejemplo, se considera que la piedra es poco sensible a cambios de temperatura y humedad, por lo que para caracterizar el cambio de propiedades bajo la alteración se emplean ensayos de helacididad o cristalización de sales.

El objetivo de este trabajo fin de carrera es analizar el comportamiento de diferentes tipos de piedra utilizados en la construcción de edificios históricos frente a los ensayos termohigrométricos, que simulan las condiciones ambientales a las que están expuestos estos materiales. Además, se pretende comparar los resultados obtenidos con dos variantes de este tipo de ensayo, que modifican algunos parámetros como la temperatura, la humedad o el tiempo de exposición.

## 2 ANTECEDENTES

---

### 2.1. Rocas del Patrimonio Monumental andaluz y español

#### 2.1.1. Historia de los monumentos y sus materiales constituyentes

##### 2.1.1.1. Piedra del Puerto de Santa María

La piedra arenisca es un tipo de roca sedimentaria formada por granos de arena cementados entre sí. Se caracteriza por su resistencia, durabilidad y variedad de colores y texturas. La piedra arenisca se ha utilizado desde la antigüedad para la construcción de edificios, monumentos y obras de arte.

En el Puerto de Santa María, una ciudad situada en la bahía de El Puerto de Santa María, junto al río Guadalete, se encuentra una importante fuente de piedra arenisca: la sierra de San Cristóbal. Esta sierra es un conjunto montañoso que forma parte del Parque Natural Los Alcornocales y que alberga varias canteras donde se extrae esta roca.

Tiene un color amarillento claro y una textura fina o gruesa según el tamaño de los granos. Su calidad y belleza la han convertido en un material muy apreciado para la arquitectura y la escultura. De hecho, muchos edificios históricos y religiosos tanto de la provincia de Cádiz como de Sevilla están contruidos con esta piedra.

La catedral de Sevilla (**Figura 2-1**) es uno de los monumentos más emblemáticos de la ciudad y del arte gótico en España. Su construcción se inició en el siglo XV sobre los restos de la antigua mezquita aljama, de la que se conservan la Giralda y el patio de los Naranjos. Para levantar este impresionante templo, se emplearon diferentes tipos de piedra procedentes de diversas canteras, siendo la más utilizada una calcarenita fosilífera de grano grueso que se extraía de la sierra de San Cristóbal, en el Puerto de Santa María (Cádiz). Esta piedra, que tiene un color amarillento y una textura rugosa, fue elegida por su abundancia, su facilidad para el transporte fluvial y su resistencia al paso del tiempo. Sin embargo, también presentaba algunos inconvenientes, como su dificultad para realizar trabajos finos o su tendencia a oscurecerse con la humedad. Por eso, en algunas partes de la catedral se usaron otras piedras más apropiadas para la decoración escultórica o arquitectónica, como el mármol blanco o el jaspado rojo. El uso de la piedra de la cantera de San Cristóbal en la catedral de Sevilla fue fundamental para darle su aspecto monumental y majestuoso, así como para reflejar la riqueza y el poder de la ciudad en aquella época.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.



*Figura 2-1. Catedral de Sevilla*

Otro ejemplo notable es el Castillo de San Marcos, una fortaleza medieval que fue residencia del rey Alfonso X el Sabio y sede del primer Cabildo Municipal del Puerto. El castillo tiene una planta cuadrangular con cuatro torres cilíndricas en las esquinas y una torre del homenaje en el centro. Su aspecto actual se debe a las reformas realizadas en los siglos XV y XVI que le dieron un estilo gótico-mudéjar. El castillo está construido con piedra ostionera (una roca formada por conchas marinas) y piedra arenisca. [1], [2].

### 2.1.1.2. Piedra de Murcia



*Figura 2-2. Catedral de Murcia*

La arenisca es una roca sedimentaria formada por granos de arena cementados por diversos minerales. Su color puede variar según la composición y el ambiente de formación, desde el blanco hasta el rojo o el verde. La arenisca se origina por la erosión y el transporte de otras rocas, que se depositan en capas o estratos en zonas marinas, lacustres o desérticas. Con el tiempo, estos sedimentos se compactan y se endurecen por la presión y la acción del agua subterránea.

La arenisca ha sido utilizada desde la antigüedad como material de construcción y ornamental, debido a su resistencia, belleza y facilidad de tallado. En la región de Murcia, existen varias canteras de arenisca que han suministrado esta roca para edificios históricos y monumentos emblemáticos. Algunos ejemplos son la Catedral de Murcia, el Castillo de Monteagudo, el Palacio Episcopal o el Teatro Romea. La arenisca extraída de estas canteras presenta una tonalidad rojiza o rosada, debido a la presencia de óxidos de hierro en su composición.

Uno de los ejemplos más destacados de la extracción y el uso de la arenisca en Murcia son las canteras romanas de Cartagena, situadas en la diputación de Canteras, a unos 4 km al oeste de la ciudad. Estas canteras fueron el origen de muchos de los monumentos y edificios emblemáticos de la antigua Carthago Nova, como el teatro, el foro o el circo. La técnica empleada para extraer la piedra consistía en eliminar primero la capa vegetal y luego hacer cortes con sierras dentadas o cables de acero. Los bloques obtenidos

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

se transportaban mediante carros tirados por animales hasta el lugar donde se iban a utilizar.

La actividad extractiva en estas canteras se prolongó durante siglos, desde el periodo republicano hasta el bajo imperio romano. Posteriormente, se abandonaron y quedaron cubiertas por la vegetación. En la actualidad, se pueden visitar como parte del patrimonio arqueológico e histórico de Cartagena.[9]

### 2.1.1.3. Granito del Escorial

El granito del Escorial es una roca ígnea que se utilizó para la construcción del monasterio de El Escorial (**Figura 2-3**), un símbolo del poderío español en el siglo XVI. El granito se compone principalmente de cuarzo blanco, feldespato potásico y plagioclasas sódicas, y contiene cantidades menores de minerales ferromagnesianos como biotita y hornblenda.



*Figura 2-3. Catedral del Escorial*

Tiene un aspecto granular y una textura gruesa, con un color gris que adquiere tonos dorados al sol. Es una roca muy resistente y duradera, que se formó por la solidificación lenta del magma rico en sílice en las profundidades de la corteza terrestre.

El granito del escorial es un tipo de piedra berroqueña, que es el nombre tradicional que se da a los granitos de la Sierra de Guadarrama, una cadena montañosa al norte de Madrid. Se caracteriza por su color gris claro y su resistencia al desgaste y a las inclemencias del tiempo. Es una roca ígnea formada por el enfriamiento lento del magma en profundidad.

Algunas de las obras más destacadas realizadas con este material son las estatuas de los reyes de Judá que adornan la fachada principal del monasterio, que miden cinco metros de altura y se alzan sobre altos pedestales.

Se ha utilizado desde el siglo XVI para construir importantes monumentos históricos y culturales en Madrid y otras ciudades. El más famoso es el Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, un complejo que incluye un palacio real, una basílica, un panteón, una biblioteca, un colegio y un monasterio.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

El Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial fue mandado construir por el rey Felipe II como símbolo de su poder y como lugar de retiro espiritual. La primera piedra se colocó el 23 de abril de 1563 y las obras duraron 21 años. El edificio tiene una planta en forma de parrilla, en homenaje al martirio de San Lorenzo.

El granito del escorial sigue siendo muy valorado en la actualidad por su calidad y belleza. Se exporta a otros países y se usa para edificar aeropuertos, centros comerciales o viviendas [4]

#### 2.1.1.4. Piedra de Jerez



*Figura 2-4. Catedral de Jerez*

La piedra martelilla es una caliza de color amarillo y porosidad entre el 20% y el 31%, cuyas canteras se encuentran cerca de Jerez de la Frontera (El Puerto de Santa María). Es un material resistente y duradero que ha sido usado en algunos monumentos de Jerez, como la Catedral de Jerez **Figura 2-4** o la Cartuja.

Se caracteriza por su resistencia, su facilidad para ser tallada y su porosidad, que le confiere una buena absorción del agua y una baja conductividad térmica.

La cantera de Jerez es una de las fuentes principales de extracción de la piedra martelilla. Pertenece al municipio de El Puerto de Santa María, que posee la mayoría de las canteras de la Sierra de San Cristóbal. El uso de la piedra martelilla en Jerez ha generado conflictos y litigios con El Puerto por cuestiones económicas y jurisdiccionales<sup>2</sup>.

Esta piedra se utilizaba para la construcción de edificios y monumentos, especialmente durante los siglos XV y XVI, cuando Jerez vivió un periodo de esplendor económico y cultural. Algunos ejemplos de obras realizadas con esta piedra son la muralla andalusí que rodeaba el casco antiguo, el púlpito renacentista de la iglesia de San Miguel o el palacio del Virrey Laserna. [5], [7]

### 2.1.1.5. Piedra de Jaén



*Figura 2-5. Catedral de Jaén*

La piedra es un recurso natural que se utiliza para diversos fines, como la construcción, la ornamentación o la escultura. La cantera de Jaén es una fuente de piedra caliza de gran calidad y belleza, que se ha explotado desde tiempos antiguos hasta la actualidad.

La cantera de Jaén se encuentra, cerca de la ciudad homónima. Se trata de un yacimiento geológico formado por rocas sedimentarias que se depositaron hace millones de años en el fondo marino. Estas rocas contienen restos fósiles de organismos marinos, como corales o moluscos, que le dan un color rojizo y una textura porosa. La piedra caliza de Jaén se caracteriza por su dureza, resistencia y durabilidad.

La explotación de la cantera de Jaén se remonta a épocas prehistóricas, cuando los primeros pobladores utilizaban la piedra para fabricar herramientas o utensilios. Posteriormente, los romanos aprovecharon la cantera para construir edificios y monumentos emblemáticos, como el puente sobre el río Guadalquivir o el arco de San Lorenzo. Durante la Edad Media y el Renacimiento, la cantera siguió suministrando piedra para obras arquitectónicas y artísticas, como las catedrales gótica y renacentista o las esculturas del maestro Vandelvira. En época contemporánea, la cantera ha seguido siendo una fuente de riqueza y empleo para la región. [8]

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

## **2.2. Estudios Previos**

Un proyecto de restauración requiere reflejar todas las intervenciones que se harán sobre el monumento para evitar al máximo aquellos momentos en los que hay que tomar acciones sobre sucesos que no estaban previamente planeados o contemplados en la hoja de ruta del plan.

Las intervenciones que deben estar contempladas en el proyecto serán las determinadas por los resultados obtenidos en la etapa de estudios previos, que tiene dos fases: la de diagnóstico y la de propuesta de medidas correctoras. La fase de diagnóstico implica el análisis de los indicadores de alteración, cambios en las propiedades de los materiales, que permiten identificar los factores de alteración, agentes responsables de los mecanismos que los han causado. La fase de propuesta de medidas correctoras implica el estudio del efecto inhibitor que los posibles tratamientos puedan tener sobre las causas de deterioro.

Para realizar los estudios previos se debe hacer una investigación exhaustiva del monumento a restaurar mediante la cual se pueda caracterizar el material de construcción y los factores que provocan su alteración.

A continuación, se van a describir los factores que pueden aportar información sobre las características de los materiales y del medio que rodea e influye en el edificio. [14]

### 2.3. Descripción de los factores de alteración

Son aquellos parámetros capaces de inducir cambios perjudiciales en ciertas propiedades de la piedra, considerándola como elemento de construcción, manifestados en forma de indicadores de alteración, a través de determinados mecanismos. Condicionan el comportamiento de la piedra en una obra.

Algunos autores consideran la alteración como una función de factores intrínsecos de la roca, estrictamente conectados a su propia naturaleza y de los extrínsecos o ambientales, que derivan de fuentes externas.

Para calificar estos factores hace falta tener en cuenta dónde se ubican, es decir, el conjunto que forman con el edificio, y no sólo a una piedra. La composición química y mineralógica de la piedra influye, pero no tanto como el ambiente que rodea a la misma y su función dentro del edificio, cargas que soporta y el desgaste que ello provoque. [15]

Los *factores de alteración* se pueden dividir por:

- Ambientales
- De uso
- Biológicos
- De tensión
- De incompatibilidad

En este trabajo se estudian los factores ambientales, pero se explicarán brevemente en qué consisten todos para tener una visión global.

- 1) Los factores **Ambientales** se asocian con el medio ambiente natural, incluyendo radiación solar, temperatura (elevada, baja, cíclica), agua en sus 3 fases (sólida, líquida y gaseosa), congelación y descongelación, el aire y sus componentes, contando con los posibles contaminantes y las rachas de viento.
- 2) Los factores de **uso** o estructura son inherentes al proyecto de edificación y la propia vida del edificio, teniendo en cuenta los usuarios que lo frecuenten.
- 3) Los factores **biológicos** se asocian directamente con los organismos vivos, incluyendo los de pequeña escala como hongos y bacterias.
- 4) Los factores de **tensión** son los resultantes de las cargas sostenidas por el edificio al mantener su propio peso o puntuales como las posibles rachas de viento.
- 5) Los factores de **incompatibilidad** resultan de las interacciones físicas y químicas perjudiciales entre los distintos materiales que están presentes y en contacto en el edificio.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

En la **Tabla 2-1** se resumen los distintos factores de alteración.

*Tabla 2-1. Factores de alteriación*

Intrínsecos	Extrínsecos		
Características del Material	Condiciones de servicio	Causas naturales	Causas antropogénicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composición química y mineralógica</li> <li>- Características petroFiguras</li> <li>- Factores relacionados con el movimiento de agua dentro de las piedras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Preparación del material y construcción</li> <li>- Situación del material en el edificio</li> <li>- Situación geográfica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua</li> <li>- Sales</li> <li>- Cambios térmicos</li> <li>- Viento</li> <li>- Ambientes biológicos</li> <li>- Componentes de la atmósfera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anhídrido sulfuroso</li> <li>- Anhídrido carbónico</li> <li>- Óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles</li> <li>- Amoníaco</li> <li>- Ácidos</li> <li>- Sales</li> <li>- Metales y partículas carbonosas</li> <li>- Incendios. Utilización del edificio, vibraciones sonoras etc</li> </ul>

Los **Intrínsecos** se pueden resumir en:

- **Composición química y mineralógica:** La *composición química* se obtiene analizando una porción de la piedra, es un pilar para establecer la alterabilidad o alteración ya alcanzada en el material.  
Se puede establecer una correlación entre el grado de alteración y la composición química de la piedra a distintas capas de profundidad.  
Conocer la *composición mineralógica* implica ir más allá de la química, ya que el mismo compuesto se comporta (cristaliza) de distintas formas según el medio en el que se encuentre, ofreciendo así distintas propiedades.
- **Características petroFiguras:** Referidas al tamaño de grano, tipo y grado de cementación, compacidad de la piedra, estructura, etc. Factores relacionados con la alterabilidad del material estudiado.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

- **Propiedades físicas:** Las más influyentes son las *relacionadas con el movimiento del agua*, dentro y fuera del material. Se relaciona la permeabilidad con la alterabilidad de cierto tipo de piedras como las areniscas, calizas y el mármol. Cuánta alteración puede sufrir un material depende de su porosidad, pero también de la conexión entre los poros y su geometría.

Los **Extrínsecos** por importancia,

- **Térmicos**, entre los que podemos diferenciar a aquellos producidos por efecto del efecto de la *alta temperatura* y *baja temperatura*.

Éstos tienen la capacidad de dañar, sin necesidad de ningún otro, a la totalidad de la piedra. Rupturas, tanto fracturación como fisuración y fragmentación, combamientos e hinchamientos entre otros.

Provocan cambios en la porosidad, siendo ésta directamente proporcional a cuánto puede verse afectada la piedra frente al resto de factores. Se demostrará, más adelante, cómo piedras de mayor porosidad tienden a sufrir mayores cambios en sus propiedades tras la alteración.

- **Factores hidráulicos;** se definen como hidráulicos aquellos relacionados con el movimiento de agua a la piedra, entre los que destacan
  - 1) **Higroscopicidad**, dependiente de las propiedades de la piedra y del aire que le rodea, es el equilibrio existente entre ambos.
  - 2) **Condensación**, ocurre cuando la temperatura de la piedra es inferior al punto de rocío del aire, tanto en su exterior como en el interior. Es el mecanismo que mayor eficacia tiene para transportar contaminantes atmosféricos
  - 3) **Capilaridad desde el subsuelo**, La cantidad de agua capaz de ascender por la piedra depende del nivel de saturación del suelo, propiedades de la piedra y de la capacidad de absorción de la misma. Transporta sales solubles.
  - 4) La **lluvia** encuentra tres métodos para acceder a la piedra, penetración, percolación y chorreo. En la penetración, se forma una película exterior por la que el agua entra en forma de capilaridad, potenciada por el viento.

La percolación se produce por filtraciones, el chorreo se da cuando convergen en una zona corrientes

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

de agua eliminadas de otras.

La lluvia, en general, es beneficiosa para las piedras pues limpia las superficies, aunque puede aportar contaminantes, el efecto positivo supera al negativo.

- **Factor presencia de sales** su principal acción es la creación de tensiones, producida por el crecimiento de los cristales de las sales dentro de los poros de las piedras. Su presencia está relacionada con los factores de alteración como depósitos de eflorescencias, costras, estriado, formación de cavernas etc.

## 2.4. Ensayos de alteración acelerada

Los ensayos de alteración acelerada son pruebas de laboratorio que simulan las condiciones ambientales adversas que pueden afectar a los materiales pétreos utilizados en la construcción y la restauración. Estos ensayos permiten evaluar la durabilidad y la resistencia de los materiales frente a diferentes agentes de alteración, como la humedad, las sales, los ciclos térmicos, la heladicidad o la contaminación atmosférica. Los ensayos de alteración acelerada también sirven para comparar la eficacia de distintos tratamientos protectores que se aplican a los materiales pétreos para mejorar su conservación.

El método de empleo de los ensayos de alteración acelerada consiste en someter a las muestras de material pétreo a ciclos repetidos de exposición a uno o varios factores de alteración, durante un tiempo determinado y bajo unas condiciones controladas. Los ciclos pueden variar en función del tipo de ensayo y del factor de alteración que se quiera simular. Por ejemplo, el ensayo de cristalización de sales consiste en sumergir las muestras en una solución salina y luego secarlas al aire o al horno, mientras que el ensayo de heladicidad consiste en alternar periodos de congelación y descongelación de las muestras en agua o aire. Después de cada ciclo o al finalizar el ensayo, se realizan diferentes medidas para evaluar el grado de alteración y el comportamiento del material, como la absorción de agua por capilaridad o inmersión, la velocidad de transmisión de ultrasonidos, la resistencia mecánica a compresión o flexión, o el cambio de aspecto o color.

Los tipos de ensayos de alteración acelerada más comunes son los siguientes:

- **Ensayo de cristalización de sales:** simula el efecto de las sales solubles presentes en el agua o en el suelo sobre los materiales pétreos. Las sales pueden provocar la disolución o la precipitación de los componentes del material, generando tensiones internas que causan fisuras, exfoliaciones o desprendimientos.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

- **Ensayo de heladicidad:** simula el efecto del hielo sobre los materiales pétreos. El hielo ocupa más volumen que el agua y ejerce una presión sobre los poros y las grietas del material, provocando su rotura o desagregación.

- **Ensayo termohigrométrico:** simula el efecto de los cambios bruscos de temperatura y humedad sobre los materiales pétreos. Estos cambios pueden producir dilataciones y contracciones diferenciales entre las distintas partes del material, originando fisuras o desprendimientos.

- **Ensayo de contaminación atmosférica:** simula el efecto de los gases contaminantes presentes en el aire sobre los materiales pétreos. Estos gases pueden reaccionar con los componentes del material, formando productos corrosivos que alteran su estructura y su color.

Los ensayos de alteración acelerada son una herramienta útil para conocer el comportamiento y la durabilidad de los materiales pétreos frente a las condiciones ambientales adversas, así como para seleccionar los tratamientos protectores más adecuados para su conservación. [14]

## 3 ESTUDIO EXPERIMENTAL

---

### 3.1 Introducción

El objetivo de estos ensayos es entender el cambio de propiedades en las distintas piedras estudiadas al ser sometidas a diferentes tipos de alteración termohigrométrica. Las piedras elegidas, como se ha mencionado con anterioridad, forman parte de muchos edificios del Patrimonio Histórico Andaluz y Español.

Dado el clima dónde se sitúan los edificios que contienen estas piedras, el factor común que comparten son las altas temperaturas, siendo la humedad en el ambiente más presentes en zonas de costa como el puerto de Santa María o Murcia.

De esta forma, mediante los dos tipos de alteración seleccionados, se va a proceder a realizar un envejecimiento acelerado de estas piedras con el objeto de comprobar el posible efecto del tiempo combinado con altas temperaturas y humedad.

Para ello se han seleccionado cinco ensayos físicos y mecánicos más uno con el que se caracterizan las piedras previamente.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

## 3.2 Método

Para la realización de este estudio ha sido necesaria la obtención de las piedras cuya procedencia ha sido mencionada en el apartado “ 2.1.1 Historia de los monumentos y sus materiales constituyentes. Las probetas se encontraban almacenadas en cajas del laboratorio de química en la escuela técnica superior de ingeniería, en Sevilla.

El primer paso es limpiar todas las probetas y seleccionar aquellas en mejor estado de conservación, una vez seleccionadas, se marcan una por una para mantener trazabilidad durante todo el estudio.

La cantidad de probetas estudiadas es 40 por procedencia, a estas cuarenta se les van a realizar los siguientes ensayos:

- Porosidad y Densidad
- Colorimetría
- Dureza
- Absorción por capilaridad
- Peeling test
- Tiempo de absorción de gota

Una vez realizados todos los ensayos, se seleccionan 10 probetas de cada procedencia, intentando cubrir toda la gama de porosidad posible en cada caso, según el rango de cada una.

De estas 10 probetas se separan dos grupos de 5 y 5, y a cada grupo se le realiza un ensayo distinto de alteración, descritos en “3.4.7 *Ensayo de alteración 1*” y “3.4.8 *Ensayo de alteración 2*”.

Tras la realización de estos ensayos de alteración, se repiten los ensayos:

- Colorimetría
- Dureza
- Absorción por capilaridad
- Peeling test
- Tiempo de absorción de gota

Para, de esta forma, intentar evaluar el efecto producido por los distintos ensayos de alteración.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### **3.3 Materiales**

#### ***3.3.1 Descripción de la piedra de la Cantera del puerto de Santa María***

La piedra extraída de las canteras del puerto de Santa María, en Cádiz, es una roca sedimentaria de origen marino que se denomina caliza bioclástica.

Esta roca está formada por fragmentos de conchas y otros restos orgánicos que se depositaron en el fondo del mar hace millones de años y que posteriormente se compactaron y cementaron. La caliza bioclástica tiene un color gris claro o beige y una textura porosa y heterogénea. Su composición química es principalmente carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), aunque también puede contener pequeñas cantidades de otros minerales como cuarzo, feldespato o arcilla.

La caliza bioclástica es una roca blanda y fácil de trabajar, pero también es susceptible a la erosión y a la alteración por agentes atmosféricos o biológicos. Su uso en la catedral de Sevilla le confiere un aspecto monumental y elegante, pero también requiere un cuidado especial para su conservación. [3]

#### ***3.3.2 Descripción de la piedra de la Cantera de Murcia***

La piedra extraída de las canteras de Murcia es del tipo arenisca, un tipo de roca sedimentaria formada por granos de arena cementados entre sí. La arenisca se caracteriza por tener una textura granular y una composición mineralógica variable, dependiendo del origen y la historia geológica de la roca. En general, la arenisca está compuesta por cuarzo, feldespato y otros minerales accesorios como micas, óxidos de hierro o carbonatos.

La arenisca de Murcia presenta un color amarillento o rojizo debido a la presencia de óxidos de hierro que le dan un aspecto oxidado. Su dureza es media-baja y su densidad es de unos  $2.5 \text{ g/cm}^3$ . Su porosidad es alta y su permeabilidad es variable según el grado de cementación. Su resistencia a la compresión es de unos 50 MPa y su resistencia al desgaste es baja.

La arenisca de Murcia se utiliza principalmente como material de construcción y ornamentación, tanto en edificios históricos como modernos. Algunos ejemplos son la catedral de Murcia, el palacio episcopal o el casino. También se emplea como árido para hormigones y morteros o como material filtrante para depuración de aguas. [9]

#### ***3.3.3 Descripción de la piedra de la Cantera del Escorial***

El granito es una roca ígnea intrusiva de color claro y textura granular que se forma por la cristalización lenta del magma debajo de la superficie terrestre. Está compuesto principalmente por cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y mica, que le dan diferentes colores y brillos. El granito es una roca muy resistente y duradera que se utiliza para fines arquitectónicos y ornamentales.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

El granito extraído de las canteras del Escorial, en Madrid, tiene unas características físico químicas particulares que lo hacen único. Según algunos estudios, este granito pertenece al tipo I o ígneo, que se origina en la zona de contacto entre la corteza inferior y el manto. Tiene un alto contenido en sílice (más del 70%) y una baja proporción de minerales oscuros o ferromagnesianos (menos del 10%). Su color es gris claro con tonos rosados o rojizos debido a la presencia de feldespato potásico. Su textura es fanerítica de grano grueso, con cristales visibles a simple vista. Su densidad es de unos  $2,6 \text{ g/cm}^3$  y su dureza es de 6 en la escala de Mohs.

El granito del Escorial se formó hace unos 300 millones de años durante el periodo Carbonífero superior, cuando se produjo una intrusión magmática en la corteza continental. Esta intrusión dio lugar a un batolito o cuerpo rocoso masivo que se enfrió lentamente bajo tierra. Con el paso del tiempo, el batolito fue exhumado por los procesos erosivos y tectónicos que afectaron a la región. Así se formaron las canteras del Escorial, donde se puede apreciar la estructura interna del granito y sus fracturas o diaclasas.[4]

#### **3.3.4 Descripción de la piedra de la Cantera de Jerez**

La piedra martelilla es un tipo de piedra caliza que se extrae de la cantera de Jerez de la Frontera, en la provincia de Cádiz, España. Es una roca sedimentaria compuesta principalmente de carbonato de calcio, que se formó a partir de la acumulación de restos de organismos marinos en el fondo del mar hace millones de años.

La piedra martelilla se caracteriza por su dureza y su resistencia a la intemperie, lo que la convierte en un material muy valorado en la construcción y la arquitectura. Su color varía desde el blanco hasta el gris claro siendo las muestras presentadas predominantemente amarillas, y presenta una textura homogénea y compacta, con una superficie lisa y brillante.

En cuanto a su composición química, la piedra martelilla contiene en promedio un 98% de carbonato de calcio, junto con pequeñas cantidades de otros minerales como arcilla, sílice y óxidos de hierro. Esta composición química la hace susceptible a la disolución en medios ácidos, lo que puede provocar la aparición de manchas y decoloraciones en su superficie.

En cuanto a su dureza, la piedra martelilla se sitúa en la escala de Mohs alrededor del 3,5, lo que la hace un material relativamente blando en comparación con otros tipos de piedras. Esta dureza se debe a la presencia de pequeñas cantidades de minerales como la sílice y el óxido de hierro, que pueden formar inclusiones en la roca.

Esta piedra se caracteriza por tener una porosidad entre el 20 y el 31%, lo que le confiere una buena capacidad de absorción de agua y una baja resistencia a la compresión. Esta porosidad puede variar según la calidad de la

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

pedra y su grado de compactación, y puede afectar su resistencia y durabilidad.[5], [6]

### ***3.3.5 Descripción de la piedra de la Cantera de Jaén***

Entre las propiedades físicas de la piedra caliza se encuentran su color, que puede variar desde el blanco al gris oscuro según el grado de impurezas; su dureza, que suele ser baja y permite su tallado y pulido; su densidad, que oscila entre 2.5 y 2.7 g/cm<sup>3</sup>; su porosidad, que depende del tamaño y la forma de los granos y puede afectar a su resistencia y permeabilidad; y su textura, que puede ser cristalina, microcristalina o criptocristalina según el tamaño de los cristales de calcita.

Entre las propiedades químicas de la piedra caliza se encuentran su composición mineralógica, que está dominada por la calcita pero puede contener otros minerales como cuarzo, feldespato, arcilla o pirita; su reactividad, que es alta frente a los ácidos y produce efervescencia al liberar dióxido de carbono; su solubilidad, que es baja en agua pero aumenta con la presencia de dióxido de carbono disuelto; y su estabilidad térmica, que es baja y provoca su descomposición en óxido de calcio (cal) y dióxido de carbono al someterla a altas temperaturas. [8]

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4 Descripción de los ensayos realizados

Para poder cuantificar el efecto de cada uno de los dos ensayos de alteración, se van a realizar una serie de ensayos de laboratorio. Estos ensayos se realizarán antes y después de la alteración, de esta forma, comparando resultados, podremos comparar de qué forma y cuánto ha afectado cada forma de alteración.[14]

Los ensayos que se van a realizar son:

- Determinación de la Porosidad y Densidad
- Colorimetría
- Medición de la Dureza
- Absorción de agua por Capilaridad
- Peeling Test
- Absorción de gota

#### 3.4.1 Determinación de la Porosidad y densidad

La porosidad de un material pétreo es un parámetro de conjunto que se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total de probeta (roca). Su densidad, por otro lado, se define como la masa de la probeta en un determinado volumen de sustancia.

Debido a la interconexión de estas propiedades, se define un método por el cual se pueden hallar ambas.

La técnica empleada se basa en el desplazamiento de fluidos, denominada **Inmersión en agua en condiciones de vacío**, basado en la norma *UNE-EN 1936:2007*.

Los pasos que se han seguido se describen a continuación:

- 1- Se pesan las probetas en seco, previa ligera limpieza superficial y catalogación, para así hallar el  $Peso_{seco}$  en gramos.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.



Figura 3-1. Probetas de Murcia catalogadas

- 2- Se disponen dos desecadores conectados entre sí por una tubería, la cual controla el paso del agua. En uno de ellos se colocan las probetas previamente pesadas y en el otro agua, luego, mediante una bomba, se impone un vacío constante de 5 horas.
- 3- Una vez pasadas estas 5 horas, lentamente se abre la válvula situada en la tubería que conecta los desecadores, de esta forma el agua va pasando de un desecador a otro, sumergiendo por completo las probetas. Una vez el agua ha pasado completamente de un recipiente a otro, se corta el vacío y, permitiendo que la presión vuelva a ser la atmosférica, se mantienen las probetas sumergidas 48h más.



Figura 3-2. Probetas saturadas y Probetas tras periodo de vacío

- 4- En este punto, las probetas están saturadas de agua. Esto implica que todos, o la mayoría de sus poros, están rellenos por agua. Aquí se vuelven a pesar las probetas, previa eliminación del exceso superficial de líquido con un paño húmedo, hallando el  $Peso_{saturado}$ .

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

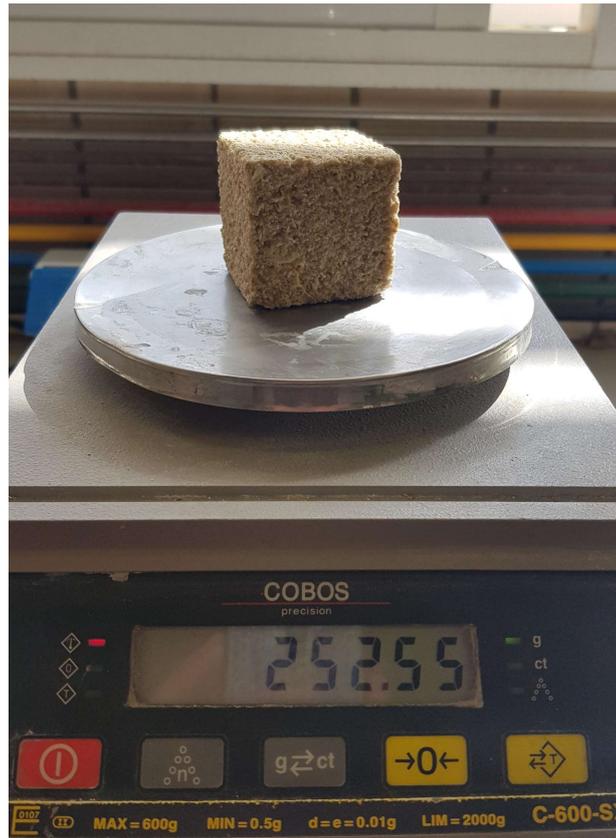


Figura 3-3. Probeta saturada

- 5- El  $Peso_{saturado\ sumergido}$  se halla mediante **pesada hidrostática**, este tipo de pesada hace empleo del principio de arquímedes para determinar el volumen de agua que empuja un cuerpo, y así, determinar su peso sumergido. Si al  $Peso_{saturado}$  se le resta el  $Peso_{saturado\ sumergido}$  se obtiene el volumen de la probeta.



Figura 3-4. Balanza modificada para la pesada hidrostática

- 6- Una vez se tienen los tres pesos, con el empleo de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 se obtienen las propiedades

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

deseadas.

$$\text{Volumen de la probeta (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{sumergido}}}{\text{Densidad agua } \rho}$$

*Ecuación 1. Volumen probeta.*

$$\text{Volumen de poros (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Densidad agua } \rho} = \frac{\text{Agua}_{\text{absorbida probeta}}}{\text{densidad agua}}$$

*Ecuación 2. Volumen poros.*

$$\text{Porosidad probeta (\%)} = \frac{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{sumergido}}} * 100 = \frac{\text{volumen poros}}{\text{volumen probeta}} * 100$$

*Ecuación 3. Porosidad.*

$$\text{Densidad } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{\text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{sumergido}}} = \frac{\text{Masa probeta}}{\text{Volumen probeta}}$$

*Ecuación 4. Densidad.*

### 3.4.2 Colorimetría

Cada persona percibe el color de forma distinta y, para poder cuantificar de forma absoluta e inequívoca, hace falta un método preciso, capaz de ser interpretado de la misma forma por todo aquel que lo vea. Para este ensayo utilizaremos el espacio de color CIE L\*a\*b\*.

Este método emplea términos numéricos y objetivos. Clasifica según Matiz (color), Luminosidad (brillo) y saturación (vividez), de esta forma, creando escalas entre estos tres atributos, se puede expresar el color de una probeta de forma precisa y así, ver posibles cambios producidos en ella.

Para realizar las mediciones se ha utilizado el CR-210 de la marca Minolta. Éste consta de un medidor con cabezal circular que emite un pulso de luz, este pulso de luz rebota contra el objeto a medir y se realiza la lectura. Luego la controladora procesa la información y da los resultados como valores de L, a y b.

Los parámetros se definen como:

- **L** Luminancia, en porcentaje, desde el 0 que implica ausencia de luz, negro, hasta el 100, que indica blanco.
- **a** y **b** Son las gamas de color, desde verde a rojo (**a**) y desde azul hasta amarillo (**b**).

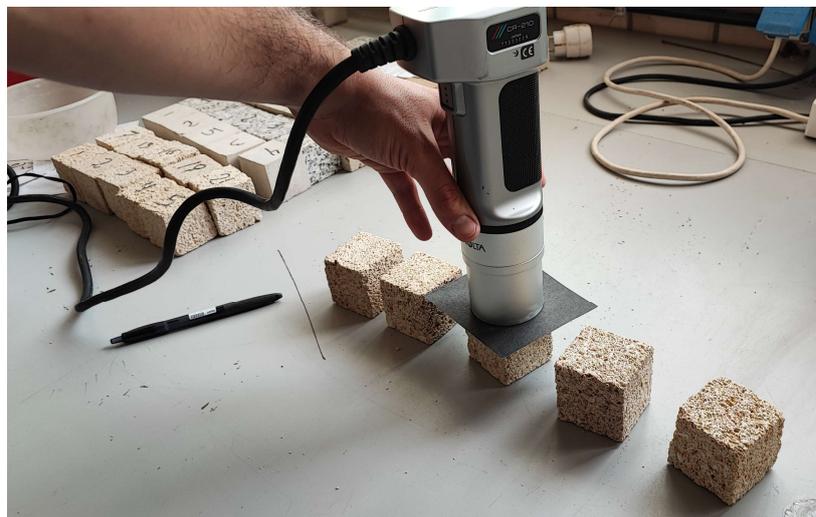
Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.



*Figura 3-5. Colorímetro Minolta*

En este caso concreto, el cabezal del medidor mide 53cm de diámetro, excediendo el tamaño de 5x5cm de las probetas. Para poder realizar medidas representativas se ha acudido a un método que emplea una cartulina negra con un círculo interior.

Esta cartulina se posa sobre distintas superficies de color (cartulinas en este caso), para así, comparando las mediciones de la luz reflejada en las distintas superficies y haciendo empleo de una Figura de dispersión, ver cuánta luz absorbe la cartulina negra y obtener una ecuación lineal que relacione la medición del aparato y el valor real del objeto a medir. [17]



*Figura 3-6. Proceso de medida del color*

Una vez se tiene la relación, se puede empezar a medir las probetas, obteniendo valores para L, a y b que, con la ecuación XXXX determinarán la variación del color.

$$\Delta E = \sqrt{(L_{Inicial} - L_{Final})^2 + (a_{Inicial} - a_{Final})^2 + (b_{Inicial} - b_{Final})^2}$$

*Ecuación 5. Variación del color*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4.3 Dureza

La determinación de la dureza en los distintos especímenes estudiados da un buen indicativo del grado de alteración de ambos ensayos sobre los materiales.

Para determinar la dureza de las diferentes probetas se ha empleado un método basado en la ASTM D2240 referida a dureza de plásticos. Esta exige que las mediciones se hagan sobre una superficie plana, que se realice un mínimo de 3 y siempre, para poder comparar resultados, se elija la misma cara.

Para este estudio en concreto se han utilizado dos tipos de medidores, según la composición del espécimen a medir. Para aquellos menos porosos, más densos por tal, se ha utilizado un durómetro como el mostrado en la Figura 7. Precargando la máquina con 20N y dejándola actuar, realizando así 5 medidas en cada espécimen. Este tipo de medición se hizo para aquellas piedras de procedencia El Escorial, Jerez y Jaén.

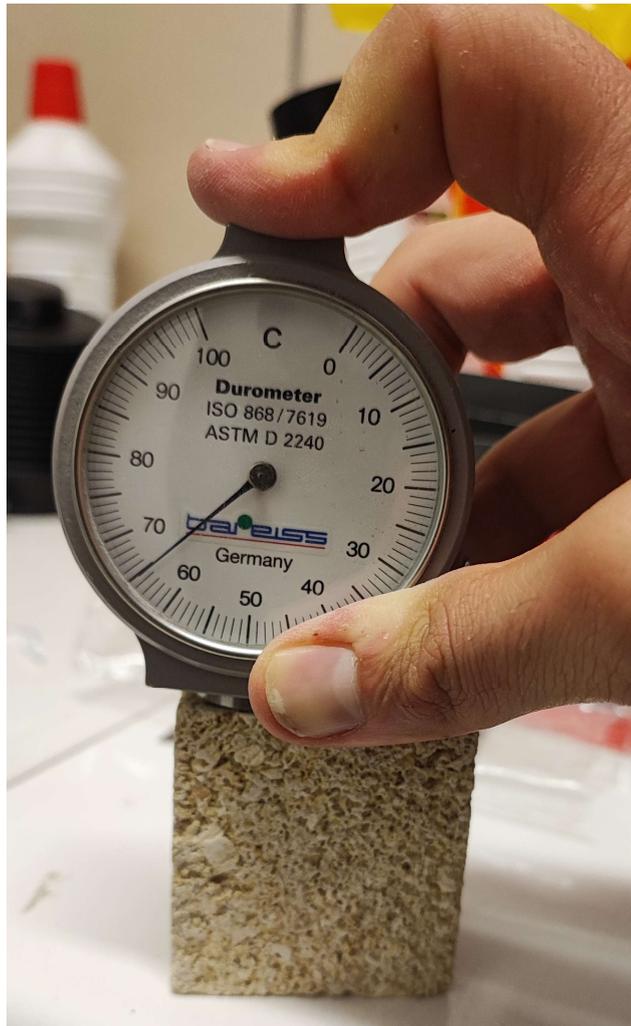


*Figura 3-7. Durómetro*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Para las piedras procedentes del Puerto de Santa María y Murcia se ha empleado un durómetro manual, mostrado en la Figura 8. En este caso, al ser piedras más porosas, no fue necesario emplear una máquina con carga específica, con este simple medidor de indentación manual ha sido suficiente.

Emplear el medidor de la figura 7 u 8 depende de la dureza de la piedra, ya que la dureza se mide por indentación, para realizar esta medida en especímenes de mayor densidad ha sido necesario usar un medidor con mayor capacidad.



*Figura 3-8. Proceso de medida de dureza*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4.4 Absorción de agua por capilaridad

Depende directamente de la porosidad, esta propiedad se define como el movimiento ascendente o descendente de un fluido por el interior de una conducción, producido por la diferencia de fuerzas superficiales de las sustancias en contacto.

Se dice que depende de la porosidad ya que a más poroso sea el espécimen, mayor cantidad de cavidades internas tendrá y, si se sumerge en un fluido que tenga cierta afinidad, tal fluido entrará por las cavidades aumentando el peso total de la piedra. Este proceso se denomina absorción por capilaridad.

Para su estudio se ha empleado la norma europea UNE-EN 1925:1999, partiendo de probetas secadas en estufa para asegurar la ausencia de humedades internas, se obtiene su peso en seco.

Seguidamente, empleando cubetas de plástico, se pone en su base una capa de 1 cm de papel secante al cual se le vierte agua hasta llegar a su saturación, asegurando la existencia de una pequeña capa superficial de agua sobre el papel, este nivel será referencia para el resto de la experiencia.

Una vez el papel está saturado, se colocan las probetas, asegurando un contacto nulo entre ellas y completo entre una de sus caras y el papel; el agua irá ascendiendo por capilaridad por ellas y, por tanto, aumentando el peso total de las probetas, este peso se anota, junto al momento de medida, durante el tiempo necesario hasta llegar a la saturación de las piedras. Durante el proceso hasta llegar a la saturación, el peso se debe tomar repetidamente, sustituyendo el agua que hayan absorbido las probetas para asegurar condiciones homogéneas durante todo el proceso.



Figura 3-9. Preparación del ensayo de absorción de agua por capilaridad

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.



*Figura 3-10. Ensayo de absorción de agua por capilaridad*

Una vez llegado al final del proceso, los resultados se representan en forma de valor medio, dónde:

$$\Delta P = \frac{P_t - P_{seco}}{P_{seco}} * 100$$

*Siendo*

*$P_t$  = El peso de la probeta en el instante  $t$*

*$P_{seco}$  = El peso inicial de la probeta*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4.5 Peeling Test

Mediante este ensayo, también denominado “Scotch Tape Test” se evaluará el grado de cohesión que presentan las probetas antes y después de los ensayos de alteración.

Originalmente fue diseñado para comprobar el grado de adhesión de una película a cierto sustrato, generalmente mediante tracción. Existen 3 tipos de Peeling test usados en la industria, en T, a 90° y a 180°, la diferencia existente entre ellos es la forma en la que se separa la película del sustrato o superficie.

El test en T se usa para películas adhesivas de 2 caras sobre sustratos flexibles, en el de 90° se tira de la película adherida a la superficie perpendicularmente y el de 180° se tira en paralelo. Existen máquinas capaces de realizar estos ensayos bajo normas europeas y americanas, pero en este caso se realizará manualmente.

Para el desarrollo de este ensayo se han preparado cintas adhesivas, siguiendo el protocolo establecido por un autor, 4 por probeta a ensayar. Las cintas son de doble cara, midiendo 15 mm de ancho por 40 de largo, una de sus caras se pega a un folio dejando 10 mm para dar trazabilidad a las cintas.

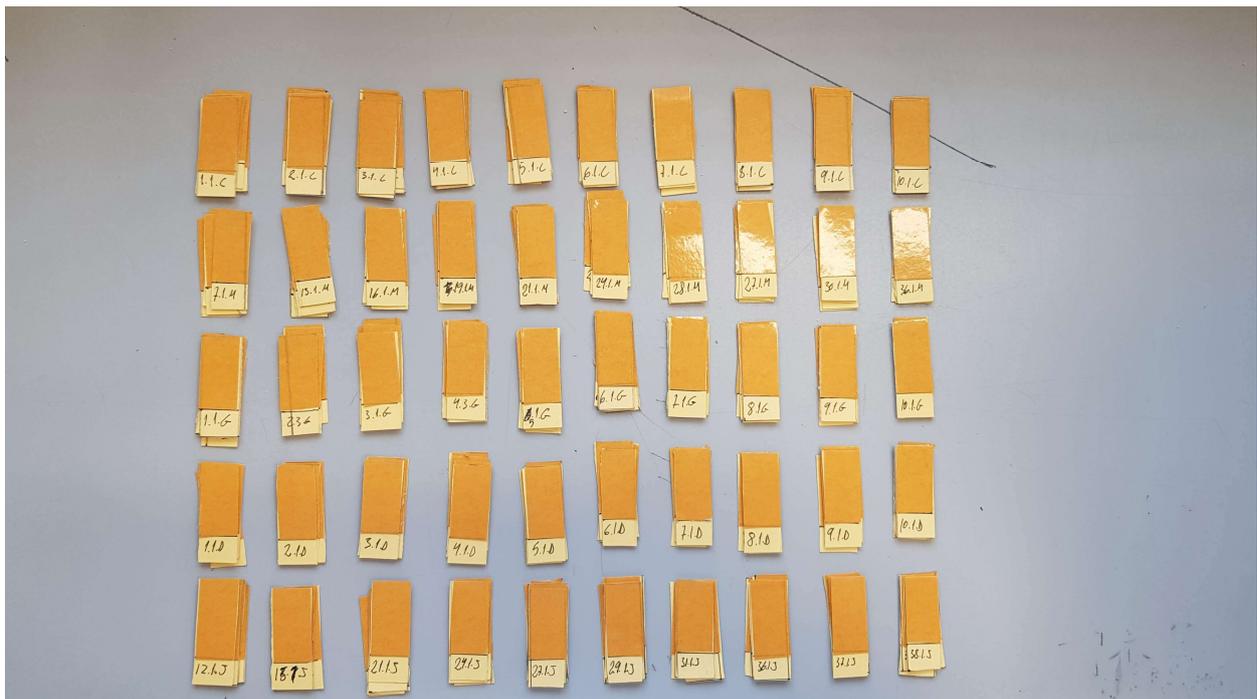


Figura 3-11. Muestras del peeling test

Tras preparar las cintas, se pesan en una balanza analítica, caracterizando su peso con el folio pegado. Una vez están todas, se pegan a las probetas. Para asegurar el máximo contacto posible, se aprieta cinco veces sobre cada cinta y, transcurridos tres minutos, se retiran, intentando mantener un ángulo de 90°, para ser pesadas junto a la cinta que cubría la parte que se ha pegado a la probeta. [16]

Mediante la diferencia de peso de la cinta antes y después de ser pegadas, se obtiene la cantidad de sustrato que

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

cada una se ha llevado de la probeta en cuestión. Este proceso se ha repetido antes y después de los ensayos de alteración y sus resultados se mostrarán obteniendo la media de sustrato perdido (despegado por las cintas) tras cada ensayo.



*Figura 3-12. Realización del peeling test*

El proceso se repite en dos caras de cada probeta, usando dos tiras por cara.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4.6 Absorción de gota

Este último ensayo consiste en medir la cantidad de tiempo que tarda 1 gota de 0,1 mL de agua en desaparecer de la superficie de las probetas, bien por absorción o por evaporación.



*Figura 3-13. Gota recién vertida*

El procedimiento es el siguiente; con la ayuda de una pipeta de transferencia volumétrica se vierte el volumen de gota mencionado sobre la misma cara de los especímenes a estudiar, anotando el tiempo de inicio y controlando el proceso, para finalmente anotar el momento en el que la gota desaparece por completo.



*Figura 3-14. Detalle gota*

Un parámetro relacionado con este es el ángulo de contacto de la gota con la superficie de la piedra, ya que a más bajo sea, con mayor facilidad se absorberá el líquido.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4.7 Ensayo de alteración 1

El primero de los ensayos de alteración consiste en someter a las probetas, durante 20 días, a ciclos en los que son calentadas en un horno con humedad constante, ya que el agua evaporada se repone diariamente. Las fases del ensayo son las siguientes:

- Fase de Calentamiento a 105°C, temperatura constante, durante 12 horas, luego se apaga el horno y se mantiene otras 12 horas sin aporte de calor. Al inicio se introduce un recipiente con 1 litro de agua, para que se evapore y las probetas estén en contacto con una atmósfera saturada de vapor. El tiempo necesario para que se produzca esta evaporación es menor de 12 horas, de forma que las probetas están en un ambiente seco durante la segunda parte del ensayo.
- Reposición del agua evaporada.
- Repetición del ciclo de calentamiento y enfriamiento.

En la **Figura 3-15** se muestra la configuración.



*Figura 3-15. Disposición horno ensayo alteración 1*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### 3.4.8 Ensayo de alteración 2

En este ensayo se simula el calentamiento que sufren los materiales por la cara externa mientras que desde el interior de la estructura arquitectónica se produce la entrada de agua (por ejemplo, por capilaridad desde el suelo) que se evapora por esa cara externa. Para conseguir este efecto las probetas se colocan apoyadas en un lecho de arena húmeda, con calor solo en la zona superior, y se someten a ciclos formados por las siguientes fases:

- Fase de humectación: 6 horas a 20°C con agua en la base de arena
- Fase de calentamiento: 6 horas en horno, con la cara superior a 80°C y la inferior en contacto con la arena húmeda a 30°C
- Fase de enfriamiento: 12 horas a 20°C y adición de agua al final para reponer y mantener constante la humedad del lecho de arena



*Figura 3-16. Base de arena húmeda para el ensayo de alteración 2*

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### **3.4.9 Otros Ensayos**

Las propiedades mecánicas globales son características esenciales en cualquier construcción y se determinan por medio de ensayos normalizados. Son ensayos destructivos, que deben realizarse al menos con 3 probetas de cada tipo, por lo que en este trabajo no se han incluido, ya que se habría multiplicado el número de probetas necesario. Además, el deterioro producido por los ensayos de alteración realizado es superficial, por lo que su efecto en valores de resistencia globales probablemente habría sido inapreciable. Otra forma de medir la resistencia global es por medio de la velocidad de transmisión de ultrasonidos, ensayo no destructivo, que no ha podido llevarse a cabo por distintos problemas. Estos ensayos se describen brevemente a continuación. ..

#### **3.3.9.1. Velocidad de propagación de Ultrasonido**

Este ensayo mide el tiempo en el cual un sonido atraviesa una probeta. Para su realización se necesita un equipo especializado, que consta de dos cabezales con cristales piezoeléctricos y trabaja de 20 a 500 KHz.

Se coloca uno de los cabezales en una cara y el otro en opuesta, midiendo el tiempo en microsegundos que tarda el sonido en atravesar la probeta. Utilizando las medidas de las probetas se obtiene la velocidad para cada una. Este parámetro es directamente proporcional a la compacidad del material, lo que permite obtener de forma indirecta una medida de sus características mecánicas. La norma utilizada es **UNE-EN 12504-4** “Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos”

#### **3.3.9.2. Ensayo de Compresión Uniaxial**

El ensayo de compresión uniaxial es una técnica utilizada para medir la resistencia mecánica de las piedras. Consiste en aplicar una fuerza axial creciente sobre una muestra cilíndrica de piedra hasta que se produce su rotura.

El ensayo permite obtener la tensión máxima que soporta la piedra, así como su deformación y su módulo de elasticidad. Se realiza en una máquina de compresión equipada con un sistema de medición de fuerza y desplazamiento.

La muestra se coloca entre dos placas paralelas y se somete a un aumento progresivo de la carga hasta alcanzar el punto de fractura. El ensayo se puede realizar en condiciones secas o húmedas, y se pueden aplicar diferentes velocidades de carga, es útil para caracterizar las propiedades mecánicas de las piedras y para evaluar su comportamiento frente a esfuerzos estructurales. Se suele realizar bajo la norma europea **UNE-EN 1926:2007**.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Introducción

La idea de este proyecto es cuantificar la repercusión de dos ensayos de alteración distintos en diferentes probetas. Se han elegido especímenes de procedencia variada, traducido en propiedades distintas, para así tener conclusiones bien fundamentadas.

El procedimiento que se ha seguido es el siguiente:

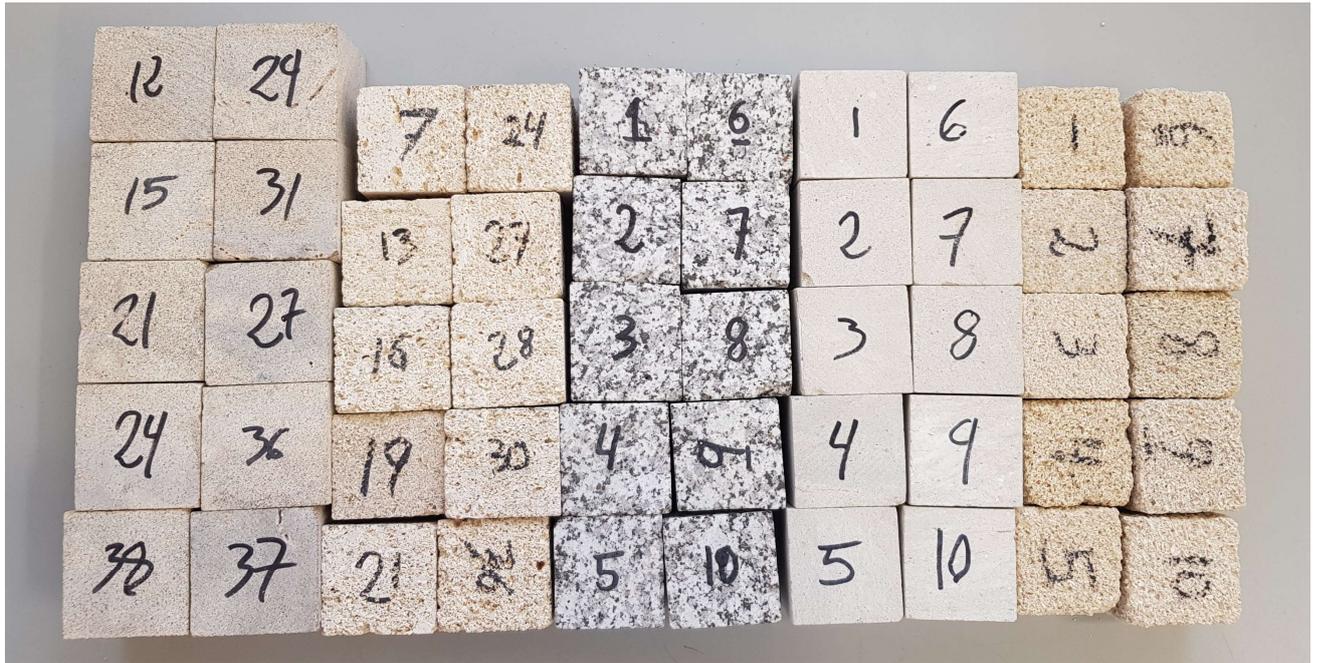
- 1) Medida de propiedades, en la que se realizan los ensayos descritos previo paso por la alteración
- 2) Ensayos de alteración 1 y 2, llevados a cabo por separado en dos hornos distintos, pero paralelos en tiempo. En cada ensayo se han introducido 5 especímenes de cada tipo, buscando que ese grupo sea lo más heterogéneo en términos de porosidad entre sí. De esta forma se puede comparar el efecto de cada ensayo de alteración antes, después y entre ellos.
- 3) Medida de las propiedades tras los ensayos de alteración, repitiendo el procedimiento, para así poder discernir el efecto de cada tipo de alteración en las diferentes probetas.

En la **Tabla 4-1** se puede ver las probetas que se han destinado a cada ensayo de alteración.

*Tabla 4-1. Especímenes seleccionados y su porosidad*

Puerto Santa María		Murcia		El Escorial		Jerez		Jaén	
Probeta	Porosidad	Probeta	Porosidad	Probeta	Porosidad	Probeta	Porosidad	Probeta	Porosidad
1	32,26	7	25,17	1	2,25	12	9,75	1	13,23
2	28,62	13	32,21	2	2,51	15	13,01	2	13,87
3	32,56	16	26,61	3	2,69	21	12,99	3	18,06
4	33,49	19	28,74	4	2,46	24	9,21	4	14,73
5	31,88	21	33,30	5	2,55	27	8,61	5	16,82
6	35,56	24	34,10	6	2,76	29	13,45	6	16,52
7	34,78	27	35,11	7	2,62	31	10,87	7	10,83
8	34,81	28	30,89	8	2,51	36	12,59	8	8,98
9	32,92	30	32,03	9	2,37	37	9,86	9	18,91
10	34,38	36	36,91	10	2,88	38	15,78	10	16,72

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.



*Figura 4-1. Probetas seleccionadas para realizar los ensayos de alteración*

En la **Figura 4-1**, por orden de izquierda a derecha, se pueden ver los grupos 1 y 2 separados por columnas de las piedras de Jerez, Murcia, el Escorial, Jaén y el puerto de Santa María

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

## 4.2 Resultados

### 4.2.1 Densidad y Porosidad

Se representa Densidad (g/mL) frente a Porosidad (% de huecos), buscando mostrar una relación entre estas propiedades. El coeficiente de correlación de Pearson  $r$  indica el grado de relación entre las variables relacionadas, a más se acerque a 1 o -1, mayor será su linealidad.

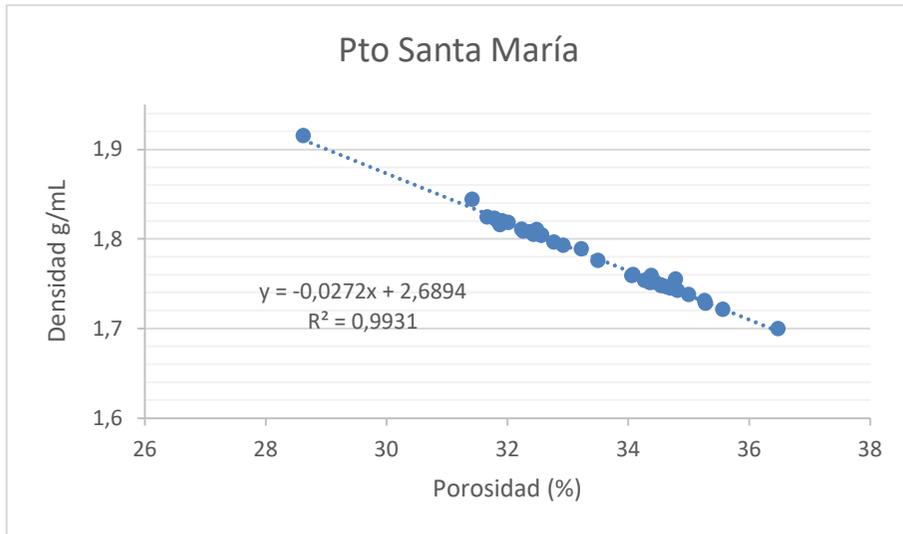


Figura 4-2 Densidad vs Porosidad Pto Santa María

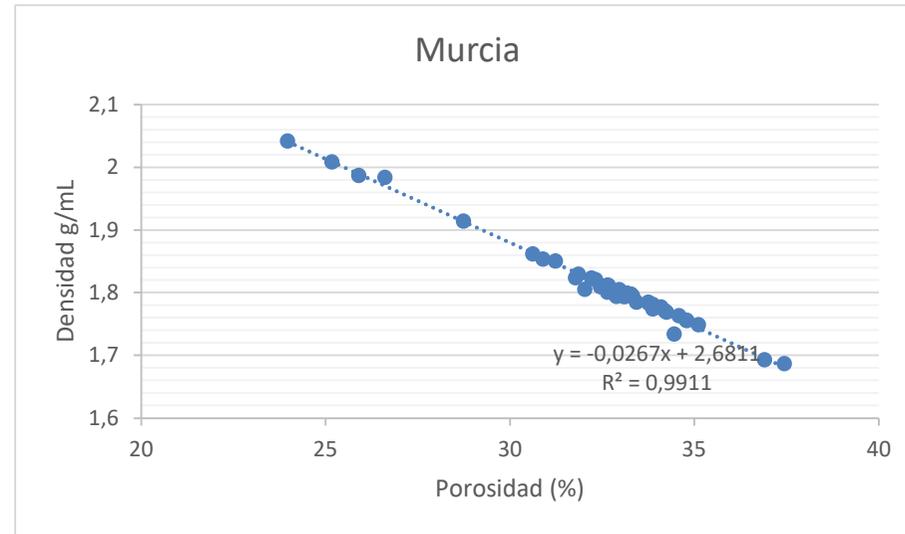


Figura 4-3 Densidad vs Porosidad Murcia

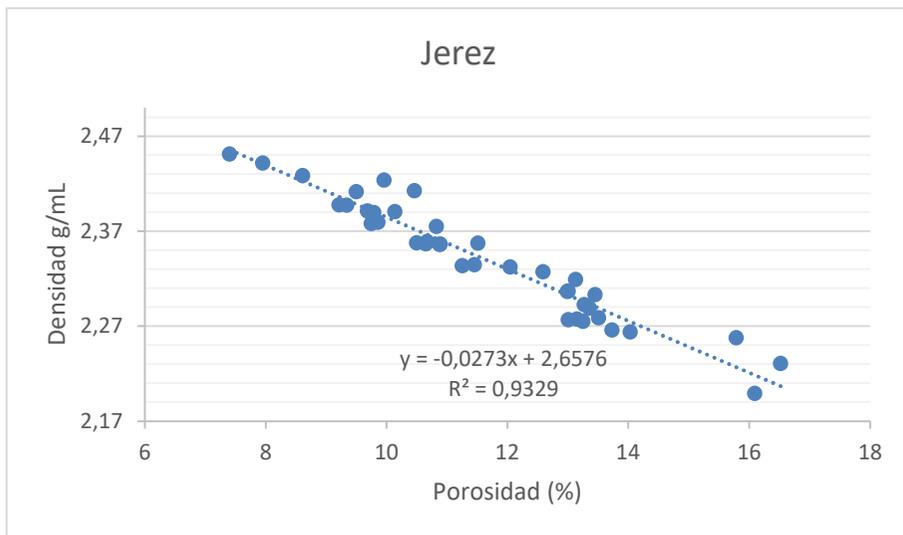


Figura 4-4 Densidad vs Porosidad Jerez

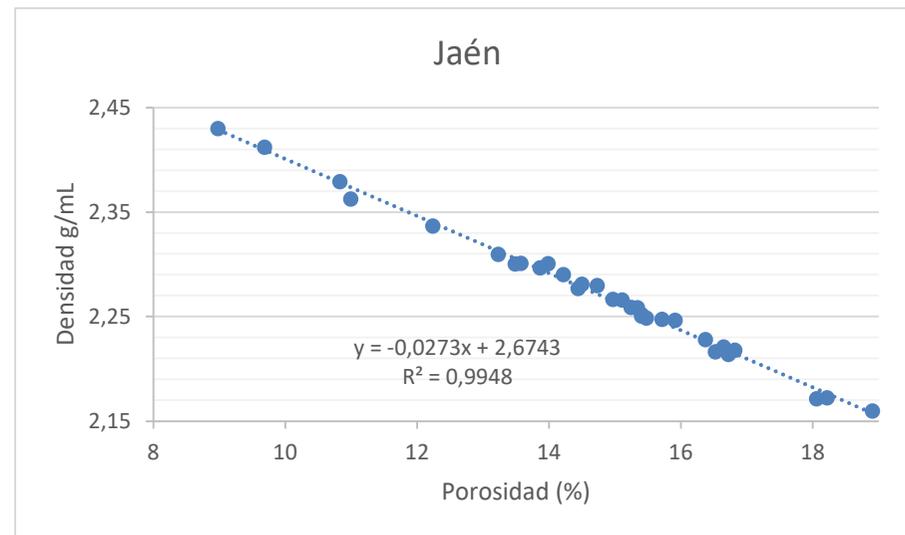


Figura 4-5 Densidad vs Porosidad Jaén

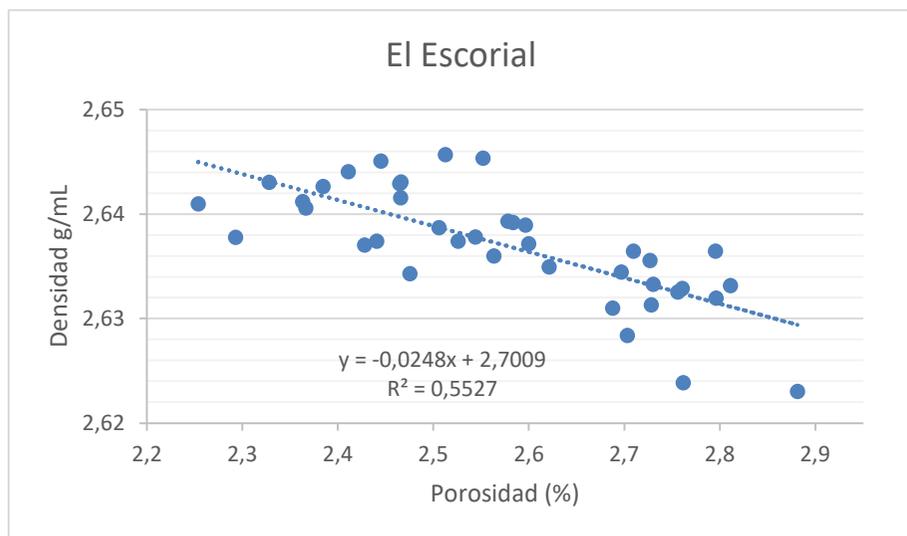


Figura 4-6 Densidad vs Porosidad El Escorial

En las Figuras 4-2 a 4-6 se relacionan valores de Densidad (g/mL) con Porosidad (%).

Tabla 4-2. Resultados Densidad (g/cm<sup>3</sup>) y Porosidad (%)

Propiedad	Porosidad (%)			Densidad (g/cm <sup>3</sup> )			R <sup>2</sup>
	AVG	MAX	MIN	AVG	MAX	MIN	R <sup>2</sup>
Murcia	32,44	37,45	23,96	1,81	2,04	1,69	0,9911
Pto Santa María	33,37	36,47	28,62	1,78	1,92	1,70	0,9931
Jaén	14,59	18,91	8,98	2,28	2,43	2,16	0,9952
Jerez	11,71	16,52	7,40	2,34	2,45	2,20	0,9329
El Escorial	2,57	2,88	2,25	2,64	2,65	2,62	0,5527

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

De esta tabla se pueden sacar varias conclusiones:

- La piedra con origen Murcia es la que tiene mayor porosidad individual, mientras que la del Puerto de Santa María es la que mayor porosidad de media tiene.
- El granito del Escorial es la piedra con menor porosidad, tanto individual como de media.
- La mayoría de las piedras presentan una linealidad fuerte entre su densidad y porosidad, con valores de R sobre 0,99, mientras que la del Escorial no presenta una relación tan clara, con un R de 0,55.
- La piedra del Escorial presenta la mayor densidad, tanto media como individual, su porosidad es la menor.

#### 4.2.2 Colorimetría

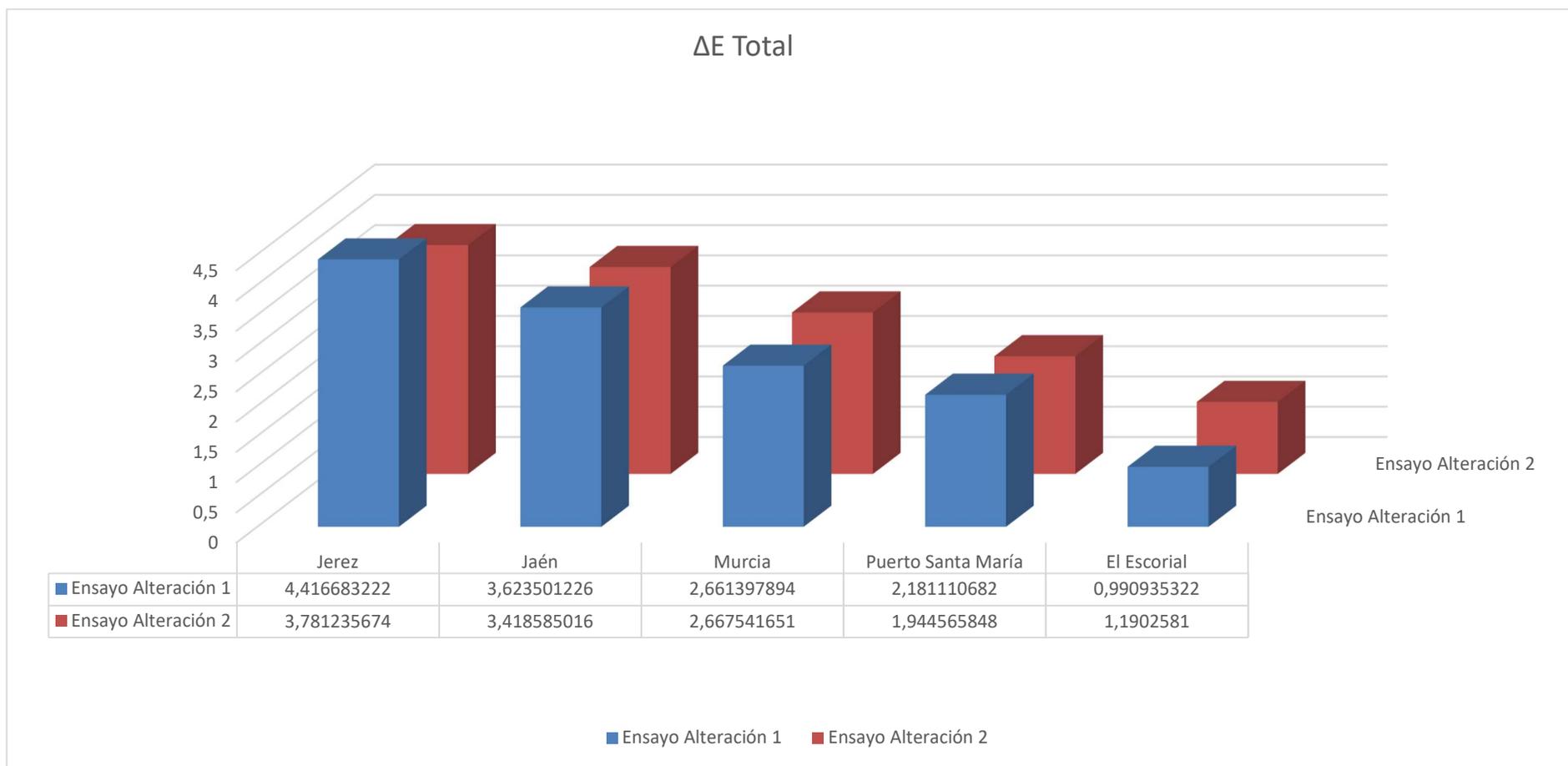


Figura 4-7. Valores  $\Delta E$  en la Colorimetría

Para este ensayo, al depender de 3 variables independientes, se ha representado la variable que las reúne a todas ( $\Delta E$ ). Esta variable expresa un cambio de color total, por tanto, es necesario para su cálculo el valor previo al ensayo de alteración y el medido después de este.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

En la **Figura 4-7** adjunta se puede ver el  $\Delta E$  para el ensayo de alteración 1 y el 2, siendo posible así comparar la variación absoluta de color producido por cada uno.

Bajo la Figura se representa una tabla con los valores de cada  $\Delta E$  a modo ilustrativo.

En la **Figura 4-7** se puede ver la variación de color total ( $\Delta E$ ) de cada grupo tras los ensayos de alteración. Se puede comprobar cómo es la piedra de Jerez que se sometió al ensayo de alteración 1 la que mayor variación de color ha sufrido. Mientras que la que menos cambio tiene es la del Escorial sometida al ensayo de alteración 2. También se puede comprobar cómo es el ensayo de alteración 1 el que mayores cambios provoca en los especímenes estudiados

### 4.2.3 Dureza



Figura 4-8. Diferencias de dureza

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Se representan los valores de dureza obtenidos en mediciones realizadas antes y después de cada ensayo de alteración, de esta forma se puede comprobar visualmente el posible cambio producido. Para comparar globalmente se ha utilizado los valores promedios de la variación de la dureza en cada grupo de probetas.

En la **Figura 4-8** se observa la diferencia de dureza antes y después de los ensayos de alteración para cada una de las procedencias.

Se observa cómo, de media, los ensayos de alteración disminuyen la dureza de los especímenes estudiados, para ver qué ensayo de alteración afecta más y a cuál de forma específica, se hará uso de las tablas adjuntas a continuación, **Tabla 4-3** y **Tabla 4-4**. Es claro que los especímenes del puerto de Santa María son los únicos que incrementan su dureza.

También se puede ver cómo es a la piedra con menor valor de porosidad, la del Escorial, la que mayor decremento de dureza sufre, en ambos casos.

*Tabla 4-3. Comparativa resultados dureza ensayo alteración 1*

Procedencia	AVG PRE G1	AVG POST 1	DIF PRE VS POST 1	% INCREMENTO DUREZA
Pto Santa María	65,00	69,40	4,40	6,77%
Jerez	77,87	73,00	-4,87	-6,25%
Murcia	92,33	82,47	-9,87	-10,69%
Jaén	70,07	57,27	-12,80	-18,27%
El Escorial	90,13	71,00	-19,13	-21,23%

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

*Tabla 4-4. Comparativa resultados dureza ensayo alteración 2*

Procedencia	AVG PRE G2	AVG POST 2	DIF PRE VS POST 2	% INCREMENTO DUREZA
Pto Santa María	68,3	73,9	5,60	8,20%
Jerez	77,0	72,5	-4,53	-5,89%
Murcia	89,5	79,6	-9,93	-11,09%
Jaén	70,7	60,6	-10,13	-14,33%
El Escorial	88,1	69,6	-18,53	-21,03%

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

#### 4.2.4 Absorción por Capilaridad

Se representa la absorción de agua frente a la raíz cuadrada del tiempo para cada grupo de probetas estudiadas. La absorción se muestra como incremento de peso producido en porcentaje, ya que lo que se mide es el aumento de peso en cada probeta durante el proceso de absorción.

Tras las Figuras se incluye una tabla dónde se puede ver el incremento de peso final tras los ensayos. Con esta tabla se pretende mostrar la capacidad total de absorción de agua de forma numérica. En rojo se encuentran los grupos de probetas que han disminuido su capacidad de absorción y en verde los que la han aumentado.

En las **Figuras 4-9 a 4-12** se puede observar una recopilación de los datos de absorción de agua por capilaridad, reuniendo de esta forma los resultados se pretende dar luz sobre el comportamiento de las probetas en ambos ensayos de alteración.

Algo que salta a simple vista es que ningún ensayo de alteración modifica significativamente el incremento final de los especímenes, para analizar esto se utilizará la **Tabla 4-5**. Algo que sí se puede ver claramente es que, tras ambos ensayos de alteración, las probetas llegan más rápido a la saturación.

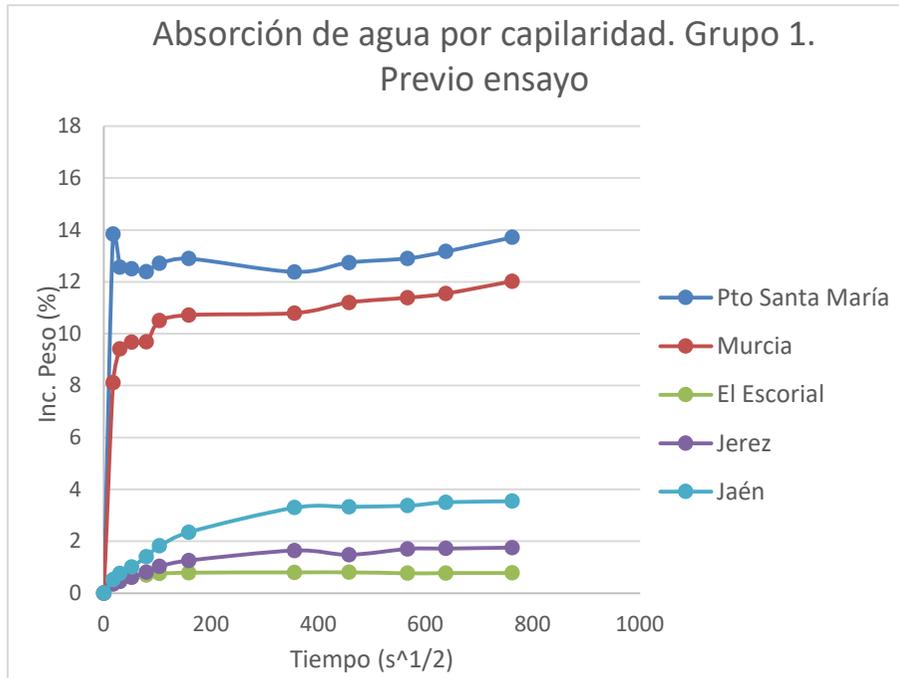


Figura 4-9. Absorción grupo 1 previo ensayo

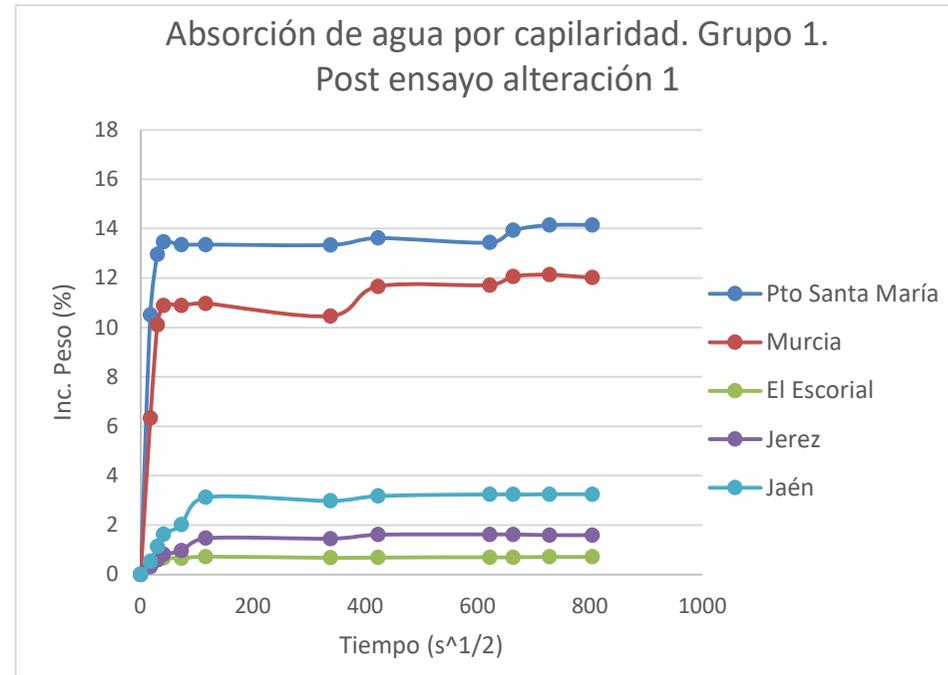


Figura 4-10. Absorción grupo 1 post ensayo

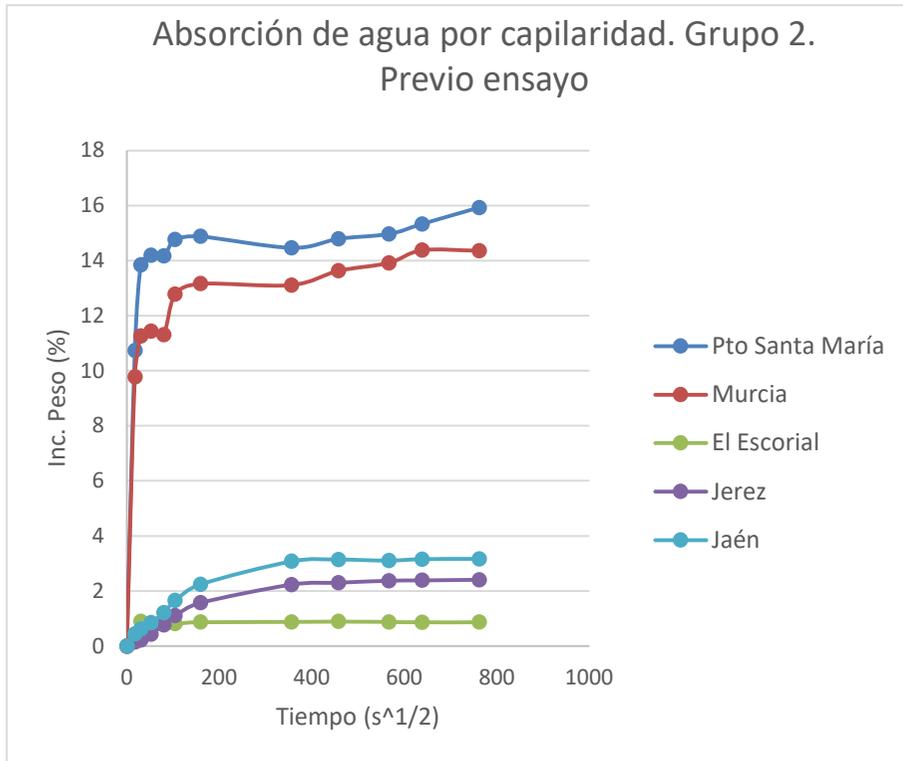


Figura 4-11. Absorción grupo 2 previo ensayo

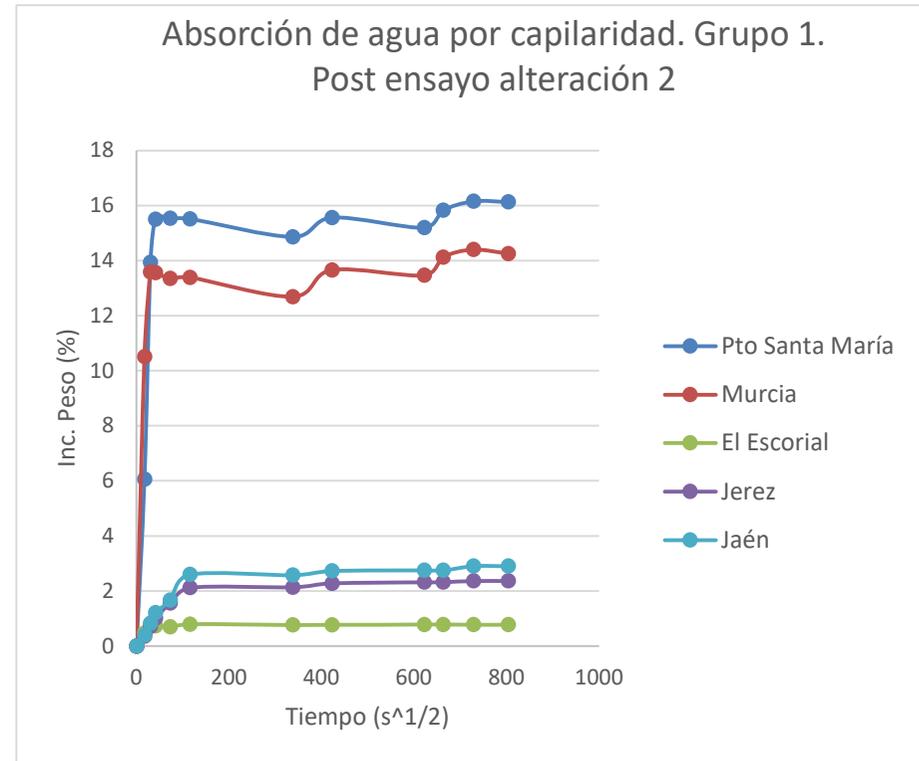


Figura 4-12. Absorción grupo 2 post ensayo

Tabla 4-5. Incremento de peso al final de los ensayos de absorción por capilaridad

% Incremento de peso final										
Procedencia	Pto Santa Maria		Murcia		El Escorial		Jerez		Jaén	
	Ensayo alt 1	Ensayo alt 2	Ensayo alt 1	Ensayo alt 2	Ensayo alt 1	Ensayo alt 2	Ensayo alt 1	Ensayo alt 2	Ensayo alt 1	Ensayo alt 2
Pre	13,717	15,929	12,027	14,364	0,783	0,871	1,755	2,406	3,548	3,169
Post	14,153	16,129	12,020	14,259	0,715	0,777	1,596	2,366	3,248	2,907
Diferencia	0,435	0,201	-0,007	-0,105	-0,067	-0,094	-0,159	-0,040	-0,300	-0,263

En la **Tabla 4-5** se encuentran los valores finales de % de incremento de peso de cada grupo de probetas, para los grupos 1 y 2 de cada procedencia, antes y después de los ensayos de alteración.

En verde se encuentran las probetas que han disminuido su capacidad de absorción tras la alteración y en rojo las que han aumentado su capacidad. Se comprueba cómo son aquellas provenientes del puerto de Santa María las únicas que ven aumentada su capacidad, mientras el resto demuestra un comportamiento contrario, siendo las de Jaén las que más disminuyen su capacidad.

Si se hace una media de los resultados de los ensayos de alteración 1 y 2, se comprueba cómo la tendencia es a perder capacidad, siendo el ensayo 2 el que mayor pérdida produce.

A continuación se muestra la **Tabla 4-6** con las pendientes de las rectas de absorción, estas pendientes representan la **Tasa de absorción capilar** que es una propiedad hidráulica que mide la capacidad de las piedras secas para absorber y transmitir agua a través de sus poros por efecto de la succión capilar. Se expresa en unidades de masa por unidad de tiempo, incremento de peso (%)/s<sup>1/2</sup>.

Tabla 4-6. Tasa de Absorción Capilar

<b>Tasa de absorción capilar</b>				
	G1 Previo	G1 Post alt1	G2 Previo	G2 Post alt2
Pto santa maría	0,441	0,442	0,471	0,458
Murcia	0,323	0,339	0,387	0,462
El Escorial	0,016	0,022	0,030	0,025
Jaén	0,025	0,038	0,021	0,027
Jerez	0,016	0,020	0,007	0,024

#### 4.2.5 Peeling Test

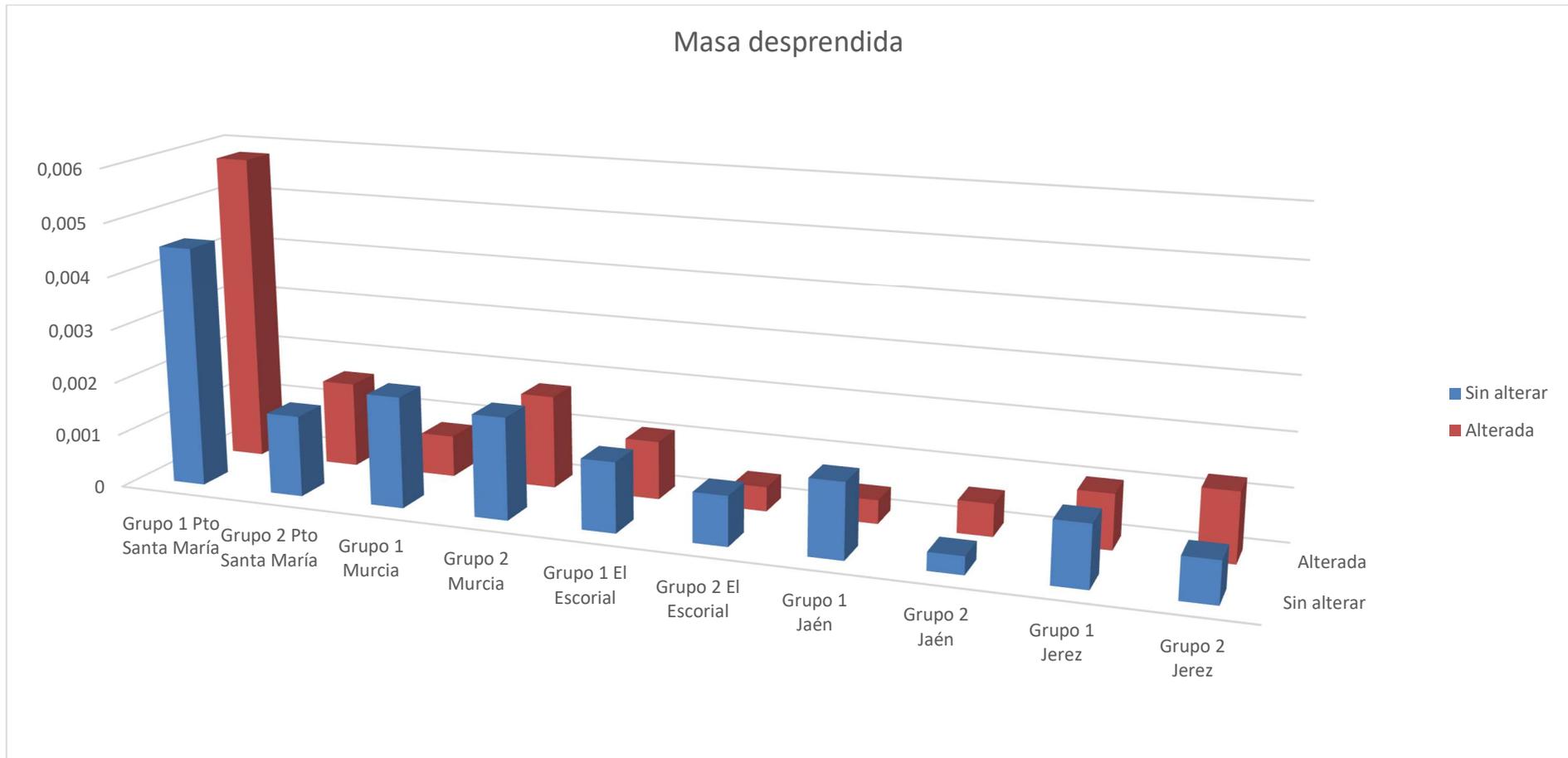


Figura 4-13. Masa desprendida en Peeling Test

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Para mostrar el grado de cohesión de las probetas estudiadas antes y después de los ensayos de alteración, se compara la diferencia entre el promedio de peso retirado por las tiras antes y después de la alteración. Se representan dos grupos de datos, en azul los datos de peeling test sin alterar y en rojo los referentes a los ensayos de alteración.

Tras las Figuras se adjunta la **Tabla 4-7** en la que se puede ver con claridad el peso arrastrado por las tiras antes y después de cada tipo de alteración, indicando la variación producida por éstos y el porcentaje final de cambio que produce cada uno.

En la **Figura 4-13** se representa la media de la diferencia de peso arrastrado por las tiras en el ensayo de alteración 1 y el 2. Se comprueba cómo, para la mayoría, esta diferencia disminuye en el sentido de la alteración 1, esto indica que es el ensayo que mayor pérdida de cohesión en los especímenes produce.

La piedra de El Puerto de Santa María, la más porosa de todas, sufre el mayor cambio, siendo la única que pierde mayor cohesión en el ensayo 1 que el 2.

Globalmente, en este ensayo, es la alteración 1 la que mayor cambio provoca, estos datos se pueden comprobar con la **Tabla4-7** adjunta a continuación.

*Tabla 4-7. Masa (g) desprendida en antes y después de los ensayos de alteración*

	PRE ALT1 (g)	PRE ALT2 (g)	POST ALT1 (g)	POST ALT2 (g)	VAR ALT 1	VAR ALT 2
Cádiz	0,0045	0,0058	0,0009	0,0005	-79,44%	-92,16%
Murcia	0,0015	0,0016	0,0014	0,0004	-7,59%	-72,50%
El Escorial	0,0021	0,0008	0,0003	0,0006	-83,86%	-22,00%
Jaén	0,0019	0,0017	0,0011	0,0010	-39,90%	-41,38%
Jerez	0,0013	0,0011	0,0008	0,0013	-41,00%	18,35%

#### 4.2.6 Absorción de gota

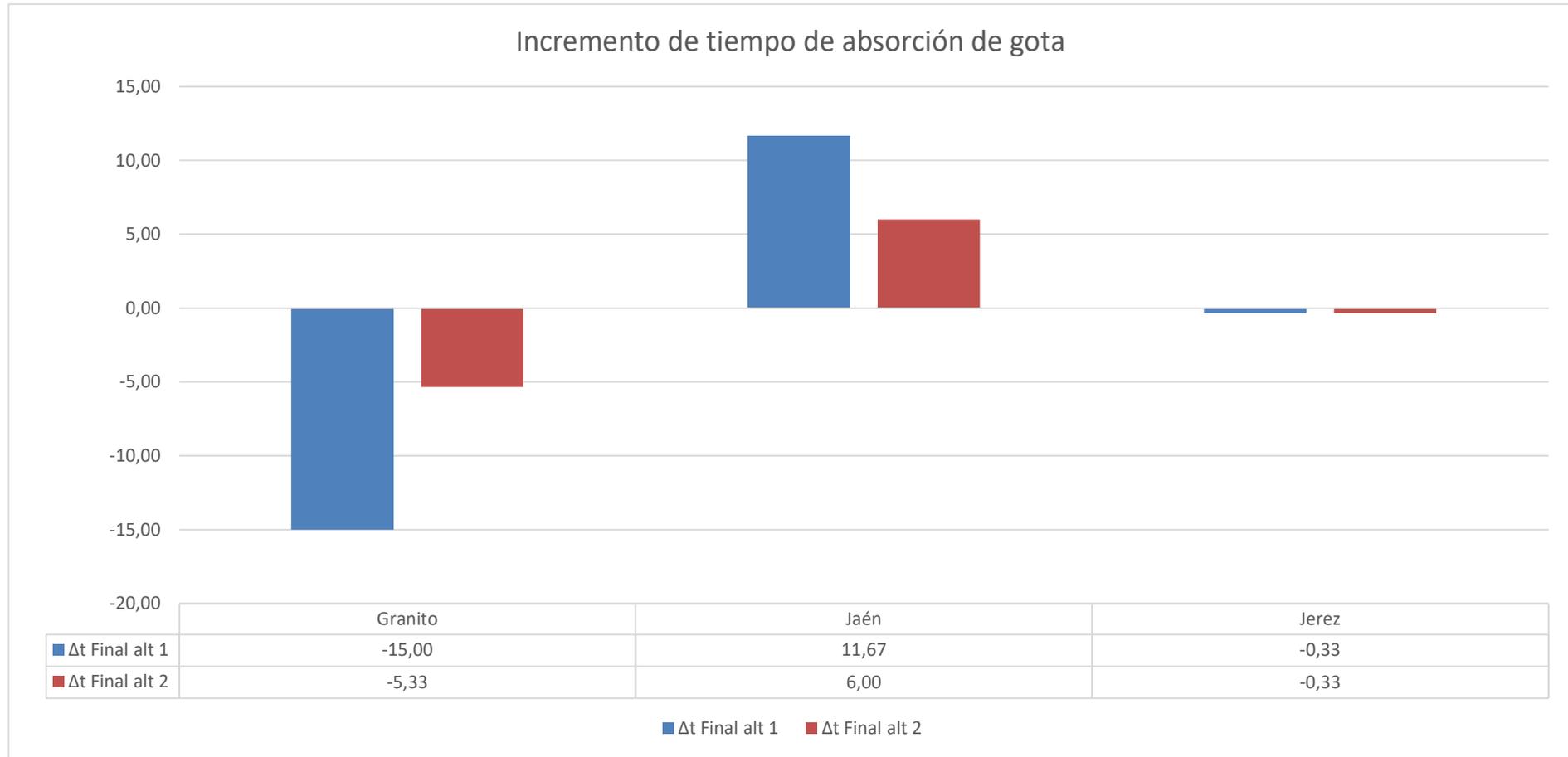


Figura 4-14. Incremento de tiempo de absorción de gota

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Se representa el tiempo, en minutos, que tarda una gota en ser absorbida por cada probeta. En las Figuras se puede ver dos columnas por tipo de piedra, en una de ellas (la situada a la izquierda) se ve el tiempo en la medida previa a la alteración y en la otra (derecha) el tiempo que tarda la gota en ser absorbida tras el ensayo de alteración.

En la **Figura 4-14** se pueden ver la variación en el tiempo que tarda la gota en penetrar en la piedra, con respecto al tiempo tomado antes de la alteración. Los resultados indican que es el ensayo de alteración 1 el que mayor diferencia produce en el tiempo de absorción.

## 5 CONCLUSIONES

### *Introducción*

En esta sección se van a reunir los resultados, ordenando por procedencia de las piedras y agrupando por grupos de porosidad similar. Esto se debe a que la porosidad condiciona de gran forma los resultados, siendo los poros la principal vía de entrada del agua, agente alterador y elemento presente en varios ensayos.

Con esto se pretende tener una visión global de cuánto ha afectado cada ensayo de alteración a los resultados de los diferentes ensayos en cada piedra

*Tabla 5-1. Resultados generales*

PROCEDENCIA	Cadiz		Murcia		Granito		Jaén		Jerez	
ENSAYO	ALT 1	ALT 2	ALT 1	ALT 2	ALT 1	ALT 2	ALT 1	ALT 2	ALT 1	ALT 2
Colorimetría ( $\Delta E$ )	2,18	1,94	2,66	2,67	0,99	1,19	3,62	3,42	4,42	3,78
Dureza	6,77%	2,47%	-10,69%	-5,93%	-21,23%	-22,50%	-18,27%	3,52%	-6,25%	-4,63%
Absorción por Capilaridad (tasa inicial de absorción)	0,20%	-2,75%	4,75%	19,55%	37,17%	-15,44%	47,92%	31,14%	27,74%	224,16%

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

<b>Peeling test (Diferencia de peso)</b>	-79,44%	-92,16%	-7,59%	-72,50%	-83,86%	-22,00%	-39,90%	-41,38%	-41,00%	18,35%
<b>Absorción de gota (Tiempo de absorción)</b>	-	-	-	-	-21,39%	-50,89%	70,60%	65,88%	-10,31%	-20,12%

Tabla 5-2. Grupos de piedras ordenadas por porosidad

Procedencia	Porosidad media (%)
Pto Santa María	33,37
Murcia	32,44
Jaén	14,59
Jerez	11,71
El Escorial	2,57

En la **Tabla 5-2** se puede comprobar la existencia de 3 claros grupos, de mayor a menor porosidad, puerto de Santa María y Murcia, con una porosidad media de 32,90%, luego Jaén y Jerez con una porosidad media de 13,15% y finalmente el Escorial, que por tener la menor porosidad del resto no se ha podido agrupar, con una porosidad del 2,57%.

Por ensayos,

- **Colorimetria**

Para el grupo formado por El Puerto de Santa María y Murcia, se comprueba como el cambio de color absoluto se mantiene en una media de 2,36, siendo las piedras procedentes de Murcia las que mayor cambio sufren, quedándose El Puerto de Santa María por detrás.

Murcia muestra unos resultados similares en los dos ensayos de alteración, mientras que la diferencia en las piedras de El Puerto de Santa María es, aunque pequeña, algo más notoria, yendo la tendencia hacia mayor cambio en el ensayo de alteración 1.

El grupo formado por Jaén y Jerez sufre un cambio de color absoluto promedio de 3,81. En los resultados de la piedra de Jaén se puede ver un cambio de color uniforme, siendo el ensayo de alteración 1 el que mayor cambio produce.

El mismo comportamiento se puede ver para las piedras de Jerez, dónde el ensayo de alteración 1 supera en cambio de color absoluto al 2. En este caso con una diferencia claramente superior, del 0,64 vs los 0,20 de Jaén.

De nuevo se comprueba cómo el ensayo de alteración 1 produce mayores cambios en el color.

Finalmente, el menor cambio se aprecia en la piedra del Escorial, con un cambio promedio de 1,09. En este caso el sentido del cambio de color tiende hacia la alteración 2. La diferencia entre ambos ensayos es de 0,20, muy pequeña.

El promedio de cambio de color absoluto se encuentra en un 2,69.

- ***Dureza***

La dureza se representa por cambio porcentual con respecto a su valor previo a los ensayos de alteración, por tanto, un porcentaje positivo indica aumento en la dureza, y uno negativo, decremento en la misma.

El grupo de piedras de formado por El Puerto de Santa María y Murcia presentan en este ensayo incrementos no muy grandes y de sentido contrario, en contra de lo que podría esperarse.

Para la piedra de El Puerto de Santa María, en ambos ensayos de alteración, se comprueba un aumento en su dureza, con un 4,62% de media, siendo el ensayo de alteración 1 el que mayor incremento en la dureza produce.

En la piedra de Murcia se comprueba un cambio de sentido en los resultados, siendo su dureza promedio inferior a la previamente calculada, con un -8,31% de media en su decremento. Es el ensayo de alteración 1 el que mayor pérdida en la dureza produce.

Las piedras con origen Jaén y Jerez presentan resultados más dispares. Mientras que las de Jerez tienen unos resultados homogéneos, negativos en ambas alteraciones, ligeramente inferior para la alteración 1, las de Jaén presentan la mayor diferencia.

Las piedras de Jaén en el ensayo de alteración 1 decrementan su dureza en un 18% y en la alteración 2 aumentan su dureza un 3,52%.

El granito del Escorial presenta una disminución en su dureza del 21,86% de media, siendo los resultados de ambos ensayos de alteración muy parecidos.

Se puede asumir que la tendencia de la dureza, bajo este tipo de alteración, es a disminuir, con un promedio de cambio final del -7,67%. Aunque la piedra del Puerto de Santa María experimenta un incremento en su dureza, son porcentajes de cambio pequeño en comparación con el resto.

Este incremento puede no ser tal, sino que se debe al tipo de medida que se ha realizado y las características de la piedra, que está formada por granos de cuarzo, de tamaño incluso milimétrico, y cemento calizo (materiales con durezas intrínsecas bastante diferentes) y con poros de dimensiones considerables. Si la punta de medida del durómetro se apoya en un grano de cuarzo se obtienen valores superiores que si se apoya en una zona de cemento calizo o aún menores si se apoya en un hueco superficial. Aunque este problema se intenta compensar haciendo varias medidas, es difícil eliminarlo por completo.

- **Absorción por capilaridad**

De este ensayo se representa la velocidad de absorción, representada por la tasa inicial de absorción, calculada mediante la pendiente de la recta inicial hasta el tercer punto.

Para el grupo formado por las piedras de El Puerto de Santa María y Murcia se han obtenido resultados dispares.

La piedra de El Puerto de Santa María presenta cambios pequeños, siendo el ensayo de alteración 1 casi despreciable. El ensayo de alteración 2 presenta un empeoramiento de la velocidad de absorción del 2,75%.

La piedra con origen Murcia da unos resultados más concluyentes, para la alteración 1, su velocidad de absorción aumenta en un 4,75% y para el 2, un 19,55%.

En el grupo formado por las piedras de Jaén y Jerez los resultados son más homogéneos. Se comprueba que ambas alteraciones producen un aumento en la velocidad de absorción.

Para las piedras de Jaén, es el ensayo de alteración 1 el que mayor cambio produce, mientras que el ensayo 2, aún con un cambio sustancial, cae un 17% inferior.

El cambio producido en las piedras de Jerez es razonable para el ensayo de alteración 1, para el ensayo de alteración 2 se ve cómo la pendiente cambia drásticamente, realizando un cálculo de esta y comparándola con la pendiente de la absorción previa alteración, se obtiene un 225% de cambio. Este cambio es únicamente para la pendiente, es decir, que tras el ensayo de alteración 2 esta piedra absorbe mucho más rápido, sin embargo, la cantidad final de agua que absorbe apenas varía de la inicial, siendo 0,263 % inferior.

A continuación, se muestra un detalle del cambio de tendencia en las pendientes previamente mencionado;

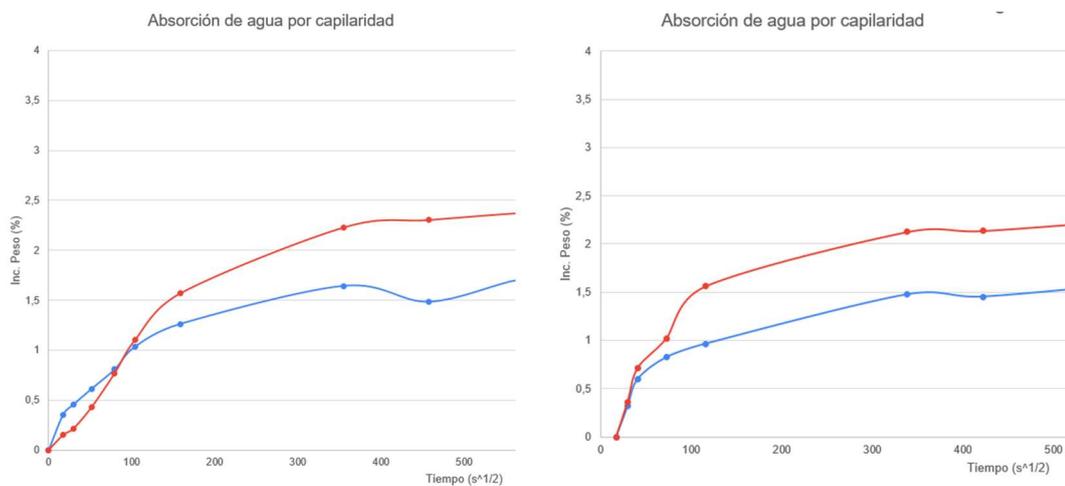


Figura 5-1. Absorción por capilaridad previa vs post alteración

Si nos fijamos en la línea roja de ambas figuras, que representa al grupo 2 de alteración, se puede comprobar el claro cambio en la tendencia de la pendiente, explicándose así la variación del 225% en su velocidad de absorción

Finalmente, las piedras con origen el Escorial son la que mayor diferencia presentan en sus resultados. Para la alteración 1, su velocidad de absorción aumenta, al contrariopasa con la alteración 2, dónde su velocidad disminuye (-15,44%), en valor absoluto, la mitad de lo que aumenta en el primero (37,17%).

Se puede asumir que los ensayos de alteración han cambiado la velocidad de absorción de todas las probetas, con un aumento promedio del 16,70%, siendo el ensayo de alteración 1 el que más aumenta, con un 22,51%.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

- ***Peeling test***

Para el estudio de los resultados de este ensayo se ha comparado el peso arrastrado por las tiras antes y después de la alteración, mostrando el porcentaje de cambio con respecto al peso inicial.

Los resultados en negativo indican que se arrastró menos peso tras el ensayo, indicando esto un incremento en la cohesión del espécimen estudiado. Los resultados en positivo indican lo contrario, que se ha arrastrado más peso, por tanto, su cohesión ha disminuido.

En este caso se hablará de los resultados en global, ya que el comportamiento para todos los grupos de probetas ha sido similar, aumentar su cohesión.

Son destacables ciertos resultados, como por ejemplo el aumento del 92% en la alteración 2 de El Puerto de Santa María, o el aumento del 8% en la alteración 1 de Murcia. Pero lo más destacable es que el único grupo de piedras que ha disminuido su cohesión ha sido el grupo de alteración 2 de la piedra de Jerez, mismo grupo que para la absorción por capilaridad, aumentaba su velocidad en un 225%, de nuevo, resultados que salen del comportamiento global.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

- ***Tiempo de absorción de gota***

Cabe recordar que en este ensayo hay dos grupos de piedras que no han podido estudiarse, pues la velocidad con la que absorbían la gota se puede aproximar, de forma bastante acertada, a 0, debido a su alta porosidad.

Se representan los porcentajes de cambio en el tiempo de absorción de gota después y antes de los ensayos de alteración

Estas piedras son las de El Puerto de Santa María y Murcia, por tanto, se estudiarán el resto.

El grupo de Piedras formado por Jerez y Jaén, aún con porosidades similares, dato que haría pensar que su tiempo de absorción de gota y comportamiento serían parecidos, presentan resultados totalmente diferentes.

Para las piedras con origen Jaén, ambos ensayos de alteración aumentan el tiempo de absorción de la gota, con un cambio de magnitud similar, siendo su promedio de 68,24%.

Sin embargo, para las piedras de Jerez disminuyen su tiempo de absorción de gota, con un comportamiento totalmente distinto a las anteriores, en este caso es la alteración 2 la que mayor cambio produce.

Los resultados de la piedra del Escorial muestran un decremento en su tiempo de absorción de gota.

Para éstas, es el ensayo de alteración 2 el que mayor cambio produce, siendo su diferencia con el 1 significativa, -50% y -22%.

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

Analizando los resultados, se concluye finalmente que, aunque los cambios son menores tras los ensayos de alteración, es el ensayo 2 el que mayor cambio produce en las propiedades medidas de las probetas estudiadas, en la tabla que se muestra a continuación se pueden ver los porcentajes de cambio producidos por cada ensayo de alteración en las probetas.

*Tabla 5-3. Cambio final*

PROCEDENCIA	ALTERACIÓN 1	ALTERACIÓN 2
Pto Santa María	-24,16%	-30,82%
Murcia	-4,51%	-19,63%
El Escorial	-22,33%	-27,71%
Jaén	15,09%	14,79%
Jerez	-7,45%	54,44%
<b>PROMEDIO CAMBIO</b>	<b>-8,67%</b>	<b>-13,10%</b>

## 6 BIBLIOGRAFÍA

### **Piedra de Cádiz**

[1] - PUCHE RIART, o.; GARCIA DE MIGUEL, J. M.; SANCHEZ CASTILLO, L; MATA PERELLO, J. M., Y GONZALEZ AGUADO, M. T. (1990) “ *El uso de las piedras de corte en los monumentos y en la construcción. I. Areniscas y calizas*”.

[2] – P.MORAL CARDONA, J.M. GUTIÉRREZ MAS, A.J. GARCIA GUERRERO, A. SANCHEZ BELLON, J.J. MUÑOZ PEREZ, y M.A. CABALLERO.(1997) “*Explotaciones de minerales y rocas industriales en los materiales negoenos de la zona occidental de la provincia de Cádiz*”.

[3]– M. ALCALDE y A. MARTIN.(1990) “*Morfología macroscópica de alteración de la piedra de la Catedral de Sevilla, España*”

### **Piedra del Escorial**

[4] – D. MARTÍN (2006). “*El granito como piedra de construcción en Madrid: durabilidad y puesta en valor*”

### **Piedra de Jerez**

[5] - F. ARROYO, R. VILLEGAS, J. RODRÍGUEZ, M. ALCALDE y S. MORENO. “*La alteración de la piedra en la Catedral de Jerez de la Frontera (Cádiz, España)*”

[6] – L. Rubio y M.A. BELLO. (1995) “*Evaluación de las características relacionadas con la absorción de agua para diversas piedras de España tratadas con productos de conservación*”

[7] – F. Aroca (2019) “*Controversias y litigios en torno al uso de la piedra en Jerez de la Frontera*”

### **Piedra de Jaén**

[8] – J. GISBERT, R. NAVARRO, J. SÁNCHEZ-VALVERDE, J.M. BALTUILLE, y E. SEBASTIÁN-PARDO. (2017), “*Caracterización y principales patologías de la arenisca “piedra dorada” empleada en los edificios de las ciudades de Úbeda y Baeza (Jaén, Sur de España)*”

### **Piedra de Murcia**

[9] – A. VERA, (1997), “*La piedra caliza de la catedral de Murcia*”

[10] – J. P. CALVO y J. MORALES, (1997). “*Avances en el conocimiento del terciario ibérico*”

### **Factores de alteración acelerada**

[11] – F.J. ALONSO, R. ESBERT, J. ORDAZ y P. VAZQUEZ, (2006). “*Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación*”.

[12] – M.F. TORRES, (2017). “*Ensayos de alteración acelerada sobre materiales cerámicos*”.

[13] – A. MARTÍN, (1993). “*Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico*”

Materiales pétreos empleados en monumentos. Estudio de características físicas y alterabilidad por factores ambientales.

### **Descripción de la metodología de realización de los ensayos**

[14] – M. ALCALDE y R. VILLEGAS, (2003), “*Metodología de diagnóstico y tratamiento para la conservación de los edificios históricos*”

[15] – M. ALCALDE, (1989),” *Sintomatología de alteraciones de las catedrales de Sevilla, Cádiz y Almería*”

[16] – M. DRDÁCKÝ, J. LESÁK, S. RESCIC, Z. SLISLOVÁ, P. TIANO y J. VALACH (2012), “*Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. Materials and Structures*”

[17] – F. ARROYO, (2008). “*Materiales de construcción. Consejo superior de investigaciones científicas*”

## **7 NORMAS DE ENSAYO**

---

ASTM D 2440. Método de prueba estándar para la propiedad del caucho: dureza del durómetro

PrEN 16085:2012. Conservación del Patrimonio Cultural. Metodología para la toma de muestras de materiales del patrimonio cultural. Reglas Generales,

UNE-EN 1925:1999. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad,

UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

UNE-EN 13755:2002. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica

UNE-EN 14205:2004. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la dureza Knoop,

UNE-EN 15556:2011. Conservación del Patrimonio Cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies