



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del comportamiento de un revestimiento superficial
de auto-reparación de materiales de construcción*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Cristina Coig-O'Donnell Salvá

DIRECTORES: Jorge Feijoo Conde
Iván Garrido González

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación del comportamiento de un revestimiento superficial
de auto-reparación de materiales de construcción*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento de un revestimiento superficial de auto-reparación de nueva síntesis aplicado sobre materiales de construcción, con el fin de mejorar su durabilidad una vez puesto en servicio. Este estudio se enmarca en un proyecto nacional que trata mejorar la protección de las edificaciones frente a agentes externos cuya acción cada vez es más nociva debido a los efectos del cambio climático. Para su realización, se ha seleccionado como material para evaluar la eficacia del consolidante, basado en nanopartículas de CaO recubiertas con Al_2O_3 , la arenisca Dorada Urbión. El estudio ha evaluado como la aplicación de este consolidante influye en las propiedades físico-mecánicas y térmicas del material, así como en su respuesta frente a los siguientes ensayos de alteración: hielo-deshielo, choque térmico y sales solubles. Los resultados obtenidos indican que el tratamiento apenas penetra en el material por lo que no influye enormemente en sus propiedades iniciales. La arenisca tanto tratada como sin tratar muestra una durabilidad similar frente a los procesos de alteración ensayados. Queda patente que es necesario mejorar la síntesis de las nanopartículas con el objeto de incrementar su penetración en la red porosa de un material de construcción.

PALABRAS CLAVE

Arenisca, Degradación, Auto-reparación, Consolidante, Durabilidad

AGRADECIMIENTOS

Antes de nada, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores por su orientación a lo largo de esta última etapa del curso con mi TFG, que, si bien en un inicio parecía sencilla, ha supuesto un reto mayor de lo esperado, Sr.Feijoo y Sr.Garrido gracias, ha sido un placer trabajar con ustedes.

Asimismo, deseo agradecer a todos los profesores que han formado parte de mi trayectoria académica durante estos años. Cada uno de ellos ha contribuido, de una u otra forma, a mi formación tanto académica como personal.

De manera muy especial, quiero agradecer a mis padres, a mis hermanas y al conjunto de mi familia, quienes han sido y continúan siendo los pilares fundamentales de mi vida. A pesar de la distancia durante estos años, su apoyo incondicional, sus consejos y su cariño han sido imprescindibles en cada momento. Sin ellos, esta etapa de mi vida que finaliza, no habría sido igual.

Por último, gracias a la escuela por haberme dado la oportunidad de conocer a personas que, a día de hoy, forman parte esencial de mi vida. Compañeros y amigos que se han convertido en una segunda familia, que han estado presentes en los momentos difíciles y que siempre han creído en mí.

CONTENIDO

Contenido	6
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	11
1 Introducción y objetivos	12
1.1 Contexto	12
1.2 Objetivos	13
1.3 Estructura de la memoria	13
2 Estado del arte	15
2.1 Alteración de materiales de construcción una vez puestos en servicio.....	15
2.1.1 Generalidades	15
2.1.2 Origen de las sales solubles como principal agente de alteración	16
2.2 Estrategia de intervención frente a la problemática planteada.....	24
2.2.2 Tratamiento de Consolidación e Hidrofugación.....	28
2.2.2.1 Consolidantes.....	28
2.2.2.2 Hidrofugantes	32
2.3 Existencia de nuevo recubrimiento en proceso de ensayo	32
2.4 Métodos de aplicación	33
3 Desarrollo del TFG.....	35
3.1 Material empleado.....	35
3.1.1 Roca Seleccionada. Dorada Urbión	35
3.1.2 Consolidante ASSIST	37
3.2 Caracterización del material.....	37
3.2.1 Porosidad Accesible.....	37
3.2.2 Capilaridad.....	38
3.2.3 Ultrasonidos	40
3.2.4 Dureza superficial	41
3.2.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).....	42
3.3 Ensayos de durabilidad	43
3.3.1 Hielo-Deshielo	43
3.3.2 Choque térmico.....	44
3.3.3 Sales	45
3.4 Análisis del comportamiento térmico	47
4 Resultados	50

4.1 Caracterización del material.....	50
4.1.1 Propiedades físico-mecánicas	50
4.1.2 Análisis SEM	52
4.1.3 Durabilidad Hielo-Deshielo	54
4.1.4 Durabilidad Choque térmico.....	56
4.1.5 Durabilidad frente a la acción de sales solubles	57
4.2 Análisis termográfico	59
4.2.1 Ensayo hielo-deshielo	59
4.2.2 Ensayo choque térmico	60
4.2.3 Ensayo contaminación por sales: NaCl	61
4.2.4 Ensayo contaminación por sales: Na ₂ SO ₄	61
5 Conclusiones y líneas futuras	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Líneas futuras	63
6 Bibliografía.....	64
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	68
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	69
Anexo III: Declaración del uso de la inteligencia artificial.....	70
Anexo IV: Explicación código utilizado en google colab.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Imagen de la catedral de Santiago (Imagen extraída de Wikimedia Commons).....	15
Figura 2-2 Imagen del proceso de Lixiviación en material de construcción. (Imagen extraída de [14]).....	17
Figura 2-3 Vista general del proceso de entrada de sales por absorción capilar, y descripción de las fases del proceso de alteración que va generando en el mismo. (Imagen generada con Gemini en base a la información recogida de [16]).....	18
Figura 2-4 Arenización avanzada y alveolización en algunos sillares que conforman el ábside semicircular de la Capilla de Nuestra Señora de la Lanzada del siglo XII. (Imagen extraída de [18])..	19
Figura 2-5 Escultura con zonas señaladas que han sido afectadas en el material de mármol de Océano en la Fuente di Trevi, Roma. (Imagen extraída de [19]).....	19
Figura 2-6 Costra negra de sulfatación en granito del Palacio Real. (Imagen extraída de [22]).....	20
Figura 2-7 Distribución en zonas del deterioro ocasionado por sales debido al ascenso capilar del agua en muros. En el gráfico de la izquierda se muestra la concentración de los principales iones en altura. (Imagen generada con Gemini a partir de la información extraída de [7]).....	22
Figura 2-8 Ejemplos de patologías detectadas en edificios de la Escuela Naval Militar. (Imagen extraída de [2]).....	24
Figura 2-9 Estrategia seguida para combatir el problema asociado a la presencia de sales solubles. (Imagen generada con Gemini a partir de la estrategia de intervención recogida en [2])	24
Figura 2-10 Esquema del proceso de desalación mediante el uso de baños estáticos. Los puntos rojos representan la sal presente en el interior del material poroso. (Esquema elaborado con Gemini a partir de la información recogida de [2]).....	25
Figura 2-11 Proceso de extracción de sales mediante el uso de papetas. (Imagen generada con Gemini a partir de la información recogida de [18])	27
Figura 2-12 Esquema de extracción de sales solubles presentes en un muro mediante electrocinética. (Imagen generada por Gemini a partir de la información recogida de [30])	27
Figura 2-13 Tratamiento con nanopartículas. Ilustración antes y después del tratamiento. (Imagen extraída de [33]).....	31
Figura 2-14 Esquema de proceso de auto-reparación del consolidante ASSIST. (Imagen extraída de [3]).....	33
Figura 3-1 Mapa de localización geográfica de la arenisca empleada.(Imagen extraída de [41]) ...	36
Figura 3-2 Fotografía en detalle de la arenisca tipo Dorada Urbión	36
Figura 3-3 a) producto en polvo de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$. b) Etanol empleado en la disolución	37
Figura 3-4 Fases del ensayo de porosidad accesible al agua (Imagen generada con Gemini).....	38
Figura 3-5 Etapas del ensayo de absorción capilar. (Imagen generada con Gemini).....	39
Figura 3-6 a) Equipo de medición Pundit Lab (a). Se aprecia como en materiales sin huecos la onda viaja de manera directa (b) (Imagen generada con Gemini), mientras que, en materiales con huecos o fisuras la velocidad disminuye y llega más atenuada (c). (Imagen generada con Gemini)	40

Figura 3-7 Esquema explicativo de cómo funciona este tipo de medición en un material duro (imagen de la izquierda) y en un material más blando (imagen de la derecha). (Imagen generada con Geimini de acuerdo con lo mencionado en diversos estudios [53,54])	42
Figura 3-8 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo. Modelo JSM-6700F	43
Figura 3-9 Imagen explicativa del proceso de Hielo-Deshielo. (Imagen generada con Gemini)	44
Figura 3-10 Esquema del proceso de Choque térmico. (Imagen generada con Gemini)	45
Figura 3-11 Esquema de los ensayos de sales desarrollados en el trabajo. (Imagen generada con Gemini)	46
Figura 3-12 Cámara FLIR modelo E85 (Imagen proporcionada por [57])	47
Figura 3-13 Recorte de cada muestra tras el ensayo de choque térmico mediante FLIR Tools+	48
Figura 3-14 Diagrama de flujo del código empleado en Google Colab. (Imagen generada con Gemini)	49
Figura 4-1 Gráfica absorción de agua por inmersión tanto antes como después de aplicar el consolidante	51
Figura 4-2 a) Gráfica de la absorción de agua por el método capilar. b) Gráfica de la pendiente resultante debido al método capilar	52
Figura 4-3 Imágenes SEM de la roca Dorada Urbión embebida en resina sin tratamiento. Se muestra en detalle los análisis EDS realizados en zonas puntuales para identificar los minerales presentes	53
Figura 4-4 Imagen SEM de muestra de arenisca embebida en resina y tratada en superficie. A la derecha se aprecia la distribución de los principales cationes presentes en el área roja correspondiente al mapping realizado	53
Figura 4-5 Imágenes SEM, correspondientes al corte transversal, de una muestra de arenisca consolidada, Se puede apreciar que a lo largo de la sección aparecen nanopartículas de calcio en los poros correspondientes al compuesto aplicado	54
Figura 4-6 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 2 ciclos de alteración de Hielo-Deshielo y el resultado final de las muestras tras el ensayo.....	56
Figura 4-7 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 2 ciclos de alteración de Choque térmico y el resultado final de las muestras tras el ensayo	57
Figura 4-8 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 5 ciclos de alteración con NaCl.....	58
Figura 4-9 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 5 ciclos de alteración con Na ₂ SO ₄	58
Figura 4-10 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de calentamiento, desde -15°C hasta temperatura ambiente.....	59
Figura 4-11 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de enfriamiento, desde 65°C hasta temperatura ambiente	60
Figura 4-12 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de enfriamiento, desde 50°C hasta temperatura ambiente, realizado sobre muestras alteradas con NaCl	61
Figura 4-13 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de enfriamiento, desde 50°C hasta temperatura ambiente, realizado sobre muestras alteradas con Na ₂ SO ₄	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Principal punto de origen de los cationes y aniones presentes en los materiales con alta porosidad. (Tabla extraída de [18]).....	21
Tabla 2-2 Polímeros orgánicos usados como consolidantes. (Tabla extraída de [36])	30
Tabla 3-1 Propiedades de las sales solubles seleccionadas para los ensayos.....	46
Tabla 4-1 Propiedades físico-mecánicas del material analizado.....	50
Tabla 4-2 Valores de la dureza superficial (HLD) de las muestras (n=2).....	55
Tabla 4-3 Valores de ultrasonidos (m/s) de las muestras (n=2)	55

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto

A lo largo de la historia, y aún en la actualidad, la investigación sobre los materiales empleados en la construcción ha sido una cuestión de gran relevancia. El interés por su estudio radica en que sus propiedades determinan aspectos fundamentales de las edificaciones, como la durabilidad, la resistencia mecánica, la sostenibilidad y la seguridad estructural, entre otros.

Con el objetivo de garantizar la fiabilidad y el correcto funcionamiento de las construcciones, se han desarrollado numerosos estudios centrados en el análisis previo de los materiales de construcción. Estos análisis permiten evaluar su comportamiento frente a distintos agentes degradantes y prevenir posibles fallos o patologías, como el deterioro causado por la presencia de sales o los procesos de corrosión asociados a la humedad. Dichos estudios se encuentran ligados a los requisitos básicos de calidad y seguridad establecidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE) y en el Real Decreto relativo a los productos de construcción [1].

El proceso de alteración puede definirse como la transformación o modificación de las propiedades físicas de un material como consecuencia de su interacción con el entorno, sin que necesariamente se produzca una modificación de su composición química. En este proceso intervienen diferentes factores que pueden clasificarse en dos categorías principales. Por un lado, se encuentran los factores intrínsecos, relacionados con las características propias del material, tales como su naturaleza, composición o estructura. Por otro lado, los factores extrínsecos dependen de las condiciones ambientales y de los agentes externos presentes en el medio, que determinan el tipo y la intensidad del proceso de degradación que experimenta el material empleado en la construcción [2].

Entre ambos tipos de factores, los de carácter extrínseco suelen ser los que generan mayores daños en los materiales de construcción. Dentro de este grupo se incluyen agentes como el agua, las sales solubles, los contaminantes atmosféricos, los organismos vivos, las variaciones de temperatura, el viento o los movimientos sísmicos, entre otros. En particular, las sales solubles representan uno de los agentes de deterioro más relevantes, ya que habitualmente se encuentran disueltas en el agua, que actúa como principal medio de transporte. La penetración de estas sales en la red porosa de los materiales puede provocar importantes daños físico-mecánicos, como la pérdida de material, procesos de disgregación o la disminución de la resistencia mecánica [2].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de un tipo de material de construcción, en concreto la arenisca Dorada Urbión, frente a procesos de deterioro asociados a la presencia de sales solubles, así como frente a otros mecanismos de alteración, entre los que destacan el choque térmico y los ciclos de hielo-deshielo. Este estudio se enmarca dentro de un proyecto nacional, en el que se participa el CUD-ENM, centrada en la evaluación del comportamiento de un novedoso

tratamiento de auto-reparación, aplicable en materiales de construcción de naturaleza pétreo, frente a la exposición a diferentes factores ambientales [3].

Por otra parte, el deterioro de los materiales de construcción continúa siendo una problemática de gran interés en la actualidad, especialmente en infraestructuras situadas en entornos cerca de costa. En este sentido, resulta particularmente relevante su aplicación en edificaciones vinculadas a la Armada Española, cuya proximidad al medio marino incrementa la exposición a agentes de degradación. Por ello, esta investigación contribuye a mejorar el conocimiento sobre los procesos de alteración que afectan a estos materiales, favoreciendo su conservación, garantizando la seguridad y funcionalidad de las infraestructuras, y contribuyendo a prolongar la vida útil de los materiales de construcción, así como a reducir la necesidad de intervenciones o sustituciones futuras.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar la eficacia de un consolidante de auto-reparación de nueva síntesis frente a la acción de agentes de alteración externos, así como analizar su influencia en las propiedades físico-mecánicas y térmicas que llega a ocasionar cuando se aplica sobre un material de construcción de naturaleza pétreo (en este caso un tipo arenisca, la Dorada Urbión).

Para ello se establecerán los siguientes objetivos secundarios:

1. Caracterizar las propiedades iniciales del material de construcción seleccionado: porosidad accesible, porosidad capilar, etc.
2. Analizar como el tratamiento influye en las propiedades físico-mecánicas del material.
3. Confirmar que el consolidante penetra en el material de construcción mediante el uso de técnicas analíticas como la microscopía electrónica de barrido.
4. Evaluar la eficacia del consolidante frente a agentes de alteración tan comunes en obra como pueden ser la acción del hielo-deshielo, choque térmico y la acción de las sales solubles.
5. Analizar la influencia del tratamiento en la respuesta térmica del material de construcción.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria del presente trabajo se compone de diversos apartados estructurándose de la siguiente manera:

- Introducción y objetivos: en este primer apartado se presenta una breve contextualización del trabajo, así como los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Estado del Arte: en este capítulo se expone el origen de los materiales de construcción y, a su vez, los principales agentes que provocan su deterioro acompañado de las diversas alteraciones existentes. Además, se describen los distintos métodos de extracción de sales en estos materiales y las múltiples estrategias de reparación y conservación empleadas.
- Desarrollo del TFG: en esta sección se detalla el procedimiento experimental llevado a cabo, incluyendo el material y los complementos empleados, el consolidante utilizado y, los ensayos realizados.
- Resultados: en este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la finalización de cada uno de los ensayos, realizando una comparativa entre ellos.
- Conclusiones y líneas futuras: finalmente, se recogen las conclusiones derivadas del estudio realizado a lo largo del trabajo. Del mismo modo, se proponen posibles mejoras y líneas de investigación futuras que permitan dar continuidad y ampliar el alcance de este proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Alteración de materiales de construcción una vez puestos en servicio

2.1.1 Generalidades

Los materiales de construcción con los que se confeccionan las edificaciones, tanto antiguas como modernas, tales como casas, palacios, y otras edificaciones patrimoniales, conforme pasan los años, van perdiendo parte de las propiedades mecánicas que los caracterizan debido a la acción de agentes externos tales como el agua y las sales solubles. La acción alterante de todos estos agentes de deterioro cobra cada día una mayor relevancia debido entre otros factores, al cambio climático [2].



Figura 2-1 Imagen de la catedral de Santiago (Imagen extraída de Wikimedia Commons)

Es por ello que la progresiva degradación que han sufrido algunas construcciones pertenecientes al patrimonio monumental (Figura 2-1) con el paso del tiempo conduce a replantear la necesidad de buscar soluciones eficaces que permitan su conservación. De este modo, resulta posible recuperar, en la medida de lo posible, las características y propiedades originales que dichos bienes presentaban en el momento de su construcción.

El mantenimiento y la conservación de estos monumentos poseen un valor significativo, ya que, gracias al empleo de tecnologías novedosas que permiten la preservación de estas infraestructuras, es posible conocer en la actualidad los estilos arquitectónicos propios de épocas pasadas, así como las culturas que predominaban en cada periodo histórico.

Todos los materiales seleccionados para construir y crear nuevos monumentos tienen la gran desventaja de que en algunos casos se encuentran expuestos al exterior, en contacto directo con las condiciones ambientales, sufriendo cambios en sus propiedades y llegando al deterioro, lo cual se ve acelerado por la contaminación del aire provocada, sobre todo, por los combustibles fósiles empleados en el desarrollo industrial [2].

Debido al desconocimiento de las técnicas de reparación ante el deterioro y la alteración de los minerales y rocas, se confeccionó normas de actuación como son: la Carta de Atenas de 1931 o La Carta de la Conservación y Restauración de los objetos de Arte y Cultura de 1987, entre otras.

Las alteraciones que dan lugar al deterioro de los materiales de construcción no responden a una única causa, sino que son el resultado de la interacción entre las propiedades inherentes del propio material y los agentes externos a los que se encuentra expuesto a lo largo del tiempo. En este sentido, es posible diferenciar entre factores relacionados con la naturaleza del material y factores de origen externo que influyen directamente en los procesos de degradación.

En cuanto a las características propias del material, resulta fundamental conocer la composición mineralógica y química de la roca, ya que estas determinan su comportamiento frente a los agentes de alteración y permiten evaluar su resistencia y durabilidad. Asimismo, la porosidad desempeña un papel clave, puesto que condiciona tanto la capacidad de absorción de agua como la resistencia mecánica del material. La estructura y disposición de los minerales que conforman la roca también influyen de manera decisiva en la velocidad y el tipo de degradación que puede producirse. Del mismo modo, propiedades físicas como los coeficientes de dilatación térmica, la capacidad calorífica específica y la conductividad térmica determinan la respuesta del material frente a las variaciones de temperatura. Finalmente, la resistencia mecánica frente a esfuerzos de tracción, compresión y flexión constituye un factor determinante en la durabilidad del material y en su capacidad para resistir los procesos de deterioro.

Por otro lado, los agentes externos representan un elemento clave en los procesos de alteración de los materiales pétreos. Entre los más relevantes se encuentran el agua, las partículas presentes en la atmósfera, los seres vivos y las sales solubles. De todos ellos, las sales solubles destacan por su elevada capacidad de generar daños, especialmente cuando actúan en combinación con el agua, ya que pueden ser transportadas en disolución o penetrar en el material mediante procesos de absorción, favoreciendo mecanismos de degradación física y química en las superficies expuestas.

2.1.2 Origen de las sales solubles como principal agente de alteración

La acción degradante de las sales solubles en los materiales de construcción se manifiesta principalmente a través de procesos de pérdida progresiva de material [2,4,5]. Este tipo de deterioro está estrechamente relacionado con los ciclos repetidos de disolución y cristalización de las sales presentes en el interior del sistema poroso. En función de las condiciones ambientales, especialmente la humedad relativa y la temperatura, estos ciclos generan presiones internas sobre las paredes de los poros que, cuando superan la resistencia del material, provocan la ampliación de la red porosa y la aparición o propagación de fisuras. Como consecuencia, se produce una reducción de la sección resistente del material y, por ende, una disminución de sus propiedades mecánicas, lo que favorece una aceleración de los procesos de degradación. En los casos más severos, estos mecanismos pueden comprometer la estabilidad estructural del edificio o monumento afectado, poniendo en riesgo su conservación y el mantenimiento de su valor histórico-artístico [2,6].

Además del deterioro interno, las sales solubles también generan alteraciones significativas en la superficie de los materiales. La migración de las sales disueltas junto con el agua hacia las zonas más externas da lugar a procesos de cristalización superficial, que se manifiestan habitualmente en forma de

eflorescencias [5,7,8]. Estas aparecen como depósitos blanquecinos que alteran el aspecto estético del material, produciendo decoloraciones y pérdidas de homogeneidad cromática. El proceso de cristalización suele iniciarse en materiales con poros de mayor tamaño y puede extenderse posteriormente hacia poros de menor diámetro, donde las presiones de cristalización alcanzan valores más elevados y resultan especialmente dañinas [5,9].

Para abordar eficazmente este tipo de alteración, considerada una de las más perjudiciales para los materiales de construcción históricos, resulta imprescindible adoptar una estrategia basada en el conocimiento y control del fenómeno. En este sentido, es necesario identificar las sales presentes en el material y su concentración, analizar las posibles técnicas de intervención disponibles y aplicar tratamientos adecuados que permitan reducir o eliminar su presencia, siempre garantizando la compatibilidad con el material original y la conservación del bien patrimonial.

El origen de las sales solubles presentes en los materiales de construcción puede ser muy diverso, pudiendo identificarse distintas fuentes de procedencia. Entre ellas, caben destacar las siguientes:

- Lixiviación de la propia roca o de los materiales empleados en la construcción del monumento o edificio.

Las principales sales asociadas a esta fuente son las sales sulfatadas. Estas se originan, en muchos casos, como consecuencia de los procesos de alteración que afectan a morteros y recubrimientos a base de yeso, materiales que históricamente se utilizaban para acelerar el fraguado [10]. Durante su disolución, los iones sulfato y calcio pueden migrar e incorporarse al sistema poroso de la roca o del material constructivo adyacente (Figura 2-2). Un ejemplo representativo de este tipo de sales es la epsomita, cuya presencia se ha relacionado, entre otros factores, con el empleo de cementos de tipo Portland [11,12]. Por otro lado, en el caso de los morteros antiguos, la presencia de cloruros se ha vinculado al uso de arenas de origen marino en su elaboración, una práctica habitual en determinados contextos históricos [13].



Figura 2-2 Imagen del proceso de Lixiviación en material de construcción. (Imagen extraída de [14])

- **Filtración de sales a través del agua procedente del suelo y del subsuelo**

La incorporación de sales solubles desde el suelo y el subsuelo se produce principalmente mediante procesos de ascenso capilar (Figura 2-3), que permiten su transporte y distribución a través de las superficies de los edificios [9]. Estas sales pueden contener una amplia variedad de iones, entre los que

destacan carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, así como cationes como magnesio, calcio, sodio, potasio y amonio. No obstante, la composición iónica de estas sales no es uniforme, ya que depende tanto de la localización geográfica del edificio como del uso al que ha estado destinado.

En suelos urbanos predominan habitualmente los nitratos, asociados a la actividad microbiológica, y los cloruros, vinculados al consumo y uso de cloruro sódico [7,15]. Por el contrario, en suelos rurales y agrícolas son más frecuentes los sulfatos y nitratos de origen inorgánico, cuya presencia se relaciona con la utilización de fertilizantes en las prácticas agrícolas [16].

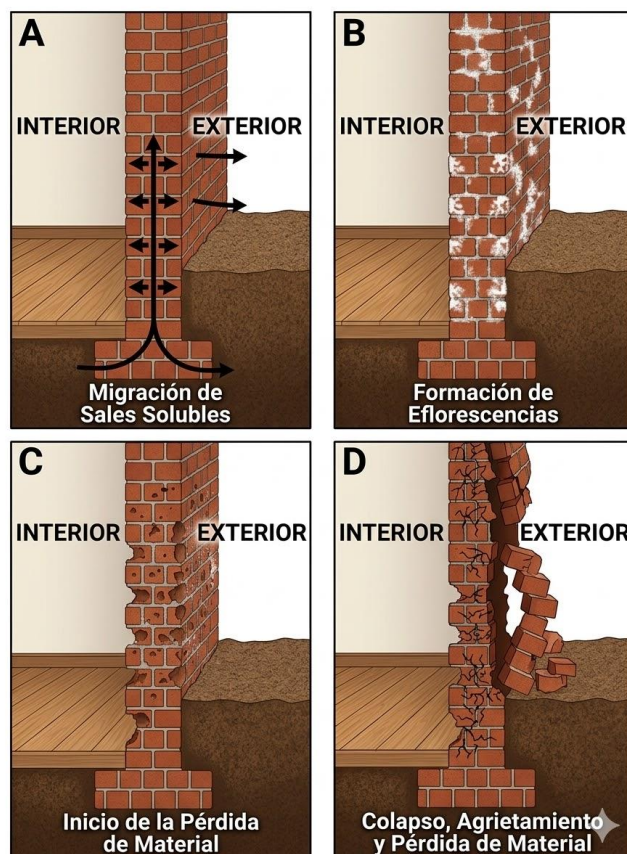


Figura 2-3 Vista general del proceso de entrada de sales por absorción capilar, y descripción de las fases del proceso de alteración que va generando en el mismo. (Imagen generada con Gemini en base a la información recogida de [16])

- **Deposición atmosférica de sales**

La deposición atmosférica es una de las principales fuentes de origen de las sales, variando los iones aportados en función de la zona geográfica en la que se encuentra el monumento.

En zonas costeras, la proximidad al mar condiciona de forma directa la cantidad de sales depositadas sobre los materiales de construcción (Figura 2-4). Así, cuanto menor es la distancia al litoral, mayor es la presencia de aerosoles marinos, especialmente ricos en cloruros y sodio [17]. En el caso del ion cloruro (Cl^-), de origen predominantemente oceánico, su concentración disminuye progresivamente a medida que aumenta la distancia al mar, un comportamiento similar al observado para el ion sodio (Na^+). Por el contrario, hacia el interior continental se registra un incremento relativo de sulfatos y nitratos [15].



Figura 2-4 Arenización avanzada y alveolización en algunos sillares que conforman el ábside semicircular de la Capilla de Nuestra Señora de la Lanzada del siglo XII. (Imagen extraída de [18])

Por otro lado, en áreas con elevada actividad industrial o tráfico intenso, la combustión de combustibles fósiles genera dióxido de azufre (SO_2) tal y como apunta [17], el cual, tras una serie de reacciones químicas en la atmósfera, puede transformarse en ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este compuesto se deposita posteriormente sobre los materiales constructivos, contribuyendo a la formación de sales sulfatadas (Figura 2-5). En ambos casos, la deposición puede producirse tanto en forma seca como húmeda, siendo esta última especialmente agresiva debido a la disolución y transporte de los compuestos hacia el interior de los poros del material.



Figura 2-5 Escultura con zonas señaladas que han sido afectadas en el material de mármol de Océano en la Fuente di Trevi, Roma. (Imagen extraída de [19])

- **Acción metabólica de organismos y microorganismos**

Los organismos vivos constituyen otra fuente significativa de sales solubles. Sus deposiciones, al disolverse con el agua de lluvia, generan principalmente sales de fosfato de magnesio y calcio, además de aportar nitratos y cloruros [15,20]. Asimismo, los restos óseos de seres vivos y las aguas cargadas de fertilizantes representan fuentes adicionales de fosfatos.

En cuanto a los microorganismos, estos desempeñan un papel relevante en la formación de determinadas sales. Los sulfatos pueden originarse a partir de procesos de oxidación del azufre promovidos por microorganismos, dando lugar también a la formación de sulfuros (Figura 2-6). Este tipo de actividad es especialmente frecuente en piedras calcáreas y en morteros elaborados a base de carbonato cálcico [21]. Por su parte, los nitratos se generan principalmente a partir de la descomposición de la materia orgánica, proceso en el que intervienen bacterias nitrificantes.



Figura 2-6 Costra negra de sulfatación en granito del Palacio Real. (Imagen extraída de [22])

- **Origen asociado a la actividad humana**

La actividad humana constituye una fuente adicional de sales solubles que afectan a los materiales de construcción. Entre ellas se incluyen:

- a) Cloruros procedentes de las sales empleadas para el deshielo de carreteras, que pueden alcanzar los edificios y monumentos en función de las condiciones meteorológicas.
- b) Sulfatos procedentes de la actividad industrial y de las emisiones derivadas del tráfico
- c) Fosfatos procedentes de restos de cenizas producidas en hornos de fundición o de la descomposición de restos óseos.

En la siguiente tabla (Tabla 2-1) extraída de [2], se recoge a modo resumen los principales focos de origen de cationes y aniones que conforman las sales solubles y que están presentes en los materiales pétreos.

Iones	Principal foco de origen
Cationes:	
Calcio	• Alteración de rocas calcáreas (mármoles, calizas y dolomías) ***
Sodio	• Alteración de materiales alcalinos utilizados en edificios *** • Alteración feldespatos * • Origen marino ***
Magnesio	• Alteración de minerales máficos *** • Alteración de feldespatos ** • Alteración de dolomita ** • Origen marino **
Potasio	• Alteración materiales alcalinos empleados en edificios *** • Alteración de feldespatos ** • Origen marino *
Aniones:	
Sulfato	• Atmósferas contaminantes *** • Origen marino *
Cloruro	• Origen marino *** • Atmósferas contaminantes * • Origen biológico*
Carbonato	• Alteración de rocas carbonatadas (mármoles, calizas y dolomías) *** • Atmósferas contaminantes *
Nitrato	• Atmósferas contaminadas ** • Origen marino * • Origen biológico ***
Fosfato	• Origen biológico ***
Oxalato	• Origen biológico *** • Origen antrópico *

***Origen más citado según la mayoría de los estudios realizados sobre el tema

**Origen frecuentemente citado en estudios realizados sobre el tema

*Posible origen según diversos estudios realizados sobre el tema

Tabla 2-1 Principal punto de origen de los cationes y aniones presentes en los materiales con alta porosidad. (Tabla extraída de [18])

2.1.3 Impacto de las sales solubles en construcciones situadas cerca de la costa

Los edificios construidos cerca de la costa siempre van a tender a estar más afectados por la distancia que presentan del mar, que es el principal foco de origen de las sales solubles. En concreto, nos centraremos en los edificios de la Armada Española, entre otros, como los más adecuados a este estudio debido a las alteraciones que éstos sufren como consecuencia de la cantidad de sales solubles proporcionadas por el mar.

De acuerdo con varios estudios [2,7,23], existen diferentes horizontes en los que las sales son capaces de penetrar en los materiales de construcción de diferentes maneras (Figura 2-7):

- Horizonte A: las sales se encuentran disueltas por una contribución continua de humedad mediante el proceso de capilaridad. Es por ello que no somos capaces de apreciar el deterioro que se está produciendo.
- Horizonte B: es donde existe una mayor concentración de sales, así como, de alteración. Es donde se encuentran los sulfatos, sales con menor proporción de solubilidad.
- Horizonte C: esta zona es la menos dañada y en donde suelen haber apariciones formadas por sales con mayor movilidad y solubles.

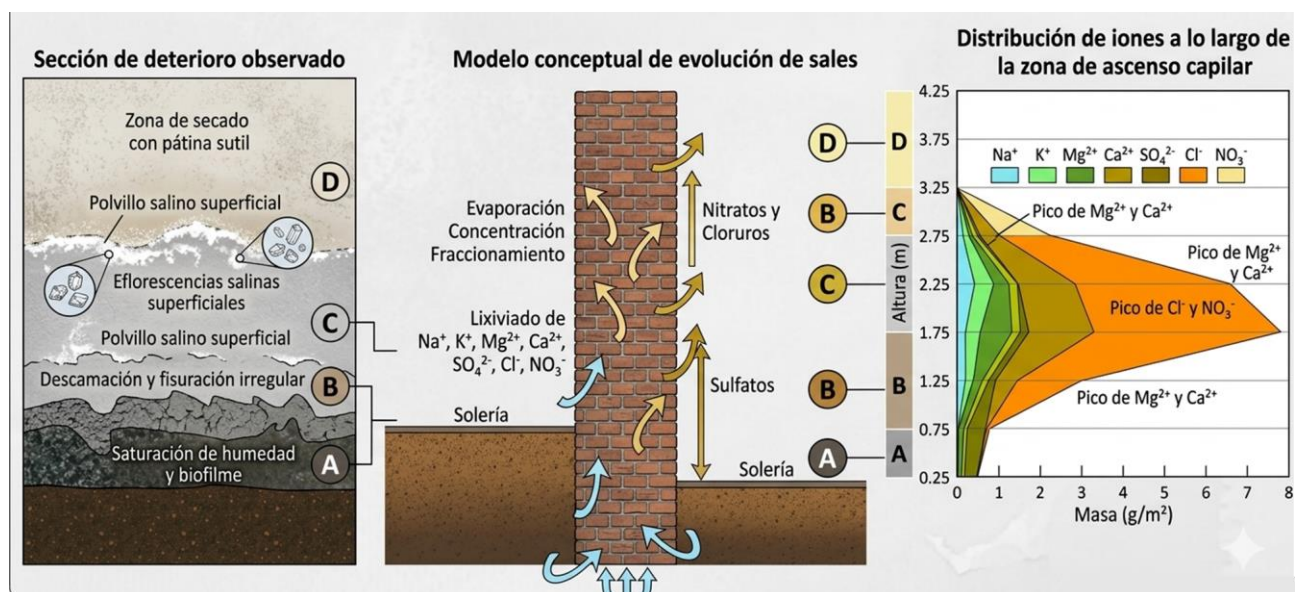


Figura 2-7 Distribución en zonas del deterioro ocasionado por sales debido al ascenso capilar del agua en muros. En el gráfico de la izquierda se muestra la concentración de los principales iones en altura. (Imagen generada con Gemini a partir de la información extraída de [7])

Cabe destacar que, cuanto mayor sea la velocidad de aporte del agua con respecto a la velocidad de secado de los materiales de construcción, no se producirá la cristalización de las sales y por ello, seguirá produciéndose el ascenso de éstas hasta llegar a una zona en la que ocurra lo contrario, que la velocidad de secado sea mayor que la de aporte de agua, y que precipiten. El proceso de cristalización comienza por las sales menos solubles, como por ejemplos los sulfatos, hasta llegar a las que más lo son, como los nitratos.

2.1.4 Problemática de edificaciones próximas a la costa. Caso Armada Española

Las edificaciones situadas en entornos costeros presentan una especial susceptibilidad frente a los procesos de deterioro asociados a la presencia de sales solubles y fenómenos de humedad ascendente. Esta vulnerabilidad se acentúa de forma significativa en aquellas construcciones levantadas sobre terrenos ganados al mar o sobre rellenos artificiales, habituales en zonas portuarias y bases navales. En este tipo de emplazamientos, el elevado nivel freático, la proximidad de las aguas subterráneas a las cimentaciones y la naturaleza heterogénea de los suelos de relleno favorecen la absorción de agua cargada de sales a través de los materiales constructivos por mecanismos de capilaridad.

Una vez en el interior de los muros, las sales disueltas pueden cristalizar como consecuencia de los ciclos de evaporación del agua. Cuando este proceso tiene lugar en la superficie, se manifiesta en forma de eflorescencias que, aunque suelen considerarse un daño de carácter estético, constituyen un indicador claro de un problema interno más profundo. Sin embargo, cuando la cristalización se produce en el interior de los poros del material, sub-eflorescencias, las presiones generadas pueden dar lugar a una degradación progresiva de los elementos constructivos, provocando la disgregación de fábricas y morteros, la pérdida de cohesión de los recubrimientos, la aparición de fisuras y, en el caso del hormigón armado, la corrosión de las armaduras metálicas, con la consiguiente reducción de la capacidad resistente del elemento estructural (Figura 2-8)

Este conjunto de patologías resulta especialmente relevante en el caso de las instalaciones de la Armada Española, ya que muchas de ellas se localizan en zonas costeras y portuarias con una exposición permanente al ambiente marino. La acción combinada de aerosoles salinos, elevada humedad ambiental y la presencia de sales en el subsuelo convierte a estas edificaciones en sistemas altamente vulnerables frente a los procesos de deterioro físico-químico. Si dichas patologías no se identifican y tratan de manera adecuada en fases tempranas, pueden evolucionar hasta comprometer, a largo plazo, no solo la durabilidad de los materiales, sino también la integridad estructural y la operatividad de infraestructuras estratégicas para la Defensa.

A este escenario se suma el impacto del cambio climático, que prevé la intensificación de los mecanismos de degradación existentes. El aumento del nivel del mar, la mayor frecuencia de episodios de inundación costera, la intensificación de temporales marítimos y las variaciones en los ciclos de humedad-sequedad contribuirán previsiblemente a incrementar la concentración y movilidad de sales solubles en el subsuelo y en los materiales constructivos. Como consecuencia, las edificaciones costeras de la Armada podrían experimentar una aceleración de los procesos de deterioro, lo que hace aún más urgente la adopción de estrategias de conservación adaptadas a este nuevo contexto ambiental.

En este marco, resulta fundamental que el Ministerio de Defensa, y en particular la Armada Española, considere de manera prioritaria el estado de conservación de sus instalaciones, con el fin de abordar estas problemáticas de forma preventiva a fin de prolongar la vida útil de las edificaciones y garantizar su funcionalidad y operatividad en condiciones ambientales cada vez más exigentes

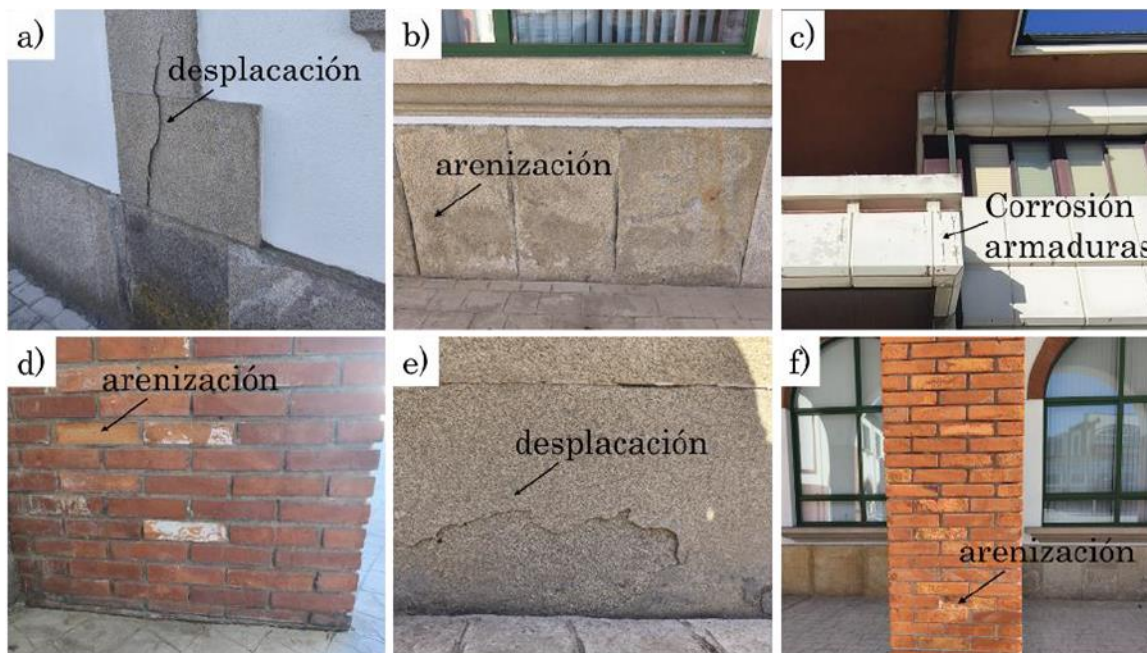


Figura 2-8 Ejemplos de patologías detectadas en edificios de la Escuela Naval Militar. (Imagen extraída de [2])

2.2 Estrategia de intervención frente a la problemática planteada

La estrategia de intervención frente a patologías derivadas de la presencia de sales solubles se estructura en dos fases principales claramente diferenciadas (Figura 2-9). En una primera fase resulta imprescindible reducir el contenido de sales acumuladas en los materiales constructivos mediante la aplicación de técnicas desalinizadoras específicas, orientadas a la extracción de las sales solubles presentes en la matriz del material. Esta etapa es fundamental, ya que cualquier intervención posterior carecería de eficacia si las sales permanecen activas en el interior de los elementos afectados.

Una vez completada la fase de desalinización, se procede a una segunda fase de tratamiento superficial y estructural, que puede incluir procesos de consolidación y/o hidrofugación.



Figura 2-9 Estrategia seguida para combatir el problema asociado a la presencia de sales solubles. (Imagen generada con Gemini a partir de la estrategia de intervención recogida en [2])

El objetivo de esta fase es doble: por un lado, disminuir la porosidad accesible del material con el fin de limitar la absorción de agua y, en consecuencia, reducir la posibilidad de nuevos aportes de sales; y por otro, rellenar fisuras, microfracturas y zonas degradadas, devolviendo al material parte de su integridad mecánica y mejorando su comportamiento frente a agentes ambientales agresivos.

2.2.1 Técnicas de extracción de las sales solubles

Estos métodos de extracción de sales solubles tienen como objetivo retirar las sales contenidas en el material de manera que se eliminen o se reduzca su contenido de manera destacable en sus poros. El empleo de métodos de extracción puede variar según [24]:

- Las propiedades de la sal que se desee extraer.
- Las propiedades del material.
- Estado en el que se encuentre el material y sus componentes.
- Ambiente en el que se vaya a realizar el proceso de extracción de sales.
- Ventajas y desventajas que vaya a tener el método elegido.
- Fases del proceso de extracción.

Algunas de las técnicas más usadas son las siguientes:

- Baños de Inmersión

El tratamiento mediante baños de inmersión (Figura 2-10) consiste en la introducción del material afectado por sales solubles en recipientes que contienen agua o disoluciones específicamente preparadas a este fin, como pueden ser aquellas que están hechas a base de inhibidores de la cristalización, tales como el ferrocianato sódico o potásico que inhiben la acción del ion cloruro [25]. Durante el tratamiento, el material permanece sumergido durante un periodo de tiempo prolongado, con el objetivo de favorecer la extracción de las sales acumuladas en su interior.

Una vez iniciado el proceso de inmersión (Figura 2-10), se establece un gradiente de concentración iónica entre el material contaminado y el medio líquido circundante. Como consecuencia, las sales disueltas tienden a movilizarse desde el interior del material hacia la disolución externa mediante procesos de difusión iónica, buscando el equilibrio entre ambos medios. Para garantizar la eficacia del tratamiento, resulta imprescindible la renovación periódica del agua o disolución libre de sales, de modo que se mantenga el gradiente de concentración necesario para que continúe la migración de los iones y se logre una desalinización progresiva del material.

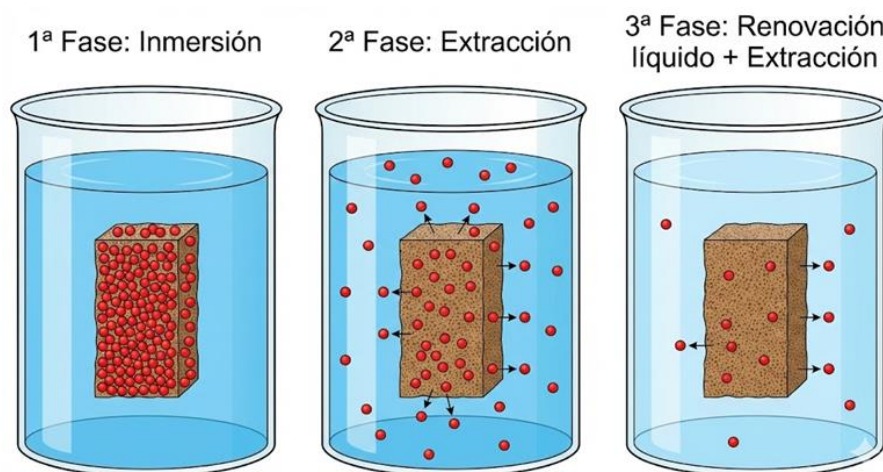


Figura 2-10 Esquema del proceso de desalación mediante el uso de baños estáticos. Los puntos rojos representan la sal presente en el interior del material poroso. (Esquema elaborado con Gemini a partir de la información recogida de [2])

Los baños de inmersión pueden llevarse a cabo bajo distintas condiciones operativas, pudiendo incluir o no sistemas de agitación, incrementos controlados de temperatura o variaciones de presión, factores que influyen directamente en la velocidad y eficacia del proceso de difusión iónica. En función de estas condiciones, es posible diferenciar dos tipologías principales de baños de inmersión [18,24]:

- **Baños estáticos:** son aquellos en los que el material permanece sumergido en una disolución libre de sales sin circulación continua del fluido, limitándose el proceso a la renovación periódica del agua utilizada durante el tratamiento.
- **Baños dinámicos:** en este caso, el material es sometido a un flujo continuo de una disolución libre de sales, lo que permite mantener de forma constante el gradiente iónico y, por tanto, mejorar la eficiencia del proceso de extracción de sales.

- Aplicación de papetas

La desalinización mediante papetas, constituye una técnica ampliamente utilizada en la conservación de materiales constructivos afectados por sales solubles, especialmente cuando no es viable la aplicación de métodos por inmersión, como ocurre en elementos constructivos in situ. No obstante, esta técnica presenta una serie de limitaciones que deben ser consideradas previamente a su aplicación.

Entre sus principales inconvenientes destaca su acción predominantemente superficial, lo que restringe su eficacia a las capas más externas del material afectado. Así mismo, para garantizar el éxito del tratamiento, resulta imprescindible conocer en detalle la naturaleza del material, incluyendo el tipo de porosidad, el tamaño y la forma de los poros, así como sus propiedades físico-químicas [25,26]. En ausencia de este conocimiento previo, los mecanismos de transporte implicados, principalmente difusión y advección, pueden no desarrollarse de forma adecuada, comprometiendo la eficacia del proceso de desalinización [26].

Las papetas utilizadas en este tipo de tratamientos se elaboran a partir de materiales con elevada capacidad de retención y transporte de humedad, tales como celulosa, compuestos de arcilla o combinaciones de distintos productos, seleccionados en función del material a tratar y del tipo de sales presentes. Estas mezclas se aplican directamente sobre la superficie del elemento afectado, asegurando un contacto íntimo que permita el intercambio hídrico y iónico entre la papeta y el soporte.

El proceso de desalinización mediante papetas se desarrolla, según diferentes estudios [2,26,27], en dos fases principales (Figura 2-11)

- **Fase de humectación:** el agua contenida en la papeta penetra en el interior del material por capilaridad, provocando la disolución progresiva de las sales solubles presentes en los poros y microfisuras.
- **Fase de extracción de sales:** durante la cual las sales disueltas migran desde el interior del material hacia la papeta, impulsadas por los gradientes de concentración (proceso de difusión) y por el movimiento del frente de humedad (proceso de advección), quedando finalmente retenidas en la propia papeta, que actúa como medio extractor.

Dependiendo de las características del material y de la papeta, el proceso advectivo será más fuerte hacia la papeta, cuando ésta tiene una mayor capacidad de succión capilar, o hacia la roca cuando ocurre lo contrario [26].

Una vez completado el ciclo, la papeta se retira y se sustituye, si es necesario, por nuevas aplicaciones sucesivas hasta alcanzar una reducción significativa del contenido salino.

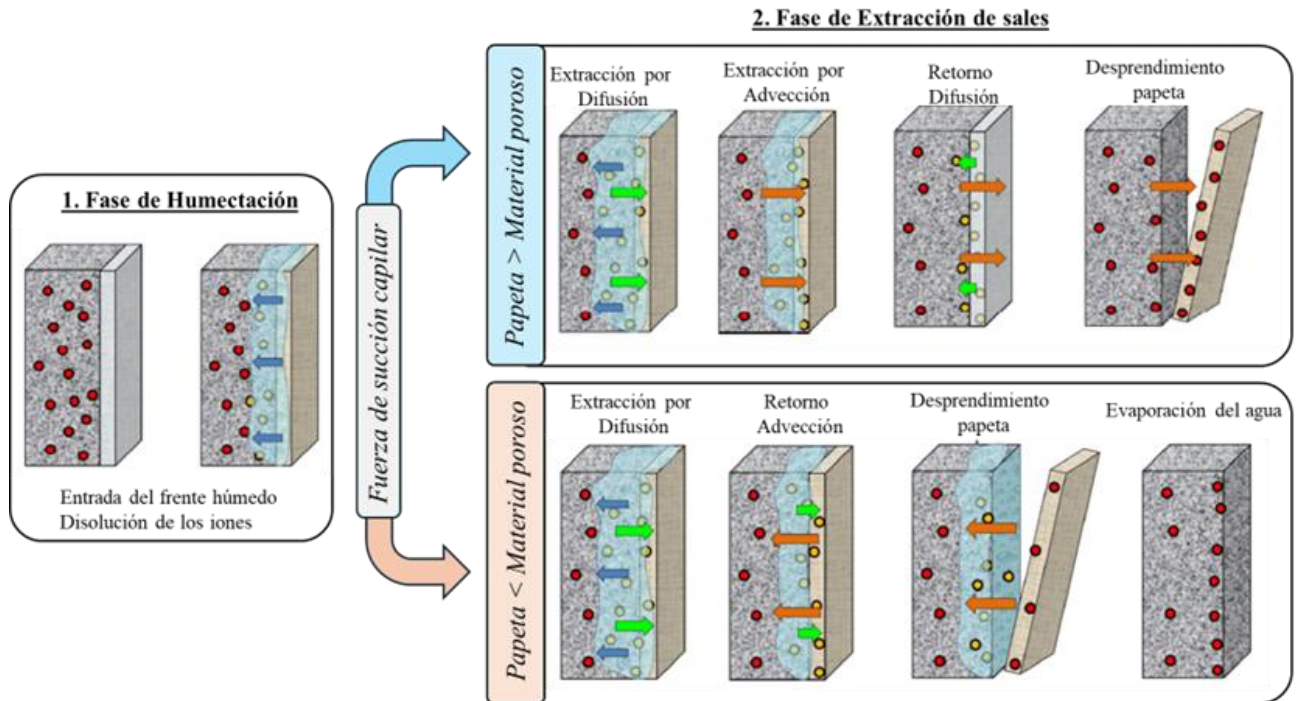


Figura 2-11 Proceso de extracción de sales mediante el uso de papetas. (Imagen generada con Gemini a partir de la información recogida de [18])

- Electromigración

Una de las técnicas destacables en el método de extracción de sales es la electromigración. Este método desalinizador electroquímico consiste en la separación y movimiento de las sales a través de la interacción de un campo eléctrico atrayendo de esta manera dichas sales hacia los electrodos (Figura 2-12)[23,28,29]. En el proceso de la electromigración es necesario un suministro de humedad para que de este modo permita la disolución de las sales permitiendo que los iones que las conforman fluyan y la lleven hacia el electrodo correspondiente. Es imprescindible poner un material como la papeta, para que de este modo los iones salinos que se vayan a depositar en la superficie de los electrodos tengan un lugar de deposición, así como la retención de los iones ya retirados.

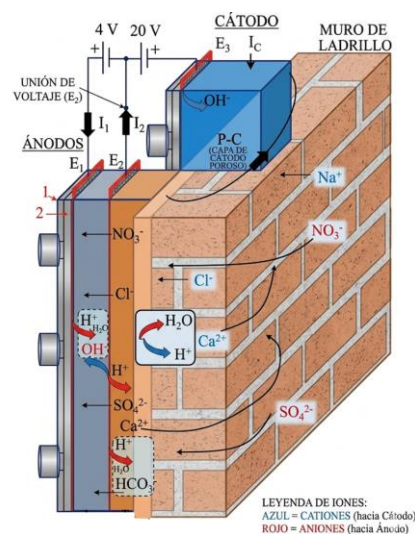


Figura 2-12 Esquema de extracción de sales solubles presentes en un muro mediante electrocinética. (Imagen generada por Gemini a partir de la información recogida de [30])

2.2.2 Tratamiento de Consolidación e Hidrofugación

2.2.2.1 Consolidantes

Los consolidantes son productos que producen un relleno parcial o un recubrimiento en los poros de los materiales. Se aplican con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, favorecer la unión entre las capas originales que han sufrido alteraciones y reforzar la integridad del material [31,32].

Para que se produzca una consolidación adecuada y el producto consolidante resulte eficaz, deben cumplirse una serie de condiciones:

1. Debe observarse una mejora en las propiedades mecánicas respecto al material deteriorado no tratado, ya que el consolidante aplicado ha de contribuir a la reducción de la porosidad y de las fisuras presentes.
2. El producto debe ser capaz de penetrar de forma profunda y suficiente en el material para favorecer la unión entre la capa alterada y la capa sana, aunque dicha penetración pueda variar desde micras hasta milímetros.
3. Debe producirse una modificación en la porosidad y en la distribución del tamaño de los poros. Esto permite que el material pueda responder mejor frente a agentes externos, como el agua, lo que puede incrementar o regular su resistencia.
4. Los consolidantes deben facilitar el paso del vapor de agua a través del material. De este modo se evita que las sales que penetran en el interior queden retenidas y cristalicen, generando presiones sobre las paredes de los poros.
5. Deben ser químicamente estables y no generar productos secundarios indeseados, como sales solubles.
6. No deben provocar alteraciones cromáticas ni modificar el aspecto original del material.

Los consolidantes se pueden clasificar según su naturaleza en [2]:

- **Consolidantes inorgánicos**

Son aquellos que, por sus propiedades similares con las piedras, son los más indicados para su consolidación. Actúan de manera como si fuesen cemento y promueven el aumento de la densidad y la mejora en la adhesión de los granos minerales además de ser muy resistentes a la radiación UV. Estos consolidantes tienen varios inconvenientes que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar el proceso de consolidación los cuales son: alta fragilidad, poca elasticidad y formación de capas en la superficie muy duras por su rápida deposición y baja penetración debido a su gran viscosidad.

Algunos de los consolidantes inorgánicos más empleados son:

1. Hidróxido de calcio:

Este tipo de consolidante es muy efectivo ya que genera carbonato cálcico (CaCO_3) en el interior de los poros del material. Este compuesto se caracteriza por apenas ser soluble al agua y por poseer una sensibilidad parecida a la de las rocas calcáreas lo que hace que, aplicarlo en este tipo de materiales, lo convierta en el consolidante más indicado.

A pesar de sus ventajas como consolidante, este material presenta también diversos inconvenientes. Su baja solubilidad obliga, en muchos casos, a realizar varias aplicaciones sobre la superficie para lograr un efecto consolidante adecuado. Además, puede provocar cambios cromáticos, especialmente en superficies oscuras. Por otro lado, la profundidad de penetración del producto no es uniforme, ya que depende de distintos factores, como la naturaleza del disolvente empleado, la técnica de aplicación utilizada y el número de capas aplicadas [33].

2. Hidróxido de bario

Su origen inorgánico lo convierte en un mineral químicamente muy estable y en uno de los consolidantes más adecuados para los materiales pétreos. Se trata de un compuesto más resistente a las alteraciones que el carbonato de calcio; sin embargo, el carbonato de bario (BaCO_3) produce un menor efecto de endurecimiento, por lo que no llega a restaurar fracturas ni a rellenar cavidades porosas [34].

Entre sus principales inconvenientes destaca el posible emblanquecimiento de la superficie debido a la precipitación del compuesto sobre la roca. Además, su escasa capacidad de penetración puede generar problemas de exfoliación y desprendimiento en la superficie tratada.

3. Aluminato de potasio

Durante la fase de impregnación en la superficie del material, el aluminio se consolida mediante enlaces de tipo electrostático. Tras su proceso de hidrólisis, se generan dos compuestos: hidróxido de potasio (KOH) y alúmina (Al_2O_3).

Este proceso hace que el consolidante resulte poco reactivo y poco soluble. Sin embargo, también presenta ciertos riesgos, ya que la formación de hidróxido de potasio puede dar lugar posteriormente a sulfato de potasio o carbonatos de potasio. Estas sustancias se encuentran entre las sales solubles más perjudiciales y con mayor capacidad de absorción, lo que puede provocar procesos de deterioro en el material tratado [35].

4. Silicatos inorgánicos

Existe una gran variedad de compuestos inorgánicos en los que su base es el silicio (Si). Estos silicatos tienen gran facilidad para hidrolizar en presencia de agua produciendo hidróxido de silicio (Si(OH)_4). Este precipita por el material pétreo ligándose con enlaces electrostáticos donde posteriormente experimenta una deshidratación y se polimeriza dando lugar a sílice (SiO_2).

Aunque la hidrólisis sea un proceso lento y haga que el consolidante tarde un tiempo en ejercer de manera correcta su función, permite la eliminación de productos superficiales no deseados antes de que el hidróxido de Si consiga precipitar en el material. Los compuestos más comunes a base de Si son el silicato de Na, que puede formar sales solubles indeseadas y, el silicato de etilo, que, al tener alcohol etílico como subproducto, es más volátil y no daña el material. Teniendo en cuenta estos inconvenientes de los tipos de silicatos inorgánicos, hay que destacar su baja capacidad de penetración [35].

5. Fluorsilicatos

Estos compuestos tienden a utilizar magnesio, aluminio y cinc como consolidantes puesto que también proporcionan sílice. Reaccionan formando fluoruro de calcio que es un compuesto que mejora la función del consolidante debido a su baja solubilidad con respecto al agua. Esta reacción puede reducir la penetración del consolidante en el material provocando la formación de una capa dura en la superficie del material. Alguno de los inconvenientes de este consolidante son su poca efectividad y su posible efecto de cambios de color.

- Consolidantes organosilíceos

Los consolidantes organosilíceos son productos de naturaleza orgánica basados en el silicio (Si). Su proceso de consolidación es similar al de los consolidantes inorgánicos, ya que se produce mediante reacciones de hidrólisis y posterior polimerización. A diferencia de los inorgánicos, los compuestos organosilíceos no suelen generar sales perjudiciales, ya que las moléculas de silicio polimerizan en las cavidades y poros del material tras reaccionar con el agua, formando una red sólida en su interior.

Entre los distintos tipos de consolidantes organosilíceos, clasificados según el tipo de enlace que presentan con el silicio, se encuentran: silanos, alquilsilanos, alcoxisilanos, alquilalcoxisilanos, alquilaril-polisiloxanos y siliconatos.

- Consolidantes orgánicos

Los consolidantes orgánicos son, en su mayoría, polímeros sintéticos obtenidos a partir de la unión de moléculas más pequeñas denominadas monómeros. Su función principal en la restauración consiste en cementar los granos de la piedra que se han desprendido debido a la alteración, envolviéndolos en una red polimérica que restablece la cohesión y mejora las propiedades mecánicas del material. Gracias a su composición orgánica, presentan además carácter hidrófugo.

Entre sus principales inconvenientes se encuentran: su escasa capacidad de penetración, derivada del tamaño de sus moléculas; la baja resistencia a la radiación solar, especialmente a los rayos UV, responsables de cambios de color y, en ocasiones, de la pérdida de propiedades como la impermeabilidad de la superficie tratada.

Los tipos de consolidantes orgánicos utilizados en materiales pétreos incluyen: ceras, polímeros acrílicos, resinas epoxi, resinas de estireno-poliéster y polímeros vinílicos

Podemos encontrar algunos de los consolidantes de origen orgánico en la siguiente tabla (Tabla 2-2):

Denominación	Fabricante	Composición
Acrílicos		
Paraloid B72	Röhm & Haas	Metilacrilato + etil-metacrilato
Paraloid B44	Röhm & Haas	Metilmetacrilato + etilacrilato
Motema Finish	MOTEMA	Polimetilmetacrilato
Bedacril 122 X	ICI	Poli-n-butilmetacrilato
Acrilsilicónicos		
E 0057	ARD Raccanello	
Producto 640	Mased	
Epoxis		
Araldit PZ820	Ciba Geigy	Derivado de Bisfenol A
Araldit DY 022	Ciba Geigy	Butanodioldiglicidiléter
Araldit XB2962	Ciba Geigy	Polifuncional alifática
Epoxisilicónico		
Rhodorsil 1330C	Rhône-Poulenc	Metilfenilpolisiloxano y epoxi
Otros		
Isostar C	M.P.M.	Poliuretano
Oxanpierre P/529 PIE	Metalfix	Poliuretano
Stratyl A 228	Rhône-Progil	Estireno-Poliéster
Mowilith 35/73	Hoechst	Acetato de vinilo

Tabla 2-2 Polímeros orgánicos usados como consolidantes. (Tabla extraída de [36])

- Nanoconsolidantes

Los nanoconsolidantes son materiales diseñados a escala nanométrica (partículas con dimensiones típicamente entre 1 y 100 nanómetros) que se emplean para restaurar y reforzar la cohesión de materiales pétreos degradados, especialmente cuando la pérdida de integridad afecta capas profundas del sustrato. Su principal ventaja sobre los tratamientos tradicionales radica en su alta compatibilidad físico-química con los componentes originales de la piedra, lo que permite consolidaciones más homogéneas y duraderas sin alterar significativamente la apariencia o porosidad del material.

El reducido tamaño de sus partículas les permite penetrar en los poros más finos del material y alcanzar zonas inaccesibles para consolidantes convencionales. Además, su elevada área superficial específica aumenta la reactividad química, favoreciendo la formación de enlaces sólidos entre las partículas del sustrato y el consolidante, lo que refuerza la cohesión interna del material dañado (Figura 2-13)

En cuanto a su síntesis, existen varias rutas para obtener nanoconsolidantes, entre las que destacan:

1. Síntesis sol-gel: permite la formación de nanopartículas a partir de precursores líquidos, que se hidrolizan y polimerizan para formar un gel coloidal de óxidos, generalmente de sílice o titanio, adaptable al sustrato.
2. Métodos hidrotermales: se utilizan condiciones de alta temperatura y presión en soluciones acuosas para generar nanomateriales con alta cristalinidad y control del tamaño de partícula.
3. Precipitación controlada: consiste en la formación de nanopartículas por reacción química controlada en solución, donde se ajustan parámetros como pH, temperatura y concentración de reactivos para obtener partículas uniformes.
4. Rutas basadas en microemulsiones: permiten la síntesis de nanopartículas encapsuladas o dispersas de forma controlada, facilitando su penetración en poros extremadamente finos.

Gracias a estas rutas de síntesis, los nanoconsolidantes pueden diseñarse para optimizar su tamaño, forma, porosidad y afinidad química con el material original, logrando una consolidación más eficiente y duradera que los tratamientos tradicionales.

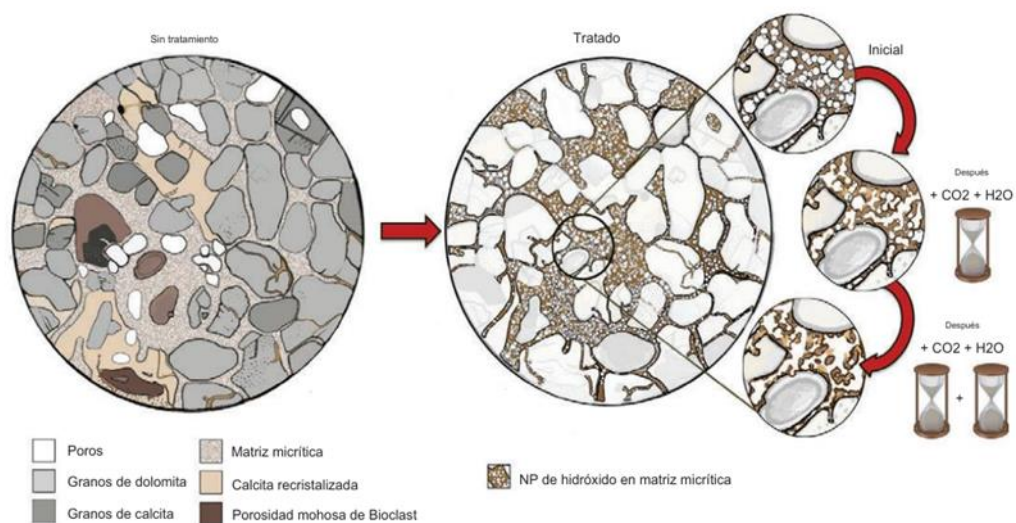


Figura 2-13 Tratamiento con nanopartículas. Ilustración antes y después del tratamiento. (Imagen extraída de [33])

El éxito en la obtención de estos materiales depende de variables experimentales como la concentración de la solución, el tipo de solvente (como el propanol o etanol), la temperatura, la humedad relativa y el uso de catalizadores o aditivos para controlar la precipitación [33].

2.2.2.2 Hidrofugantes

Un tratamiento hidrofugante trata de reducir o impedir la absorción de agua, protegiéndolo frente a la acción de la humedad, la lluvia y otros agentes ambientales. A diferencia de los consolidantes, que buscan reforzar la cohesión interna del material, los hidrofugantes actúan principalmente sobre la superficie, creando una barrera que evita que el agua penetre en los poros sin alterar la transpirabilidad del sustrato. Este tipo de tratamientos es especialmente útil en materiales que presentan alta porosidad o que están expuestos a climas húmedos, ya que la presencia de agua puede favorecer procesos de meteorización, crecimiento biológico o disolución de componentes solubles.

Para ser eficaces, los hidrofugantes deben cumplir varias propiedades fundamentales: deben penetrar adecuadamente en la superficie porosa del material para formar una capa continua y uniforme; ser químicamente estables, de modo que no se degraden con el tiempo ni reaccionen con el sustrato generando sales dañinas; mantener la transpirabilidad de la roca, permitiendo el paso del vapor de agua para evitar acumulación de humedad interna; y, finalmente, ser incoloros e inodoros, de manera que no alteren el aspecto ni las propiedades estéticas del material tratado. Además, es deseable que presenten resistencia a los rayos UV y a las variaciones climáticas, asegurando una protección duradera frente a la intemperie.

2.3 Existencia de nuevo recubrimiento en proceso de ensayo

El desarrollo del TFG se encuadra en un proyecto nacional denominado “Revestimientos de superficie adaptativos para la auto-reparación integrada y la mejora de la resistencia térmica en materiales de construcción (ASSIST)” cuyo objetivo principal es desarrollar recubrimientos para materiales de construcción que tengan la capacidad de auto-repararse y ofrecer resistencia térmica y mecánica [3].

El proyecto se inspira en la durabilidad de los morteros romanos antiguos, los cuales contenían fragmentos de cal que permitían el cierre de grietas mediante procesos químicos. Con ese objetivo se pretende sintetizar un recubrimiento multicapa a escala nanométrica con la siguiente estructura (Figura 2-14)

- **Núcleo central:** Óxido de calcio (CaO).
- **Capas protectoras:** Dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3), que regulan la entrada de agua para evitar una reacción prematura.

Cuando el material se agrieta, el vapor de agua penetra y activa una reacción de hidratación y carbonatación controlada que sella la microfisura y restaura la integridad estructural de dicho material.

Este mecanismo sigue una secuencia química específica para sellar los daños:

- 1) **Activación por fractura:** En condiciones normales, una capa central de óxido de calcio (CaO) permanece aislada y protegida del ambiente por capas externas de dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3). Cuando el material se agrieta, estas capas protectoras se rompen, permitiendo que el vapor de agua penetre hasta el núcleo reactivo.
- 2) **Reacción de hidratación:** El agua en contacto con el CaO desencadena una reacción de hidratación controlada que da lugar a la formación de un "anillo de hidratación" alrededor del núcleo de cal.
- 3) **Reacciones puzolánicas y carbonatación:** Se producen reacciones puzolánicas, donde los materiales silíceos y la cal hidratada forman compuestos similares al cemento. Simultáneamente, ocurre un proceso de carbonatación al reaccionar la cal con el CO_2 .

- 4) **Precipitación y sellado:** Estas reacciones químicas provocan la precipitación de nuevas fases sólidas, principalmente silicato de calcio hidratado (C-S-H), aluminosilicato de calcio hidratado (C-A-S-H) y carbonato de calcio (CaCO_3). Estos nuevos cristales rellenan la grieta, restaurando la integridad estructural y la resistencia mecánica del material.

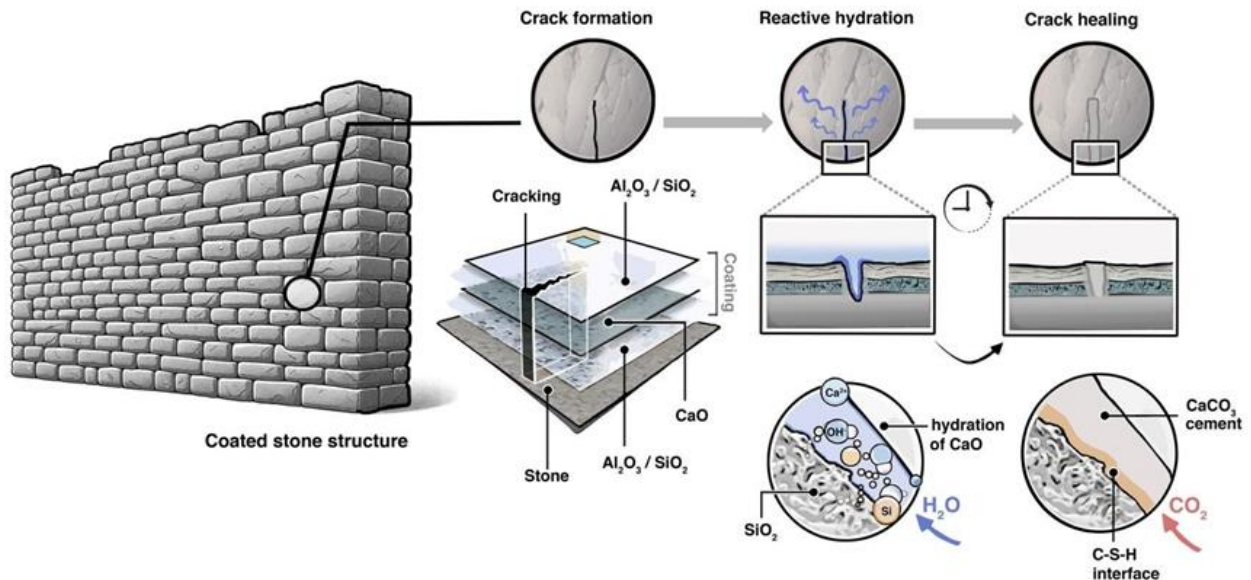


Figura 2-14 Esquema de proceso de auto-reparación del consolidante ASSIST. (Imagen extraída de [3])

2.4 Métodos de aplicación

Según el método de aplicación se determinará el grado de penetración del consolidante y, por tanto, la eficacia, la uniformidad y la compatibilidad del tratamiento con el material. Entre las técnicas de aplicación del consolidante podemos encontrar:

- **Aplicación por pincel o brocha**

El método de aplicación por pincel o brocha es uno de los métodos más utilizados en restauración debido a la sencillez con la que se realiza. Consiste en aplicar el producto consolidante sobre la superficie del material mediante el uso de brocha o rodillo permitiendo su penetración de progresiva en los poros a través del proceso de capilaridad [37].

Este método se emplea sobretodo en superficies a las que se puede acceder o en elementos con relieve donde es necesario controlar la cantidad de producto aplicado además de la dificultad de alcance en algunas partes de los elementos. No obstante, este método hace que la penetración sea limitada en comparación a otros métodos que son más profundos en impregnación [35].

- **Aplicación por pulverización**

La pulverización consiste en la aplicación del producto consolidante mediante un sistema de atomización o spray, lo que genera una capa fina y homogénea en la superficie del material. Este método suele ser el adecuado para tratar grandes superficies o áreas de difícil acceso, permitiendo una distribución uniforme del producto por toda la zona [37].

En algunos casos se emplean soluciones muy diluidas para favorecer la difusión del consolidante en el interior del material lo que mejora su penetración [35].

- **Inmersión al vacío**

La técnica de inmersión al vacío es un método de aplicación de productos consolidantes que consiste en introducir el material o los fragmentos en un recipiente hermético que contiene el consolidante y que se conecta a una bomba de vacío. Al reducir la presión en el interior del recipiente se produce la saturación, es decir, se extrae el aire presente en los poros del material, lo que facilita posteriormente la entrada del consolidante en la estructura interna del material. Una vez restablecida la presión, el consolidante habrá penetrado en los respectivos poros del material, favoreciendo su cohesión interna y aumentando su resistencia mecánica. Este método de aplicación debe realizarse con un control adecuado de la presión para evitar daños en el material [38].

- **Electropenetración**

La electroprecipitación es un método de aplicación del producto consolidante que hace uso de la corriente eléctrica para provocar la formación y precipitación de compuestos minerales dentro de los poros del material pétreo. Esta técnica consiste en colocar una serie de electrodos que estén en contacto con el material. Al aplicar corriente eléctrica, los iones presentes en la solución migran hacia los electrodos lo que genera una reacción química que produce minerales insolubles que se depositan en los poros internos del material [39].

Estos precipitados pueden ser, entre otros, carbonatos de calcio o magnesio, fosfatos u oxalatos, que son compuestos químicamente compatibles con muchos materiales pétreos utilizados en el patrimonio arquitectónico. El resultado es una reducción de la porosidad accesible y un aumento de las propiedades mecánicas del material, ya que los nuevos minerales actúan como un agente de unión entre los granos del material [39].

Además, la técnica permite que los compuestos consolidantes se formen tanto en la superficie como en el interior del material, lo que mejora la eficacia del tratamiento frente a otros métodos que sólo actúan de forma superficial.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Material empleado

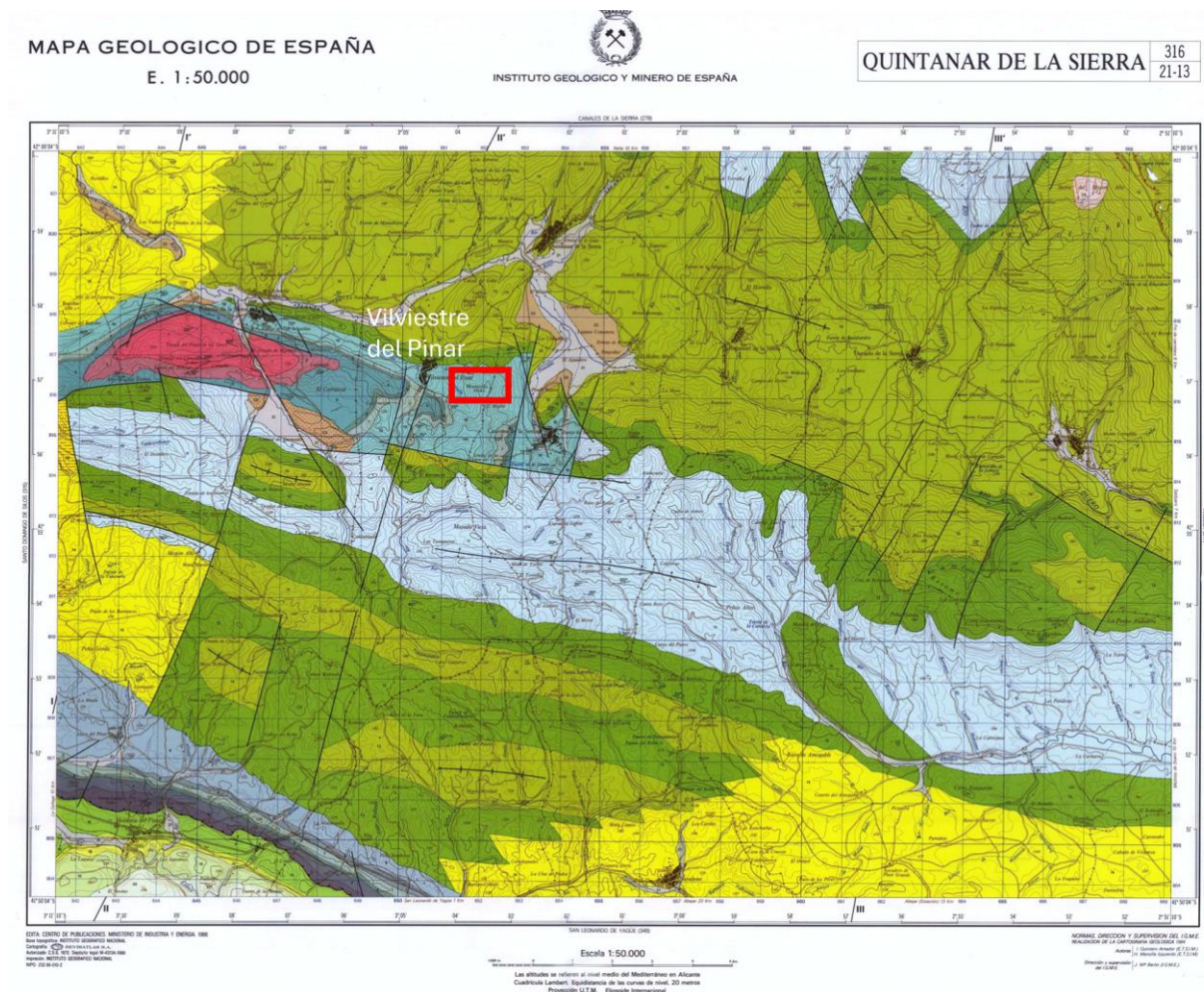
3.1.1 Roca Seleccionada. Dorada Urbión

El material empleado en los ensayos realizados en el desarrollo del TFG es la Dorada Urbión, una roca sedimentaria procedente de la familia de las areniscas procedente de la Sierra de Urbión, situada en la zona montañosa de Pinares entre las provincias de Soria y Burgos, concretamente en el municipio de Vilviestre del Pinar (Figura 3-1). Se trata de un material pétreo de uso tradicional en la arquitectura del norte de España, con interés tanto geológico como constructivo.

Desde el punto de vista geológico, la Dorada Urbión se clasifica como una arenisca silícea, compuesta mayoritariamente por granos de cuarzo cementados, con presencia de óxidos de hierro responsables de su característica tonalidad dorada (Figura 3-2).

Las propiedades físicas de esta roca, como su homogeneidad, porosidad media y adecuada resistencia mecánica, la hacen especialmente apta para la realización de ensayos experimentales tales como los que se están llevando a cabo en este proyecto. Por ello, su elección como material de estudio en este trabajo permite analizar su comportamiento físico-mecánico y contribuir al conocimiento de sus posibles aplicaciones en el ámbito de la construcción y la conservación del patrimonio construido ya que este material se emplea en edificaciones Madrid, Burgos, Soria, Salamanca, Cantabria y el País Vasco [40].

Se han utilizado 23 muestras de Dorada Urbión de dimensiones de 5x5x5 cm (Figura 3-2) para que sean sometidas a los ensayos de laboratorio que nos darán los resultados con los que podremos evaluar el resultado del proyecto.



3.1.2 Consolidante ASSIST

En este proyecto de investigación se empleó una disolución preparada a partir de 5 g de nanopartículas de CaO recubiertas con Al₂O₃, sintetizadas por investigadores del centro vasco de investigación cooperativa en nanociencia (NanoGune) empleando como medio solvente 1 L de etanol (Figura 3-3).

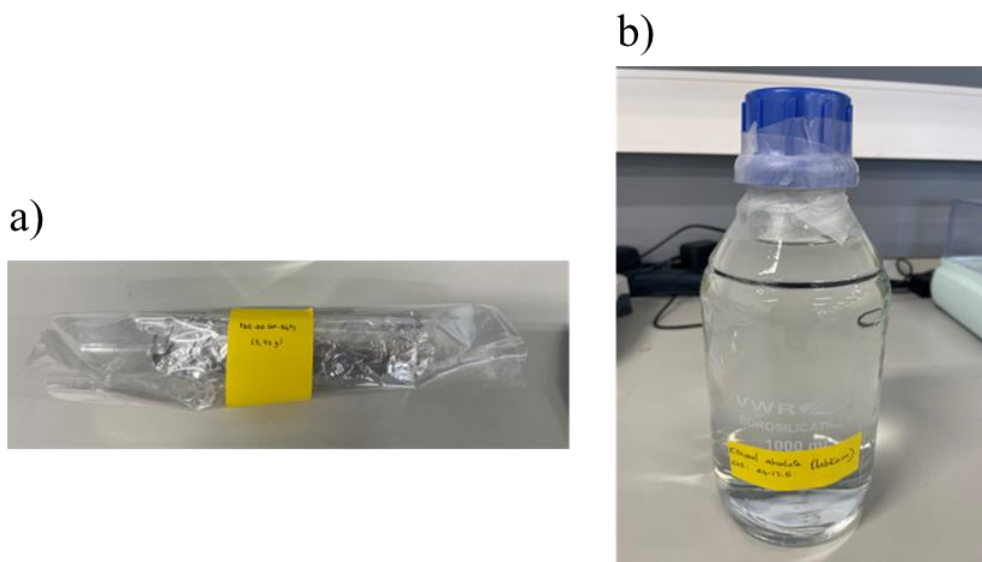


Figura 3-3 a) producto en polvo de CaO-Al₂O₃. b) Etanol empleado en la disolución

Tras haber realizado la disolución, se procedió a realizar un total de 3 aplicaciones del producto con ayuda de una brocha cubriendo todas las caras de las muestras con suficiente producto para asegurar su correcta penetración. Tras cada aplicación, se esperó un minuto para poder proceder a la siguiente.

Una vez finalizado las tres aplicaciones, se registró el peso de las muestras (C₁) y se procedió a registrarlo nuevamente transcurridas 24 h (C₂). A partir de estos pesos, y teniendo en cuenta el peso seco de las muestras (C₀) se midió el consumo (*Ecuación 1*) y la materia seca (*Ecuación 2*) empleando para ello las siguientes ecuaciones ya empleadas en estudios previos [42]:

$$\text{Consumo (\%)} = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\text{Materia Seca (\%)} = \frac{C_2 - C_0}{C_0} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

3.2 Caracterización del material

En este apartado se va a realizar un estudio de las características físico-mecánicas de las 21 muestras seleccionadas de Dorada Urbión con las que más adelante se analizarán los resultados obtenidos. Para ello, se llevó a cabo la caracterización de las siguientes propiedades:

3.2.1 Porosidad Accesible

De acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 1936:2007 [43] la porosidad accesible o abierta se refiere al volumen de poros con un diámetro superior a 0,1 µm que se encuentran unidos entre sí y

comunicados con el exterior. Este parámetro resulta fundamental, ya que un incremento en la porosidad accesible implica una mayor vulnerabilidad del material frente a la penetración de agentes externos, lo que puede favorecer la aparición de procesos de alteración y degradación del mismo. Para este ensayo, se utilizaron las 12 primeras muestras de Dorada Urbión, es decir, de la 1 a la 12.

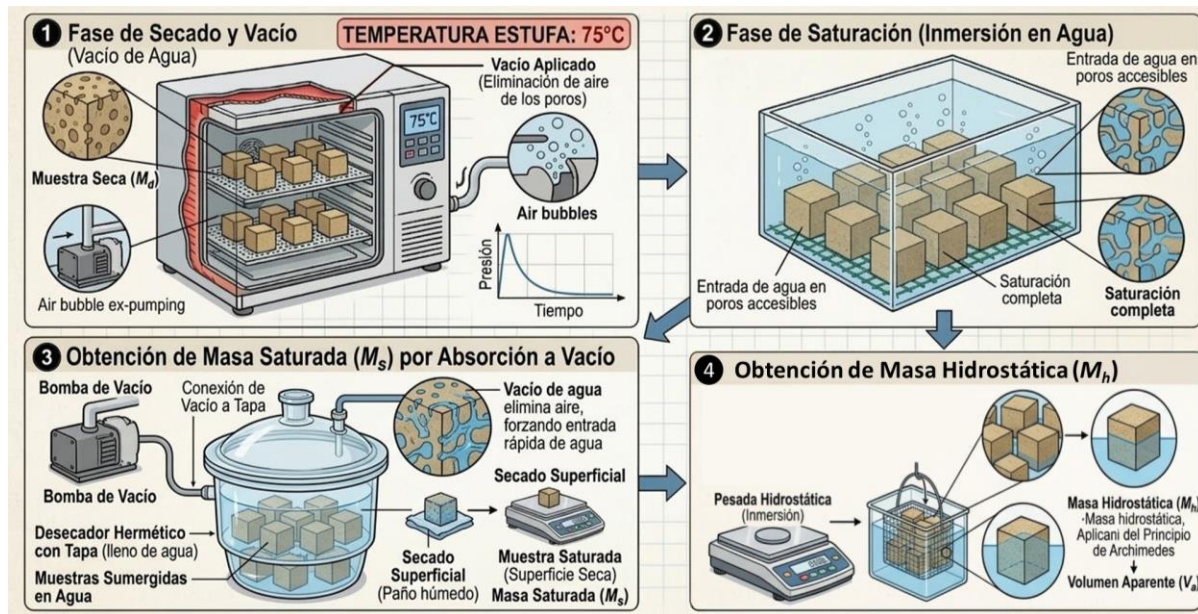


Figura 3-4 Fases del ensayo de porosidad accesible al agua (Imagen generada con Gemini)

Para la realización del ensayo (Figura 3-4), las muestras fueron sometidas previamente a un proceso de secado en estufa a una temperatura de 75°C hasta alcanzar una masa constante, obteniéndose así la masa seca (M_d). Posteriormente, se procedió a la realización del ensayo con las siguientes etapas:

1. Las muestras se introducen en un recipiente lleno de agua en inmersión completa, procediéndose al registro de los pesos en los instantes de tiempo indicados por la norma.
2. Una vez que las muestras alcanzaron masa constante (aproximadamente después de 5 días de inmersión en agua) se procedió a forzar la entrada completa de agua mediante vacío. Para ello se hizo uso de una bomba y se colocaron las muestras en el interior de un desecador lleno de agua. Transcurridas dos horas aplicando vacío se procedió a registrar el peso saturado (M_s).
3. Finalizado este proceso se llevó a cabo la toma del peso hidrostático (M_h).

Con el registro de estos tres pesos se determinó la porosidad accesible del material pétreo (Ecuación 3):

$$n (\%) = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

3.2.2 Capilaridad

El presente ensayo se ha llevado a cabo conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 1925:1999 [44]. Su finalidad es evaluar la influencia del volumen y la distribución de poros del material, dentro del rango de tamaño capilar que va desde $0,1$ a $100\ \mu\text{m}$ [45], en su capacidad de absorción ascendente de agua por este mecanismo. Esta vía de entrada es considerada la principal vía de entrada de agua y sales

solubles en materiales de construcción empleados en fachadas y cimentaciones, donde la exposición a la humedad está presente de manera habitual [46].

El método de absorción capilar se produce principalmente mediante el mecanismo de succión, donde el material absorbe no solo el agua, sino también los compuestos disueltos en ella. Entre estos pueden encontrarse agentes potencialmente perjudiciales, como las sales solubles, cuya cristalización puede ocasionar una disminución de las propiedades mecánicas y provocar el deterioro interno del material ya que el daño ocasionado por este agente es mayor en poros de menor tamaño [5,9]. Para este ensayo, se utilizaron las 12 muestras siguientes de Dorada Urbión, es decir, de la 13 a la 24.



Figura 3-5 Etapas del ensayo de absorción capilar. (Imagen generada con Gemini)

En el procedimiento experimental desarrollado en este proyecto de investigación, las muestras fueron previamente secadas en estufa a 75 °C para alcanzar una masa constante (M_0). Posteriormente, se colocaron las muestras sobre una rejilla metálica fina con el objetivo de garantizar un contacto en su totalidad con el agua. El nivel de agua empleado cubría aproximadamente 1 cm de la base de cada muestra (Figura 3-5) Para finalizar la técnica por capilaridad, se establecieron intervalos de tiempo específicos en los que se registró la variación de masa de las muestras (M_t).

A partir de los valores registrados se determinó el coeficiente de absorción capilar (en $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$) y la porosidad capilar (%) empleando para ello las ecuaciones (Ecuación 4) y (Ecuación 5):

$$C = \frac{M_t - M_0}{A\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde M_t es el peso final (kg), M_0 es el peso inicial (kg), A es el área de la muestra (m^2) y t es el tiempo (s).

$$P_{cap}(\%) = \frac{M_s}{V * \delta} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde M_s es el peso saturado en agua (kg), V es el volumen de la muestra (m^3) y δ es la densidad del agua (kg/m^3).

Después del tratamiento, tanto la porosidad accesible como la capilaridad, se volvieron a medir con objeto de ver la variación resultante.

3.2.3 Ultrasonidos

El ensayo de ultrasonidos es una técnica empleada para evaluar las características internas de un material a partir de la propagación de las ondas ultrasónicas que viajan a través del material desde un emisor hasta un receptor situado a una determinada distancia. El procedimiento se ha desarrollado conforme a la norma UNE-EN 14579:2005 [47] sobre velocidad de propagación del sonido en piedra natural. Este ensayo se llevó en todas y cada una de las muestras, es decir, de la 1 a la 24.

Para la ejecución del ensayo se utilizó un equipo de medida de ultrasonidos llamado 'Pundit Lab+' (Figura 3-6). Este equipo está compuesto de dos transductores con una frecuencia nominal de 54 kHz. El método consiste en determinar la velocidad de transmisión del ultrasonido (UPV) a partir del tiempo de tránsito de la onda ultrasónica desde el transductor emisor hasta el receptor, distanciado una distancia conocida, en tres dimensiones (x, y, z).

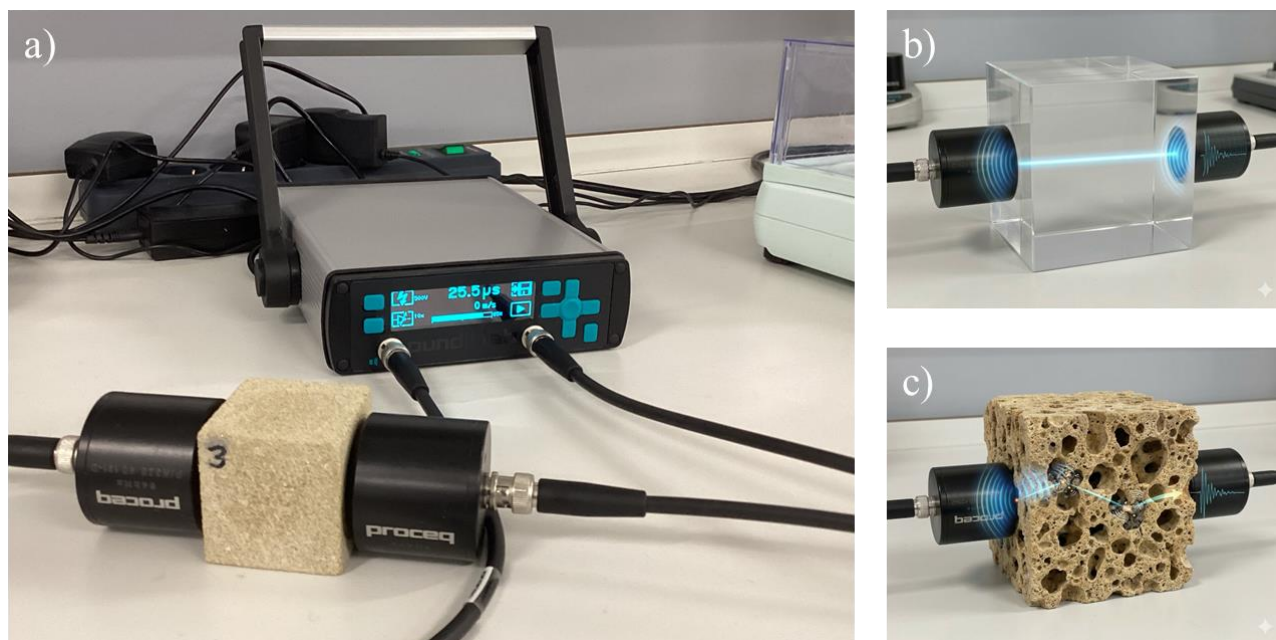


Figura 3-6 a) Equipo de medición Pundit Lab (a). Se aprecia como en materiales sin huecos la onda viaja de manera directa (b) (Imagen generada con Gemini), mientras que, en materiales con huecos o fisuras la velocidad disminuye y llega más atenuada (c). (Imagen generada con Gemini)

Para la realización de este ensayo se procedió de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se verificó la correcta calibración del equipo mediante el empleo de una varilla cilíndrica patrón. El tiempo de transmisión registrado debía coincidir con el valor de referencia propio del patrón siendo de 25,4 μ s por lo que, al coincidir, se pudo obtener una correcta calibración del equipo.
2. A continuación, los transductores, tanto emisor como receptor, se enfrentaron entre sí colocándolos en caras opuestas (modo de transmisión directa) (Figura 3-6).
3. Una vez colocados los transductores, se activó la medición procurando alcanzar un nivel de transmisión del 100 %. Para poder obtener una señal óptima, se aplicaba un gel para ultrasonidos con el fin de mejorar el contacto entre los transductores y la superficie de la muestra.

4. Este procedimiento se repitió en todas las direcciones del material (x, y, z) con el objetivo de determinar la anisotropía de las muestras, empleando para ello los coeficientes propuestos por [48] reflejados en la ((Ecuación 6) y ((Ecuación 7).

$$d_M(\%) = \left(1 - \frac{2 \cdot V_{P_{\min}}}{V_{P_{\max}} + V_{P_{\text{media}}}}\right) \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$d_m(\%) = \left(2 \times \frac{V_{P_{\max}} - V_{P_{\text{media}}}}{V_{P_{\max}} + V_{P_{\text{media}}}}\right) \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde $V_{P_{\max}}$ corresponde a la velocidad ultrasónica máxima obtenida (m/s), $V_{P_{\min}}$ es la velocidad mínima (m/s) y, $V_{P_{\text{media}}}$ corresponde al valor promedio de las velocidades medidas en las diferentes direcciones de cada una de las muestras (m/s).

Las mediciones de transmisión de ultrasonidos se realizaron tanto antes como después de la aplicación del consolidante, con la finalidad de observar, por un lado, la influencia de la aplicación del tratamiento consolidante sobre el comportamiento de la roca y por otro, el grado diferente de integridad interna del material después de los ensayos de durabilidad.

A partir de los valores de transmisión de ultrasonidos y dado que la velocidad de propagación de las ondas guarda relación con el esqueleto mecánicamente útil, es posible determinar de manera indirecta propiedades mecánicas tales como la resistencia a compresión (RCS) mediante el empleo de diferentes modelos matemáticos ya testados en estudios previos [49–51]. En este caso se ha propuesto determinar el valor de RCS empleando el modelo propuesto por Vasanelli [50] (Ecuación 8) desarrollado para areniscas.

$$RCS \text{ (MPa)} = 0.0159 \times UPV \text{ (m/s)} - 27,172 \quad (\text{Ecuación 8})$$

3.2.4 Dureza superficial

El ensayo de dureza superficial permite evaluar cómo influye la presencia del consolidante en la dureza de las rocas, especialmente en las primeras capas del material pétreo ya que los consolidantes aplicados con pincel no suele penetrar en toda la profundidad del material. Por tanto, se trata de una técnica que permite evaluar características relacionadas con la microestructura superficial del material [52], tal y como se explica en la (Figura 3-7).

Para cada muestra se realizaron cinco mediciones independientes, eliminando aquellos valores que presentaban desviaciones significativas respecto al promedio, tanto por exceso como por defecto, con el fin de garantizar la representatividad y fiabilidad de los resultados obtenidos. Al igual que con ultrasonidos, las medidas se realizaron, primeramente, antes y después de la aplicación del consolidante y luego, antes y después de cada ensayo de durabilidad. Los resultados obtenidos se obtienen en unidades de dureza Leeb (HLD). Para la realización de este ensayo, se emplearon todas las muestras al igual que para el ensayo de ultrasonidos, es decir, de la 1 a la 24.

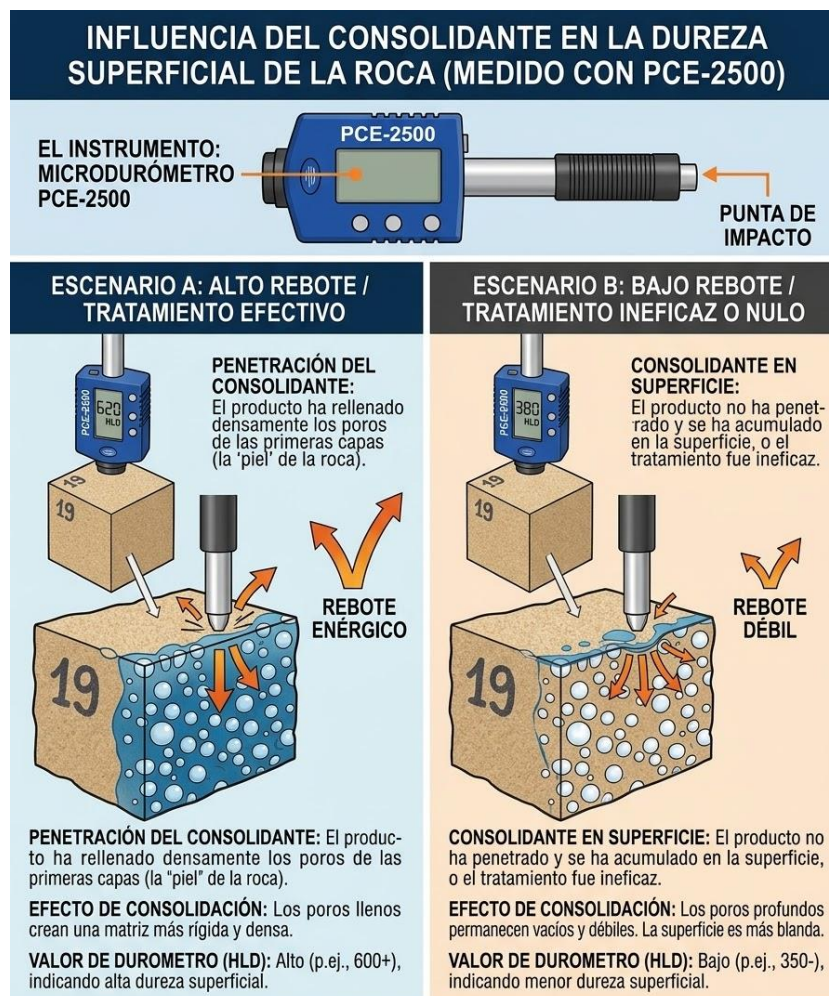


Figura 3-7 Esquema explicativo de cómo funciona este tipo de medición en un material duro (imagen de la izquierda) y en un material más blando (imagen de la derecha). (Imagen generada con Geimini de acuerdo con lo mencionado en diversos estudios [53,54])

3.2.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS)

Con el objetivo de evaluar la presencia del consolidante y su morfología se procedió a realizar un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) con el microscopio Jeol JSM-6700F (Figura 3-8) que se encuentra en las instalaciones del Centro de Apoyo Científico-Tecnológico de la Universidad de Vigo (CACTI).

El SEM es una técnica de análisis microscópico que permite observar la morfología y la microestructura de la superficie de un material con gran aumento y alta resolución mediante el uso de un haz de electrones que, al dirigirse hacia la superficie de la muestra, interactúan con el material generando diferentes señales que son detectadas y transformadas en imágenes detalladas.

Mediante el SEM se pudo obtener además un análisis composicional mediante la sonda de espectroscopía de dispersión de energía (EDS), con el objetivo de identificar la profundidad de penetración del producto consolidante, en cuya composición se encuentra el catión calcio del cual la roca Dorada Urbión carece.

Para el análisis se analizaron tres muestras tratadas, dos en sección transversal y otra en superficie. Una de las muestras de sección transversal y otra de superficie se embebieron en resina para tratar de fijar los compuestos minerales precipitados. Tras el proceso de endurecimiento de la resina se procedió al corte de la muestra y a su posterior pulido. La muestra restante con consolidante se analizó sin embeber en resina analizándola transversalmente, es decir, desde la superficie de aplicación hacia el núcleo de la

muestra. Los resultados obtenidos, se compararon con los realizados sobre una muestra sin consolidante tomada como referencia.



Figura 3-8 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo. Modelo JSM-6700F

3.3 Ensayos de durabilidad

3.3.1 Hielo-Deshielo

Para la ejecución del presente ensayo (Figura 3-9) se realizó una adaptación del procedimiento recogido en la norma UNE-EN 12371:2011 [55] puesto que no disponíamos del tiempo necesario para llevar a cabo los ciclos requeridos y por lo tanto se llevaron a cabo un número total de 20 ciclos. En total, se utilizaron 2 muestras de referencia y, dos muestras con el producto aplicado, en total 4 muestras.

La finalidad del procedimiento de este tipo de alteración es, de acuerdo con lo establecido por la norma, analizar las alteraciones que experimenta el material al ser sometido a varios ciclos de variaciones de temperatura siendo ciclos de congelación y descongelación. Se emplearon un total de 4 muestras de Dorada Urbión, dos como referencia sin producto aplicado y otras dos con el producto con el propósito de evaluar su comportamiento y ver las diferencias que se presentan entre las que llevan producto de las que no lo llevan. En este ensayo, se tomó las medidas de los pesos de las muestras cada vez que se realizaban dos ciclos completos dejando en la estufa durante un día las muestras para que pudiesen eliminar la humedad restante presente en ellas.

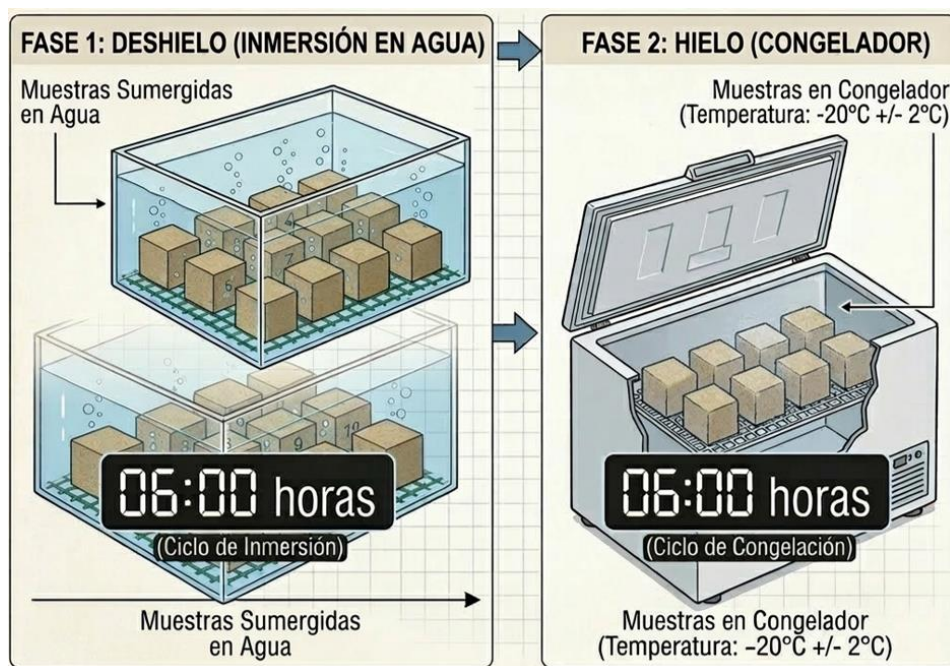


Figura 3-9 Imagen explicativa del proceso de Hielo-Deshielo. (Imagen generada con Gemini)

El período de los ciclos constataba de dos etapas (Figura 3-8), cada una de 6 horas, por lo que al día se realizaba solamente un ciclo de hielo-deshielo. La primera etapa consistía en sumergir en agua durante 6 horas las muestras escogidas para este ensayo y, una vez cumplido ese período de tiempo, se llevaban al congelador durante otras 6 horas para que experimentasen la fase de congelación. Una vez realizado un ciclo completo, se dejaban en temperatura ambiente para que al día siguiente se pudiera retomar el proceso de un ciclo de hielo-deshielo.

La eficacia evaluación de la durabilidad se determinó en función de la pérdida de peso que experimentaron las muestras con respecto a su peso original (*Ecuación 9*):

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \frac{M_o - M_t}{M_o} \times 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde M_0 es el peso seco inicial (g) y M_t el peso seco (g) después de dos ciclos de alteración.

3.3.2 Choque térmico

En este segundo ensayo, se llevó a cabo un análisis de las alteraciones presentes en el material al ser sometido a variaciones térmicas bruscas. Para la ejecución de los ciclos térmicos (Figura 3-10) se tomó como referencia la norma UNE-EN 16140:2019 [56]. No obstante, al igual que en el ensayo de hielo-deshielo, se introdujeron determinadas modificaciones en el procedimiento, concretamente en la duración de los ciclos debido a las limitaciones de tiempo. Por ello, cada ciclo se componía de dos fases, cada una de una duración de 6 horas y, por tanto, se realizó un total de 20 ciclos. En total, se utilizaron 2 muestras de referencia y, dos muestras con el producto aplicado, en total 4 muestras

En la primera fase, se metían las cuatro muestras en la estufa a una temperatura de 75 °C mientras que, en la segunda fase, se sumergían en un recipiente con agua a 20 °C realizando el choque térmico por la variación térmica. Cada vez que finalizaba un ciclo, se dejaban las muestras en temperatura ambiente para que al día siguiente se volviera a iniciar un nuevo ciclo.

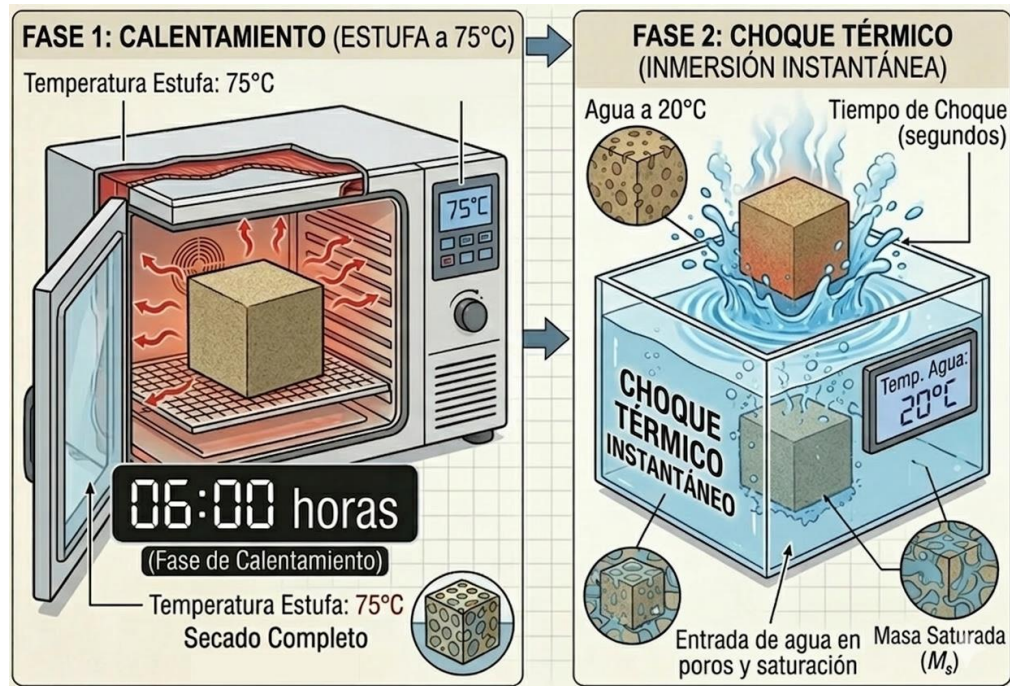


Figura 3-10 Esquema del proceso de Choque térmico. (Imagen generada con Gemini)

Cada 2 ciclos, se llevaban las muestras a estufa durante 1 día para que las muestras perdieran la humedad al haber estado sumergidas en agua y de esa manera, poder realizar la medición del peso de cada una de ellas tras ese período. Con esos datos y al igual que en el ensayo de hielo-deshielo se aplicó (Ecuación 9) la para determinar la pérdida de peso.

3.3.3 Sales

Para los ensayos relacionados con las sales solubles (Tabla 3-1), se hizo una selección de dos sales generalmente comunes, siendo una de ellas el cloruro de sodio (NaCl) y la otra el sulfato de sodio (Na_2SO_4). Estos tipos de sales suelen afectar a los materiales de construcción produciendo su deterioro y su disminución de vida útil. Para cada ensayo de sal se utilizaron, 2 muestras de referencia y, otras dos muestras con el producto aplicado

El cloruro de sodio se escogió por ser una de las sales mayormente presentes en el agua del mar convirtiéndose, por tanto, en una de las principales sales que más influyen en las construcciones situadas en las proximidades de la costa como, por ejemplo, los edificios de la Armada Española. Por su alta solubilidad y estabilidad (ya que apenas varía frente a la temperatura), el proceso de saturación se produce en su mayoría por evaporación, cerca de la superficie, provocando una arenización además de una formación de eflorescencias [2,13].

El sulfato de sodio se escogió ya que es una de las sales más presentes en los monumentos históricos además de ser una sal con altos porcentajes de alteración en los materiales [5,12]. Esta sal no sólo presenta cambios que generan importantes variaciones de volumen, sino que también, presiones de cristalización dentro de los poros del material. Con esta sal, se pretende comprobar que ejerce unas presiones que pueden superar la resistencia mecánica de la Dorada Urbión, produciendo fisuración, descamación o desprendimiento del material.

Propiedades/Sales	Cloruro de sodio	Sulfato de sodio
Fórmula	NaCl	Na ₂ SO ₄
Masa Molecular (g/mol)	58,4	142,04
Temperatura de fusión (°C)	800	884
Solubilidad a 20°C (g/100 g H ₂ O)	36	18,6

Tabla 3-1 Propiedades de las sales solubles seleccionadas para los ensayos

Con estas sales, se realizaron dos disoluciones con una concentración distinta en peso para contaminar las muestras escogidas de Dorada Urbión. Se realizó una disolución al 20 wt% de NaCl y al 14 wt% de Na₂SO₄.

Cada contaminación por sales consta de un ciclo de 3 fases (Figura 3-11):

- 1ª fase: inmersión completa de las muestras durante 2 horas en la disolución de la sal.
- 2ª fase: secado de las muestras en estufa durante 2 horas a una temperatura de 75 °C para asegurar la cristalización de las sales.
- 3ª fase: secado a temperatura ambiente durante 4 horas. En el ensayo de Na₂SO₄, este secado se produce en un recipiente con una humedad relativa en su interior cercana al 80%. Para ello se introduce dentro del recipiente un vaso de precipitados con una disolución saturada de Na₂SO₄. Esta sal presenta una humedad relativa a 25°C del 82,2% lo que garantiza que el sulfato cambie de fase de thenardita a mirabilita [2,12].

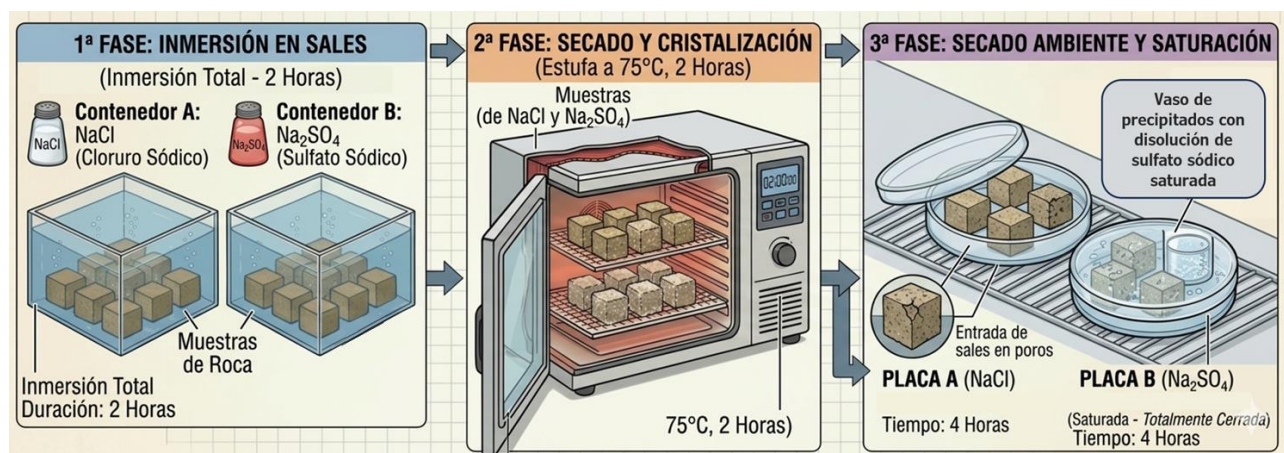


Figura 3-11 Esquema de los ensayos de sales desarrollados en el trabajo. (Imagen generada con Gemini)

Tras haber realizado veinte ciclos completos para cada sal, las muestras pasaban a una inmersión completa en agua destilada durante dos días para que perdieran todo el posible exceso de sales absorbido. Una vez pasado esos dos días en inmersión completa, las muestras procedían a ser introducidas en la estufa a 75 °C durante dos días para que pudiesen perder la humedad y así, poder tomar la medida de los pesos tras esos días de secado. La finalidad era determinar la pérdida de peso ocasionada por la alteración debida a la acción de las sales, empleando para ello la (Ecuación 9).

En total se realizaron 20 ciclos, es decir, 4 pesadas, en los que se pudo observar de manera progresiva el deterioro de las muestras conforme se realizaban los ciclos. Además, se realizó un reporte fotográfico para analizar visualmente el avance del daño ocasionado.

3.4 Análisis del comportamiento térmico

El análisis termográfico que se realizó tuvo como principal objetivo estudiar y analizar de qué manera se desarrollaba el cambio de temperatura en cada una de las muestras utilizadas en cada ensayo de durabilidad, para poder llegar a obtener una comparativa mediante imágenes de temperatura adquiridas. Para ello, se hizo uso de una cámara termográfica, concretamente la cámara termográfica FLIR E85 (Figura 3-12), con la que se pudo llevar un registro para cada uno de los ensayos de una duración de 2 horas en el cual se podía apreciar la variación térmica conforme el paso del tiempo.



Figura 3-12 Cámara FLIR modelo E85 (Imagen proporcionada por [57])

Las principales características de dicha cámara termográfica son las siguientes:

- Temperatura de trabajo entre -20°C y 650°C .
- Detector infrarrojo: con incorporación de microbolómetro no refrigerado de $17\text{ }\mu\text{m}$ de pixel.
- Rango espectral: entre $7,5\text{ }\mu\text{m}$ y $14\text{ }\mu\text{m}$ (banda infrarroja de onda larga).
- Sensibilidad térmica: de $0,03^{\circ}\text{C}$ a $0,04^{\circ}\text{C}$.
- Resolución imagen térmica: 384 (ancho) $\times$ 288 (altura) píxeles.

Para poder realizar este apartado de análisis termográfico, se colocó la cámara termográfica en un trípode a una distancia de aproximadamente 1 m con respecto a las muestras, enfocando el objetivo de la cámara de manera frontal con respecto a las caras medidas de las muestras. Se estableció un fondo negro tanto por debajo como por detrás con el fin de evitar la lectura de reflexiones térmicas del entorno. Los parámetros de configuración de la cámara (emisividad, temperatura reflejada, distancia entre cámara y muestras, humedad relativa y, temperatura ambiental) no se ajustaron a la realidad ya que no fueron necesarios, debido a que se realizó un análisis cualitativo en el que se buscó la diferencia de temperaturas en cada cara de cada muestra en vez de cuantificar el valor real de temperatura de cada pixel.

Tras la adquisición de las imágenes térmicas, para quedarse con la variación temporal de temperatura en cada muestra, se requirió el uso del software de la cámara (FLIR Tools+) mediante recortes en cada una de ellas (Figura 3-13). Se ha realizado estas mediciones térmicas tras la finalización de cada uno de los ensayos de durabilidad.

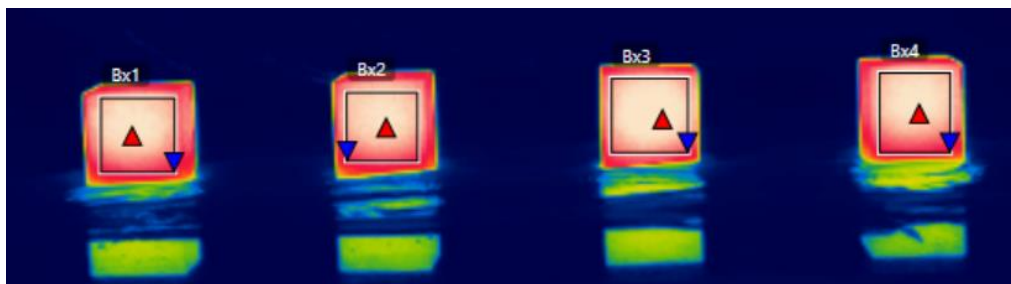


Figura 3-13 Recorte de cada muestra tras el ensayo de choque térmico mediante FLIR Tools+

Para la representación gráfica de la evolución temporal de cada muestra, se utilizó el entorno de Google Colab utilizando el lenguaje de programación Python. El código utilizado (Anexo IV: Explicación código utilizado en google colab) trabaja de la siguiente manera:

- **Bloque 1:** Configuración e Importación: Este bloque se encarga de montar Google Drive en el entorno de Colab. Su entrada es la interacción del usuario para la autenticación de Drive, su proceso es la ejecución del comando “drive.mount()” y, su salida es un mensaje de confirmación de que Drive ha sido montado correctamente. Se ha escrito el siguiente *prompt* al Gemini de Google Colab: "Monta mi Google Drive para poder acceder a los archivos desde Colab.".
- **Bloque 2:** Procesar imágenes: Este bloque procesa un archivo CSV térmico, que es el resultado del recorte de una de las muestras de una de las grabaciones hecho previamente en el FLIR Tools+, segmentándolo en imágenes individuales, guardando representaciones visuales y consolidando los datos en una matriz de tiempo-temperatura. Las entradas son la ruta completa de un archivo CSV en Google Drive, la resolución de la imagen (filas y columnas, que en este caso son las dimensiones del recorte), los FPS (*frames per second*) de la grabación original y el intervalo deseado en segundos para guardar imágenes. Se ha escrito el siguiente *prompt* al Gemini de Google Colab: "Crea un script de Python para procesar un CSV térmico. Deberá pedir la ruta del CSV, la resolución de imagen, los FPS y el intervalo de segundos. El script leerá el CSV, extraerá imágenes JPG y generará un nuevo CSV con los datos de temperatura aplanados por tiempo."
- **Bloque 3:** Representación gráfica de la temperatura frente al tiempo: Este bloque analiza las matrices CSV generadas en el Bloque 2 para graficar la evolución térmica. Las entradas son la ruta de una carpeta que contiene múltiples archivos CSV de matrices procesadas y, opcionalmente, un intervalo de tiempo (mínimo y máximo en minutos) para filtrar los datos. El proceso incluye el cálculo de la media y desviación estándar de temperatura para cada archivo en cada punto temporal. Se guarda cuatro tipos de gráficas (comparativa con intervalo de confianza (IC), solo media, media + desviación, media - desviación) como archivos PNG. Además, se consolida todas las estadísticas de media y desviación estándar en un único archivo CSV. Se ha escrito el siguiente *prompt* al Gemini de Google Colab: "Escribe un script en Python que analice múltiples archivos CSV de matrices térmicas de una carpeta dada. Debe permitir filtrar por un rango de tiempo. El script calculará la media y desviación estándar de la temperatura para cada punto de tiempo. Generará y guardará cuatro gráficas PNG (comparativa, media, media + desv, media - desv) de la evolución térmica. También exportará un CSV con estadísticas detalladas de todas las muestras. Las variables de ruta y tiempo deben ser globales para su uso posterior."

A continuación, se muestra un diagrama de flujo del código explicado anteriormente (Figura 3-14):

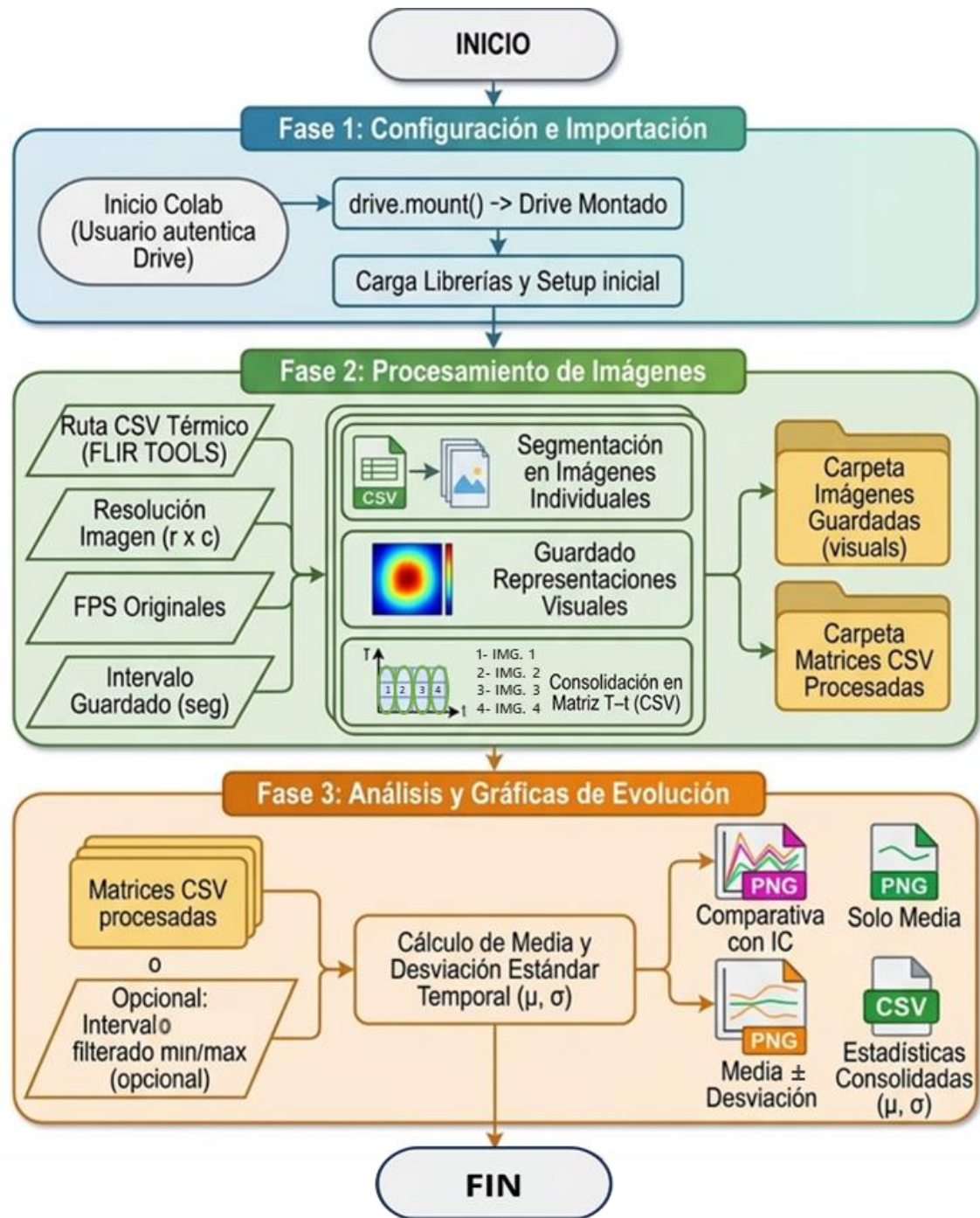


Figura 3-14 Diagrama de flujo del código empleado en Google Colab. (Imagen generada con Gemini)

4 RESULTADOS

4.1 Caracterización del material

4.1.1 Propiedades físico-mecánicas

La Tabla 4-1 recoge las propiedades físico-mecánicas de la Dorada Urbión, tanto antes como después de aplicar el tratamiento, a fin de analizar la influencia de la presencia del consolidante en la muestra (sin alteración previa).

Parámetro	Antes de tratar	Después de tratar
Porosidad accesible al H ₂ O (% v/v)	15,19 ±0,86	15,20±1,19
Porosidad Capilar (% v/v)	17,31±7	17,92±0,02
Coeficiente Capilar (kg/m ² ·min ^{0,5})	1,215	1,129
Velocidad de Ultrasonidos (m/s)		
Máximo	2485±154	2273±152
Medio	2411±158	2182±161
Mínimo	2341±174	2121±188
dM (%)	4,35	4,78
dm (%)	3,01	4,10
Resistencia a compresión (MPa)	11,18±2,48	7,75±2,47
Dureza Superficial (HLD)	548,29±27,04	518,83±28,45

Tabla 4-1 Propiedades físico-mecánicas del material analizado

Se puede apreciar que el tratamiento consolidante apenas ha influido en las propiedades iniciales de la arenisca tales como la porosidad accesible, lo que podría estar indicando que se ha debido producir una baja penetrabilidad del mismo, pese a que el consumo obtenido ha sido de 0,64% y la materia seca del 0,29 (valores similares a los obtenidos en otros estudios sobre consolidación donde sí que se ha

apreciado variaciones en estos parámetros después del tratamiento [32]). Incluso algunas de las propiedades que comúnmente suelen sufrir un aumento tras un tratamiento de consolidación debido al relleno de algunos poros, tales como la velocidad de transmisión de ultrasonidos, han sufrido un desplome.

A partir de los parámetros de consumo y materia seca se observa que la relación materia seca/consumo alcanzada fue del 47,95 %, indicativo de que parte del material aplicado ha sido arrastrado hacia afuera a medida que el solvente alcohólico se evaporó, tal y como ocurre con solventes comerciales como el Estel 1000 [32].

Las cinéticas de absorción de agua, tanto por inmersión (Figura 4-1) como por capilaridad (Figura 4-2), corroboran que apenas se han ocasionado cambios en la estructura porosa del material.

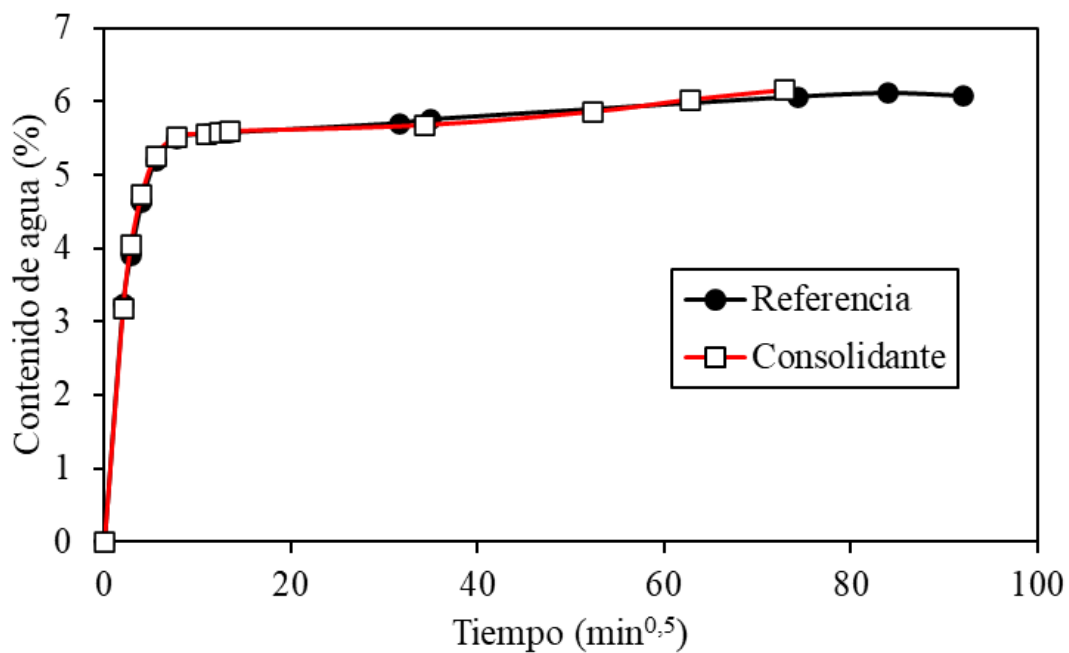


Figura 4-1 Gráfica absorción de agua por inmersión tanto antes como después de aplicar el consolidante

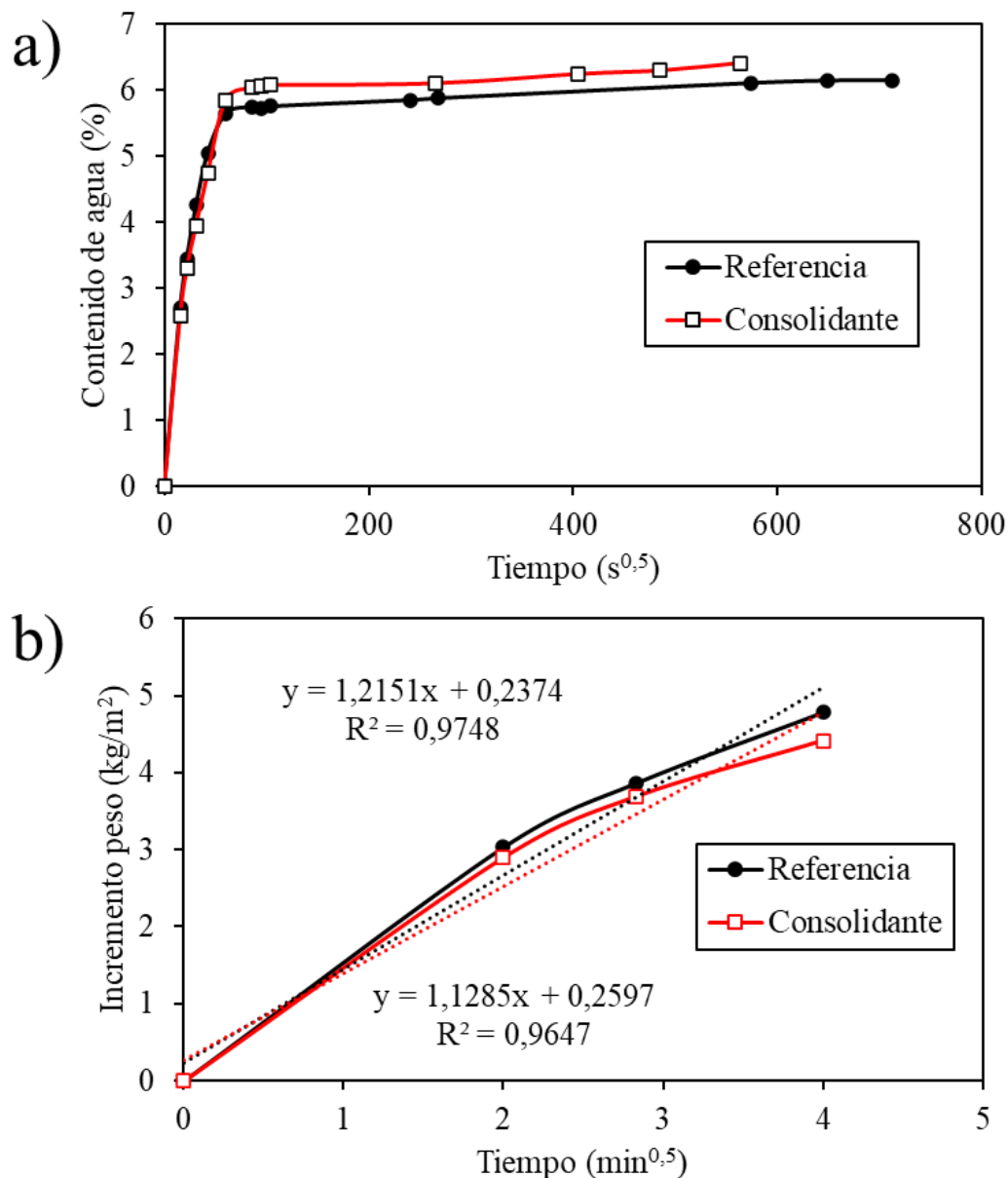


Figura 4-2 a) Gráfica de la absorción de agua por el método capilar. b) Gráfica de la pendiente resultante debido al método capilar

4.1.2 Análisis SEM

Los análisis SEM (Figura 4-3) corroboran que la arenisca empleada en el trabajo, la Dorada Urbion, se compone en su mayoría de cuarzo (75%) y feldespato potásico (5-10%) tal y como apuntaban estudios previos. Se aprecia además la presencia en menor proporción de micas (tanto moscovitas como biotitas) así como oxihidróxidos de hierro que son los responsables de las vetas que se ven a nivel macroscópico.

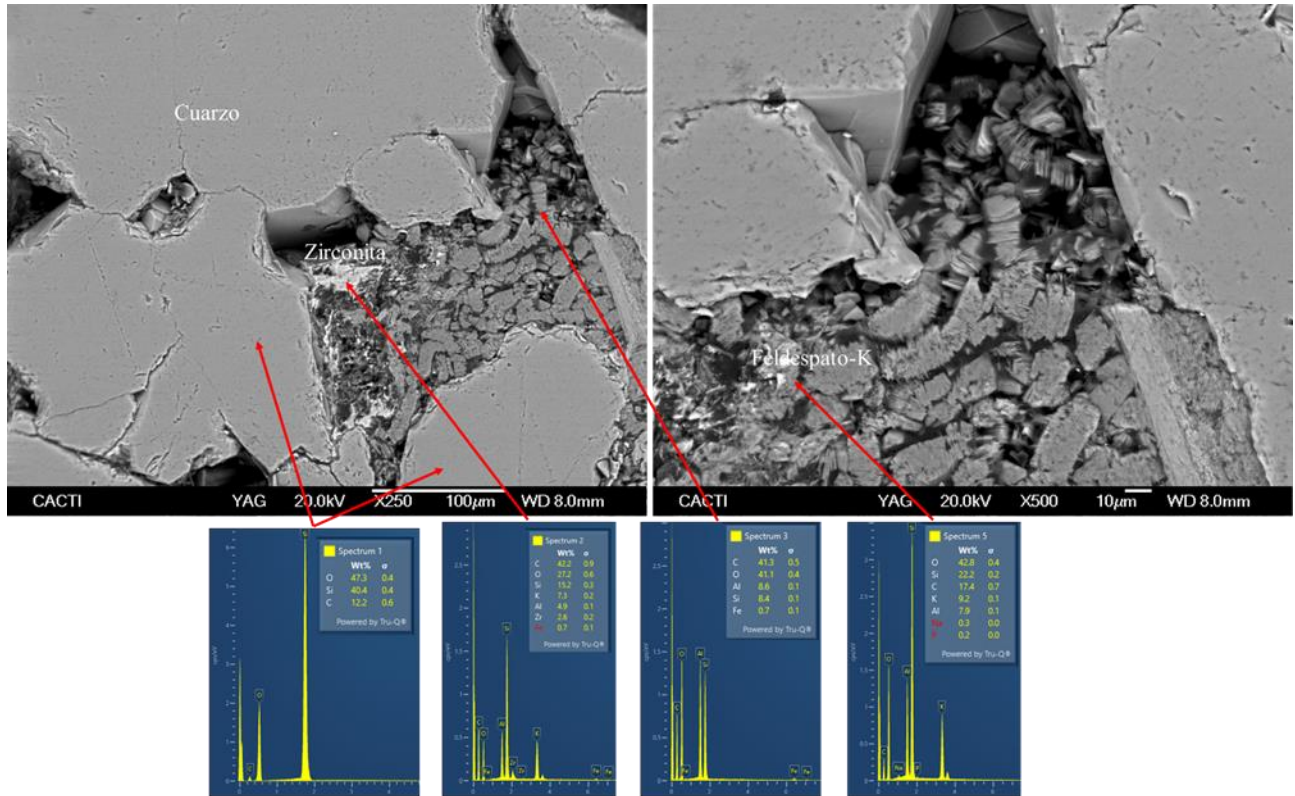


Figura 4-3 Imágenes SEM de la roca Dorada Urbión embebida en resina sin tratamiento. Se muestra en detalle los análisis EDS realizados en zonas puntuales para identificar los minerales presentes

Después del tratamiento con el consolidante, los análisis en superficie (Figura 4-4) revelan una distribución del calcio a lo largo de toda la muestra, indicativo de la presencia del consolidante ya que inicialmente la roca carece de este catión.

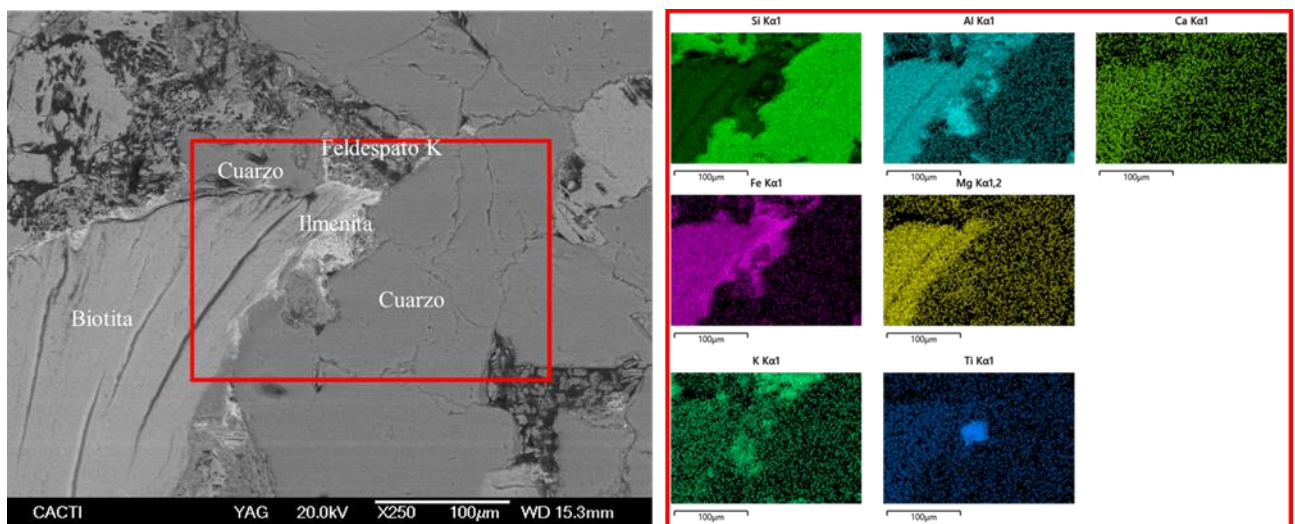


Figura 4-4 Imagen SEM de muestra de arenisca embebida en resina y tratada en superficie. A la derecha se aprecia la distribución de los principales cationes presentes en el área roja correspondiente al mapping realizado

El análisis efectuado sobre corte transversal (Figura 4-5), en muestra embebida en resina, no permitió encontrar la distribución del calcio en la muestra, por lo que no se pudo determinar la profundidad de penetración del consolidante. Sin embargo, los análisis efectuados sobre muestra de roca

cortada transversalmente, pero sin embeber en resina, mostraron la presencia de nanopartículas de cal distribuidas por distintas oquedades de la roca.

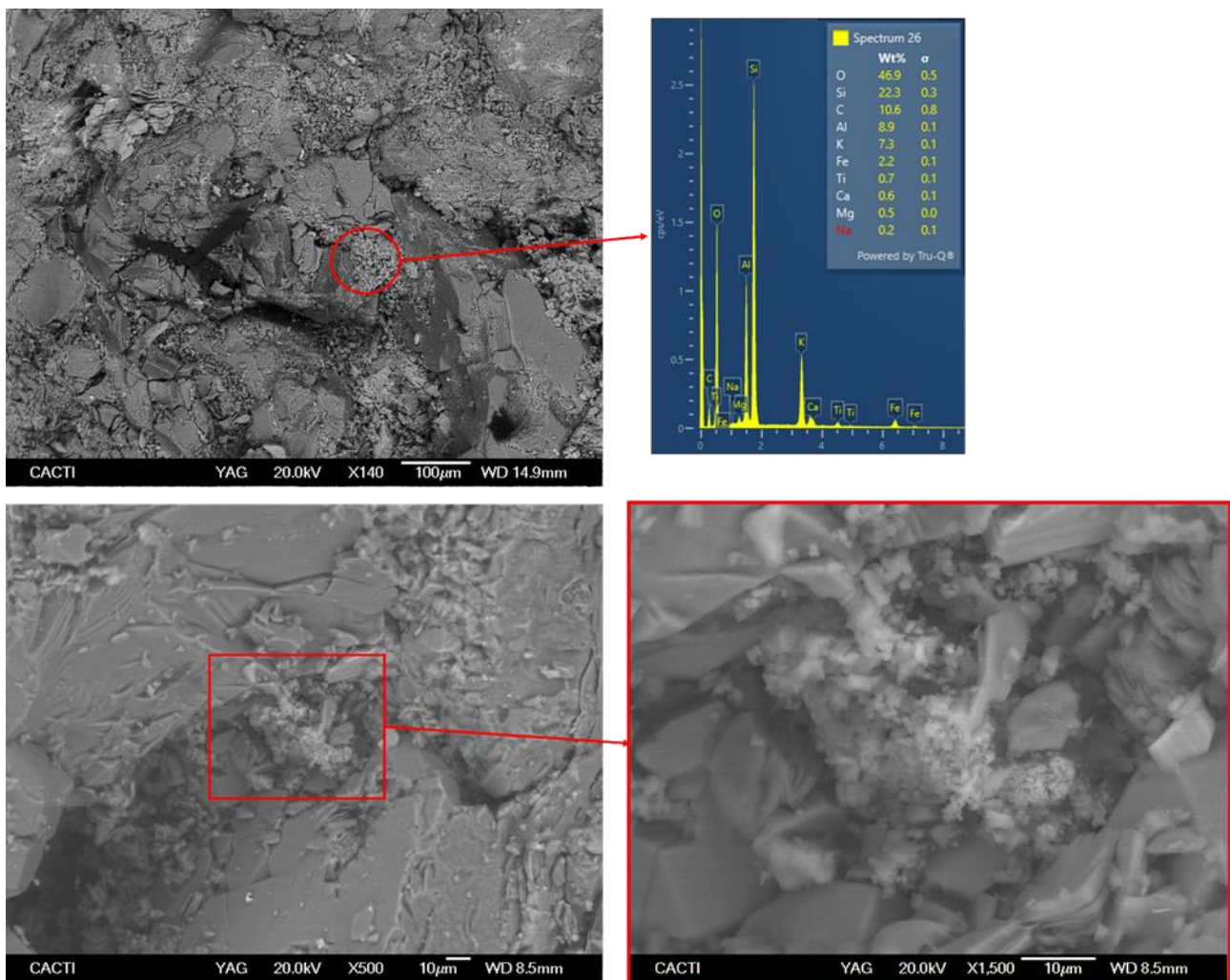


Figura 4-5 Imágenes SEM, correspondientes al corte transversal, de una muestra de arenisca consolidada, Se puede apreciar que a lo largo de la sección aparecen nanopartículas de calcio en los poros correspondientes al compuesto aplicado

4.1.3 Durabilidad Hielo-Deshielo

En la Tabla 4-2 y Tabla 4-3 se recogen las propiedades físico-mecánicas de la dureza superficial y los ultrasonidos tanto antes como después de la finalización de los ensayos de alteración de las muestras con consolidante y sin consolidante respectivamente. Los datos recogidos en ambas tablas son el promedio correspondiente a las propiedades de las muestras empleadas en los ensayos de durabilidad realizados, por ello los valores iniciales de sus propiedades, tanto sin tratar como tratada con el consolidante, puede que no coincidan con los recogidos en la Tabla 4-1.

	Dureza Superficial (HLD)			
	Antes ensayo durabilidad		Después ensayo durabilidad	
	Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
Hielo-Deshielo	515±71	508±37	511±41	530±15
Choque Térmico	558±41	532±16	541±13	534±2
NaCl	557±40	529±7	500±15	494±6
Na₂SO₄	552±41	524±7	397±6	416±6

Tabla 4-2 Valores de la dureza superficial (HLD) de las muestras (n=2)

	Ultrasonidos (m/s)			
	Antes ensayo durabilidad		Después ensayo durabilidad	
	Sin tratar	Tratada	Sin tratar	Tratada
Hielo-Deshielo	2324±310	2227±319	2118±33	2353±91
Choque Térmico	2299±25	2167±159	2219±89	2350±101
NaCl	2460±149	2194±112	2387±323	2449±83
Na₂SO₄	2425±142	2211±197	-	-

Tabla 4-3 Valores de ultrasonidos (m/s) de las muestras (n=2)

En la Figura 4-6 se representa la evolución media de la pérdida de peso de las muestras de arenisca a lo largo de los ciclos de alteración. A partir de esta gráfica, se observa que las muestras de referencia, es decir, aquellas que no han sido tratadas con el consolidante, experimentan una mayor pérdida de peso en comparación con las muestras tratadas. Este comportamiento confirma que el tratamiento consolidante mejora el comportamiento de la roca frente a los procesos de deterioro de hielo-deshielo, al menos, durante los primeros 5 ciclos (donde se aprecia una caída de peso menor) ya que, a partir del quinto ciclo, la distancia entre la pérdida de peso existente entre muestras tratadas y sin tratar se mantiene.

Los datos de dureza muestran que ésta ha disminuido ligeramente en las muestras sin tratar, pasando de un valor medio de 515 a uno de 511 mientras que, en las muestras donde se aplicó el consolidante, el comportamiento fue inverso, produciéndose un incremento en la dureza de la muestra desde 508 a 530 HLD. Además, este mismo comportamiento se observó en las medidas obtenidas por ultrasonidos donde en las muestras tratadas con el consolidante se apreció un aumento en la velocidad de transmisión de los ultrasonidos. El incremento experimentado en ambos parámetros en las muestras tratadas con consolidante puede estar relacionado con un posible proceso de carbonatación de las partículas de CaO. Este proceso se produciría por una primera hidratación de las nanopartículas de CaO, que pasarían a Ca(OH)₂, y una posterior carbonatación al verse expuestas al CO₂ ambiental durante el secado a temperatura ambiente.

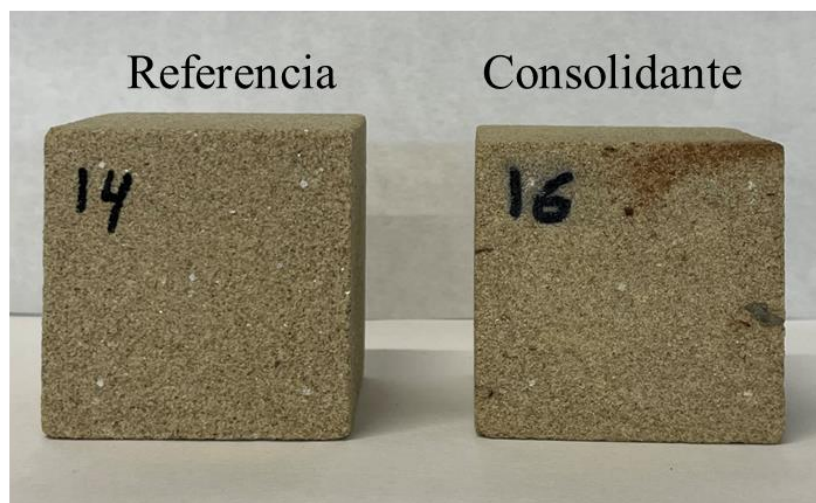
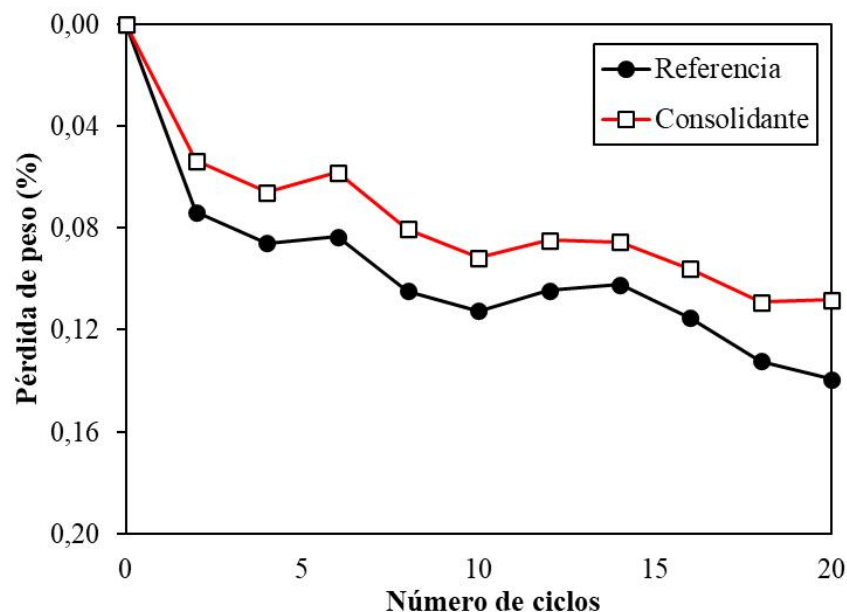


Figura 4-6 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso ($n=2$) cada 2 ciclos de alteración de Hielo-Deshielo y el resultado final de las muestras tras el ensayo

4.1.4 Durabilidad Choque térmico

En la Figura 4-7 se presenta la evolución media de la pérdida de masa experimentada cada dos ciclos por las muestras de arenisca, con y sin tratamiento, hasta el final del ensayo que se compuso de 20 ciclos. A partir de esta gráfica, se observa que al igual que en el ensayo de Hielo-Deshielo, las muestras de referencia, es decir, las que no han sido tratadas con el consolidante, presentan una mayor pérdida de peso en comparación con las muestras de consolidante. Este comportamiento confirma que el tratamiento de consolidación es eficaz frente al proceso de deterioro en cambios de temperatura agresivos.

Nuevamente los datos obtenidos de dureza superficial y de transmisión de ultrasonidos ponen de manifiesto que el esqueleto mecánicamente útil de la roca tratada se ha debido fortalecer por la posible carbonatación del consolidante en el interior de los poros del material. Para corroborar esto se podría llevar a cabo un análisis SEM de estas muestras (hecho que se indica en líneas futuras al final del documento).

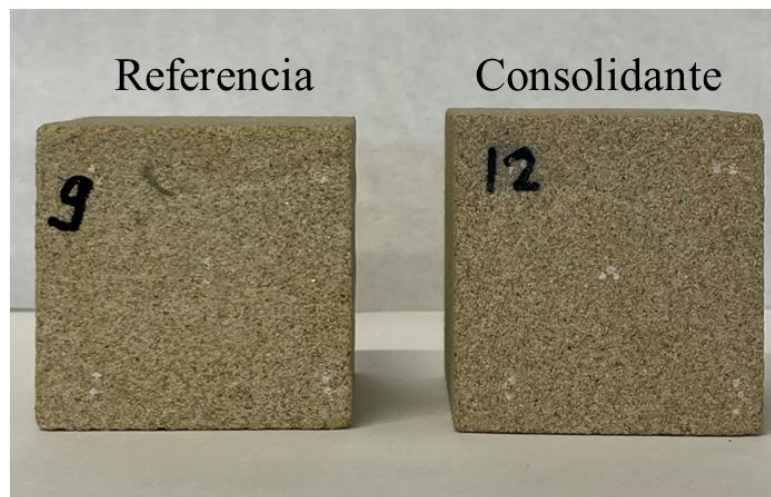
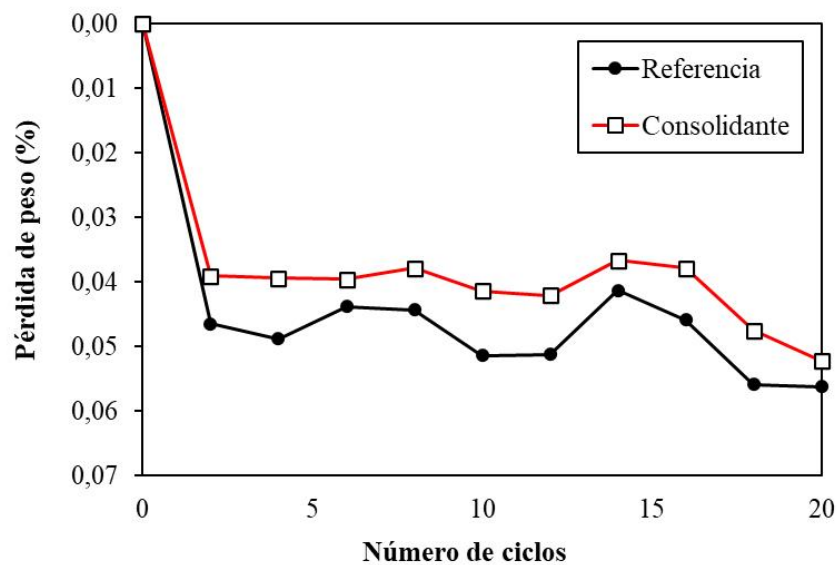


Figura 4-7 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 2 ciclos de alteración de Choque térmico y el resultado final de las muestras tras el ensayo

4.1.5 Durabilidad frente a la acción de sales solubles

La durabilidad de las muestras de arenisca, tanto tratada como sin tratar, fue similar frente a la acción del cloruro de sodio, al menos a lo largo de los 25 ciclos que se han realizado en este trabajo (Figura 4-8), mientras que, en el caso del sulfato (Figura 4-9) sí que se aprecia como al final de los 25 ciclos la pérdida experimentada por las muestras consolidadas ha sido ligeramente menor.

La tendencia mostrada en los datos registrados, las imágenes visuales de las muestras de roca a medida que avanza el ensayo y los datos obtenidos de dureza superficial y ultrasonidos no permiten confirmar de manera contundente que este tratamiento mejora el comportamiento del material frente a este agente de alteración.

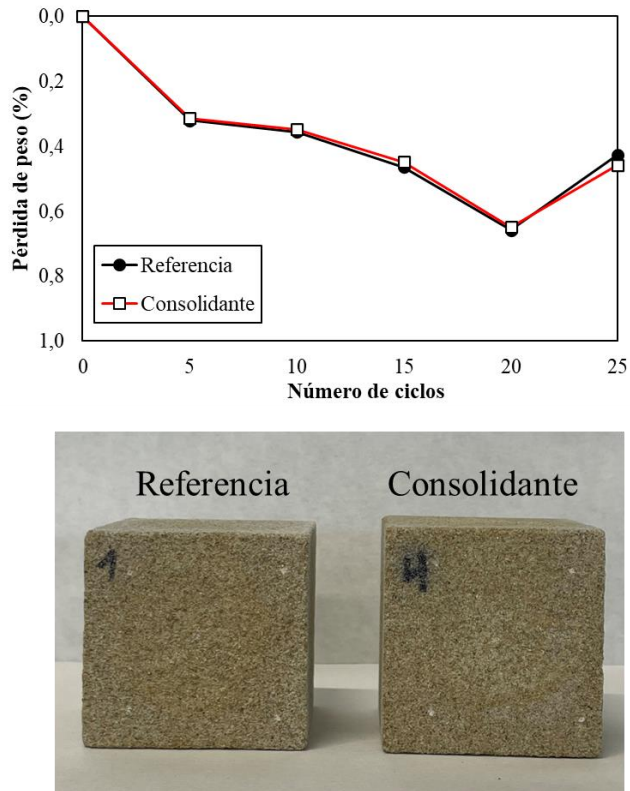


Figura 4-8 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 5 ciclos de alteración con NaCl

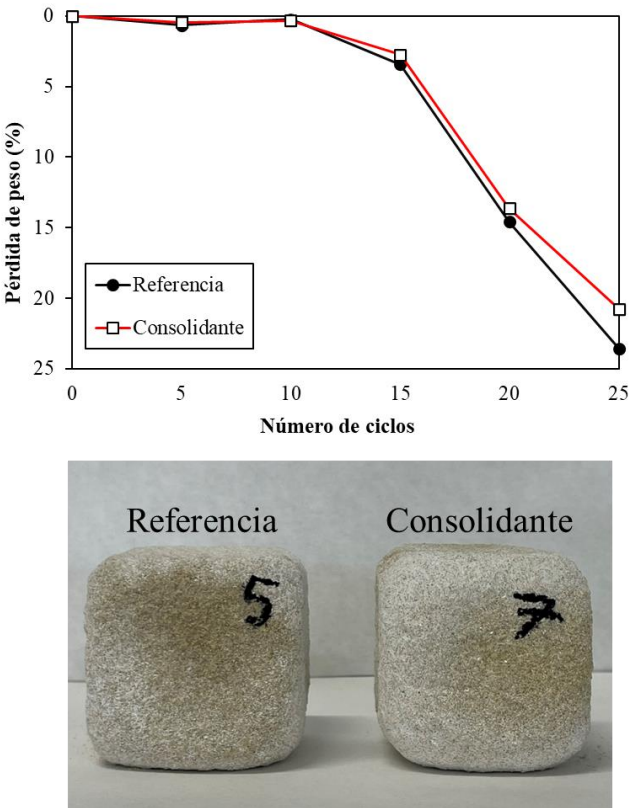


Figura 4-9 Gráfica de la progresión del valor medio de pérdida de peso (n=2) cada 5 ciclos de alteración con Na₂SO₄

4.2 Análisis termográfico

Tras la finalización de cada ensayo de durabilidad, se han analizado las muestras de manera que:

4.2.1 Ensayo hielo-deshielo

En la gráfica de la evolución térmica de las muestras (Figura 4-10) se ha podido apreciar que el comportamiento de la arenisca, durante un proceso de calentamiento, es independiente del tratamiento a la hora de alcanzar el equilibrio térmico con el medio ambiente.

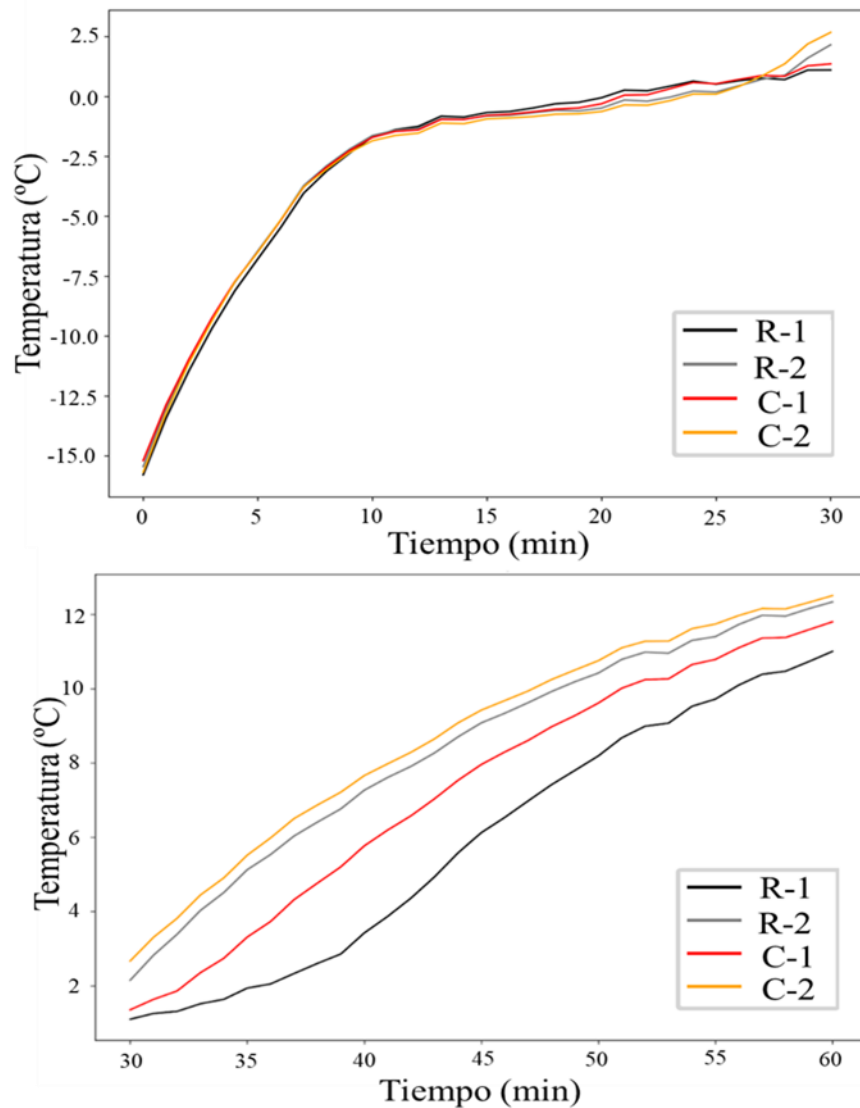


Figura 4-10 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de calentamiento, desde -15°C hasta temperatura ambiente

4.2.2 Ensayo choque térmico

El registro térmico obtenido durante el proceso de enfriamiento (Figura 4-11) de las muestras sometidas a choque térmico evidencia que aquellas tratadas con consolidante alcanzan la temperatura de equilibrio a una velocidad inferior con respecto a las que no han sido tratadas con el consolidante. Esto se debe a que: 1) la alúmina tiene una capacidad calorífica relativamente alta, lo que significa que puede almacenar bastante energía térmica por unidad de masa. Por ello, la temperatura al inicio del ensayo es más alta en las muestras consolidadas, pese a haberse metido todas las muestras de arenisca en estufa durante el mismo intervalo de tiempo; 2) el consolidante podría haber rellenado parte de los poros, sobre todo después de haber estado expuesto al agua y al ambiente, lo que va a disminuir la difusividad térmica que ocasiona que el calor tarde más tiempo en propagarse desde el interior hacia la superficie.

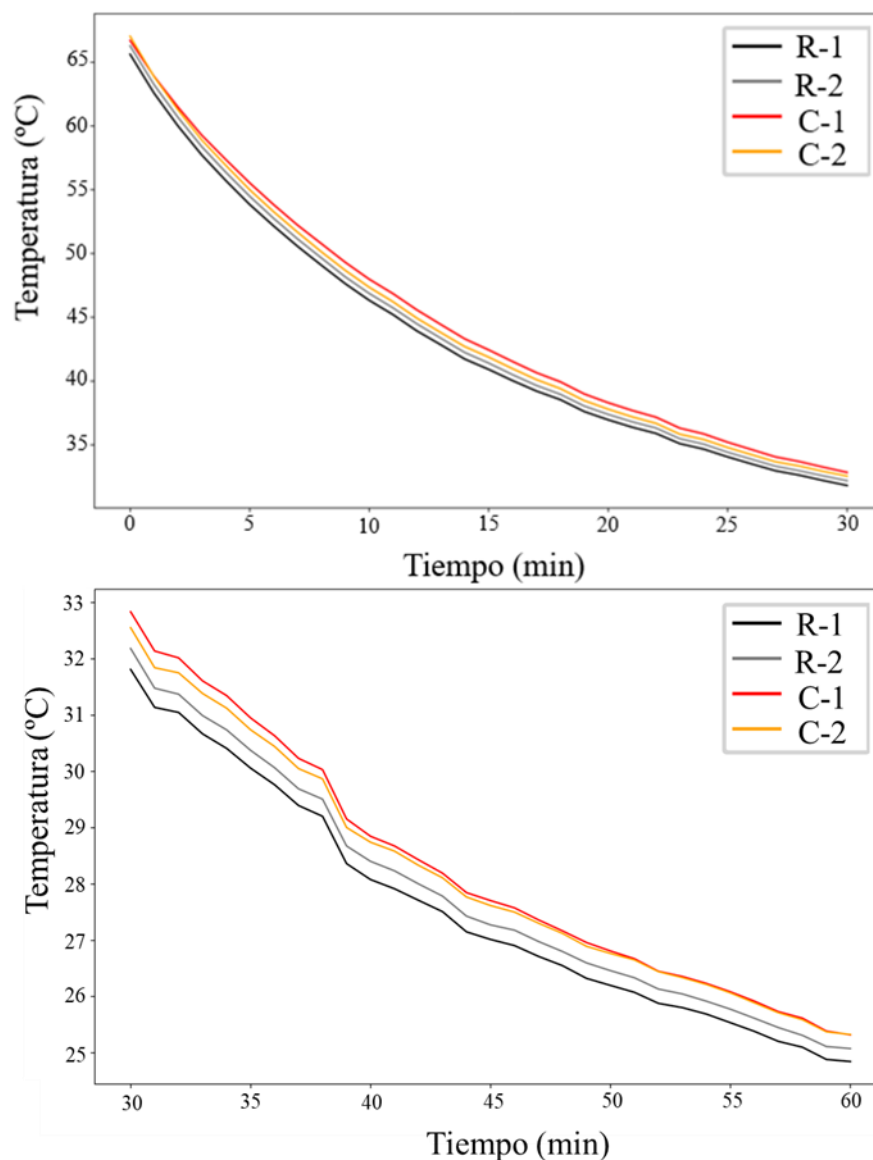


Figura 4-11 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de enfriamiento, desde 65°C hasta temperatura ambiente

4.2.3 Ensayo contaminación por sales: NaCl

En el registro de temperatura correspondiente a las muestras alteradas mediante el ensayo de sales (Figura 4-12), concretamente con NaCl, se observa un comportamiento muy similar al de las muestras sometidas a choque térmico. Este resultado puede atribuirse nuevamente a la presencia de alúmina, que genera un efecto análogo al descrito en el ensayo de choque térmico, influyendo en la respuesta térmica del material.

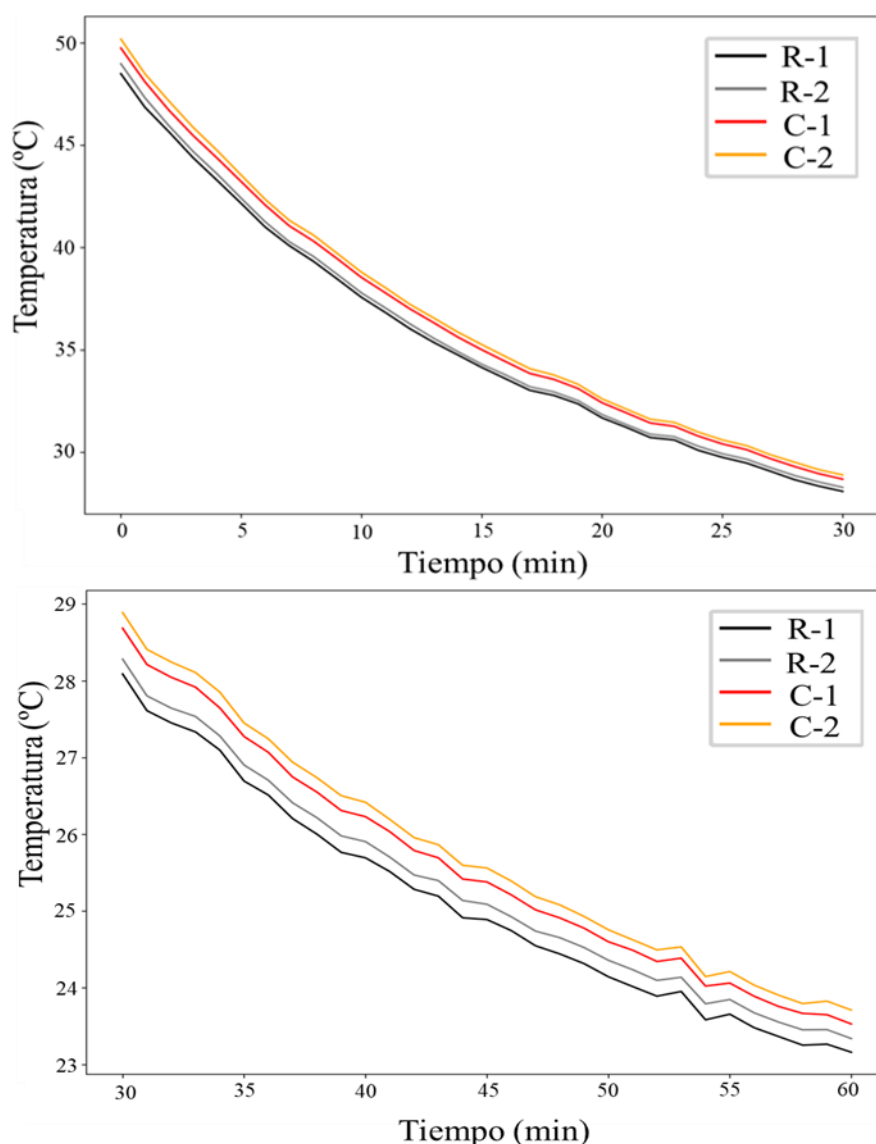


Figura 4-12 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de enfriamiento, desde 50°C hasta temperatura ambiente, realizado sobre muestras alteradas con NaCl

4.2.4 Ensayo contaminación por sales: Na₂SO₄

En la gráfica de la evolución térmica de las muestras alteradas mediante el ensayo de sales (Figura 4-13), en concreto con Na₂SO₄, se observa un comportamiento prácticamente similar al de las muestras

alteradas por choque térmico y por NaCl debido de nuevo a la presencia del compuesto de la alúmina. Aún así, se puede apreciar cierto desvío con respecto a una de las muestras de referencia manteniéndose equivalente con una de las muestras que ha sido tratada con el consolidante.

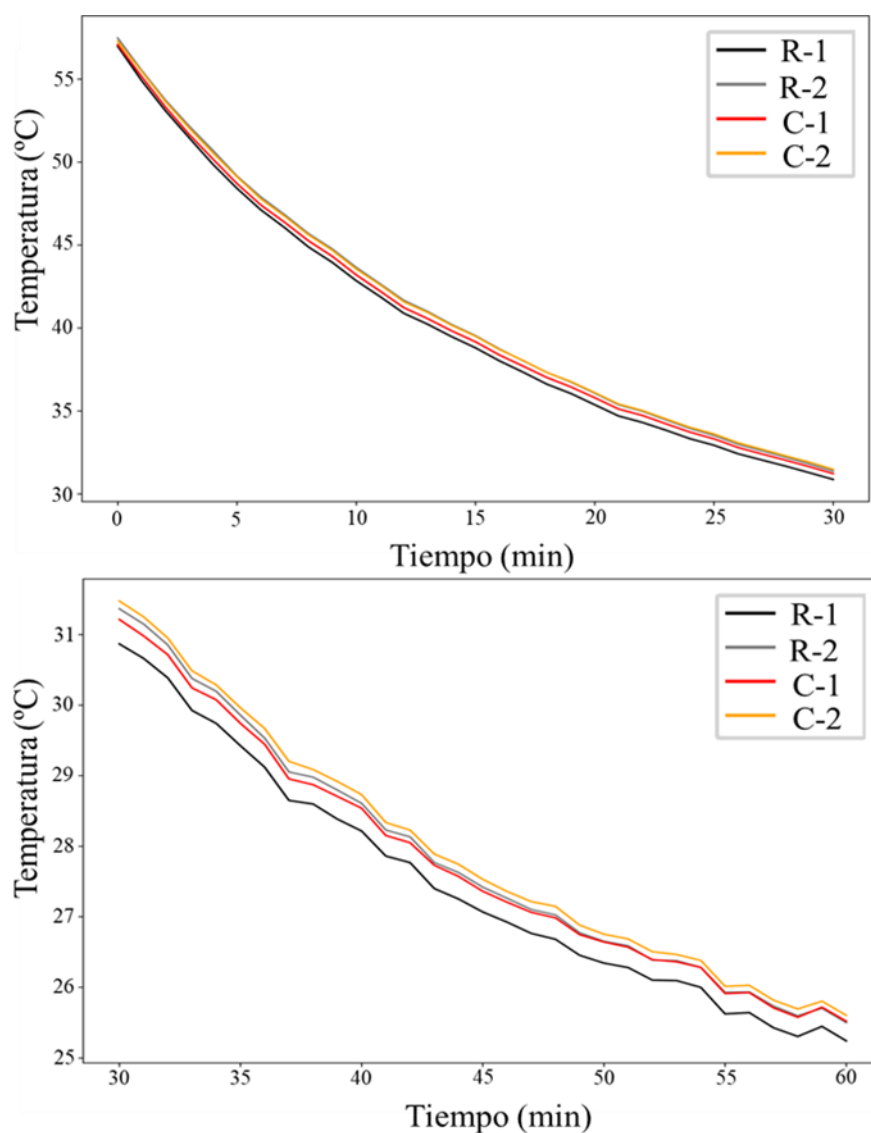


Figura 4-13 Registro de la temperatura de las muestras mediante cámara termográfica a lo largo de un proceso de enfriamiento, desde 50°C hasta temperatura ambiente, realizado sobre muestras alteradas con Na_2SO_4

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden obtener de los resultados obtenidos y que van en línea con los objetivos marcados al inicio de este estudio son:

1. La aplicación del consolidante, que apenas ocasiona una variación en las propiedades iniciales de la arenisca pese a que el análisis SEM demuestra que está presente en algunos poros del material.
2. El consolidante mejora el comportamiento del material frente a ensayos de hielo-deshielo y choque térmico. Mientras que, frente a las sales solubles no se aprecian diferencias salientables entre el material tratado y sin tratar.
3. En los ensayos de alteración hielo-deshielo y choque térmico, se ha observado un incremento en sus propiedades mecánicas, tales como la dureza superficial y la transmisión de ultrasonidos que es una medida indirecta de la resistencia a compresión simple. Este hecho parece estar relacionado con un posible proceso de carbonatación de las nanopartículas.
4. La presencia del recubrimiento de Al_2O_3 ocasiona un incremento de la inercia térmica de la arenisca.

5.2 Líneas futuras

Como líneas futuras a este trabajo y en línea con el proyecto nacional en el que se enmarca [3] se propone las siguientes líneas futuras:

1. Confirmar que con la exposición al agua y posterior exposición al CO_2 ambiental se produce un proceso de carbonatación que tiende a rellenar parte de los poros del material.
2. Realizar un análisis similar, al realizado en este TFG, a la mejora que se está desarrollando en el instituto NanoGune donde se está incorporando SiO_2 al recubrimiento de las nanopartículas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. de España, Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, 2006. <https://doi.org/10.5821/ace.v1i2.2350>.
- [2] I. de Rosario, J. Feijoo, Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos. Técnicas de conservación., Monogr. Da Univ. Vigo Tecnoloxía (2016) 294.
- [3] P. Data, IP 1 : Aranzazu Sierra Fernández TITLE OF THE PROJECT (ACRONYM) – English / Spanish :, (n.d.) 1–10.
- [4] M. Steiger, A.E. Charola, K. Sterflinger, Stone in Architecture properties and Durability, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_4.
- [5] A.E. Charola, Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview, J. Am. Inst. Conserv. 39 (2000) 327–343. <https://doi.org/10.1179/019713600806113176>.
- [6] S. Siegesmund, R. Snethlage, Stone in architecture: Properties, durability, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>.
- [7] A. Arnold, K. Zehnder, Salt weathering on monuments, La Conserv. Dei Monum. Nel Bacino Del Mediterr. Inlu. Dell'ambiente Costiero e Dello Spray Mar. Sulla Pietra Calcarea e Sul Marmo Atti Del 1o Simp. Internazionale, Bari 7-10 Giugno, 1989 = Conserv. Monum. Mediter (1990).
- [8] A. Arnold, K. Zehnder, Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts, in: Conserv. Wall Paint. Proc. a Symp. Organ. by Court. Inst. Art Getty Conserv. Institute, London, July 13–16 1987, 1991: pp. 103–135.
- [9] A.E. Charola, C. Bläuer, Salts in Masonry: An Overview of the Problem, Restor. Build. Monum. 21 (2015) 119–135. <https://doi.org/doi:10.1515/rbm-2015-1005>.
- [10] B. Silva, B. Prieto, T. Rivas, L. Pereira, Gypsum-induced decay in granite monuments in Northwestern Spain, Mater. Constr. (2010). <https://doi.org/10.3989/mc.2010.46808>.
- [11] W. Kloppmann, P. Bromblet, J.M. Vallet, V. Vergès-Belmin, O. Rolland, C. Guerrot, C. Gosselin, Building materials as intrinsic sources of sulphate: A hidden face of salt weathering of historical monuments investigated through multi-isotope tracing (B, O, S), Sci. Total Environ. (2011). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.008>.
- [12] A.E. Charola, J. Pühringer, M. Steiger, Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials, Environ. Geol. 52 (2007) 339–352. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0566-9>.

- [13] B.A. Lubelli, Sodium chloride damage to porous building materials., PhD Thesis, TU Delft, Delft Univ. Technol. (2006) 2006.
- [14] J. Gisbert Aguilar, El papel de la reproducción experimental de agentes/procesos en los estudios sobre el deterioro de la piedra de nuestro patrimonio histórico, *Palabras Prelim.* (2023) 113–135. <https://doi.org/10.14201/0bcl011113135>.
- [15] C.M. Grossi, R.M. Esbert, Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica, *Mater. Construcción* (1994). <https://doi.org/10.3989/mc.1994.v44.i235.579>.
- [16] Y. Jiang, Sources of sulfur in the Nandong underground river system, southwest China: A chemical and isotopic reconnaissance, *Appl. Geochemistry* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.05.001>.
- [17] B. Silva, T. Rivas, E. García-Rodeja, B. Prieto, Distribution of ions of marine origin in Galicia (NW Spain) as a function of distance from the sea, *Atmos. Environ.* 41 (2007) 4396–4407. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2007.01.045>.
- [18] J. Feijoo Conde, Definición de los protocolos más eficaces para la desalación en granitos ornamentales, Universidade de Vigo, 2016.
- [19] M.F. La Russa, P. Fermo, V. Comite, C.M. Belfiore, D. Barca, A. Cerioni, M. De Santis, L.F. Barbagallo, M. Ricca, S.A. Ruffolo, The Oceanus statue of the Fontana di Trevi (Rome): The analysis of black crust as a tool to investigate the urban air pollution and its impact on the stone degradation, *Sci. Total Environ.* 593–594 (2017) 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.185>.
- [20] M. Gómez-Heras, D. Benavente, M. Álvarez de Buergo, R. Fort, Soluble salt minerals from pigeon droppings as potential contributors to the decay of stone based cultural heritage, *Eur. J. Mineral.* (2004). <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2004/0016-0505>.
- [21] J.M. Teutonico, A laboratory manual for architectural conservators, 1988. http://007.iccrom.org/ifrcdn/pdf/ICCROM_11_LabManual_en.pdf.
- [22] R. Fort González, La piedra natural y su presencia en el patrimonio histórico. *Natural Stone: Historical Heritage Presence*, Enseñanza Las Ciencias La Tierra 17 (2009) 16–25.
- [23] J. Feijoo, L.M. Ottosen, O. Matyscak, R. Fort, Electrokinetic desalination of a farmhouse applying a proton pump approach. First in situ experience, *Constr. Build. Mater.* 243 (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118308>.
- [24] A. Zornoza-Indart, Técnicas de desalación, *La Conserv. Los Geomateriales Util.* En *El Patrim.* (2012) 143–154. <http://hdl.handle.net/10261/46809>.
- [25] T. Rivas, J. Feijoo, I. de Rosario, J. Taboada, Use of Ferrocyanides on Granite Desalination by Immersion and Poultice-Based Methods, *Int. J. Archit. Herit.* 11 (2017) 588–606. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1277282>.
- [26] L. Pel, A. Sawdy, V. Voronina, Physical principles and efficiency of salt extraction by poulticing, *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.03.007>.
- [27] B. Lubelli, R.P.J. van Hees, Desalination of masonry structures: Fine tuning of pore size distribution of poultices to substrate properties, *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.03.005>.
- [28] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, M.J. Mosquera, J. Taboada, C. Montojo, F. Carrera, Granite desalination using electromigration. Influence of type of granite and saline contaminant, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) 365–376. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2012.09.004>.
- [29] L.M. Ottosen, I. V Christensen, Electrokinetic desalination of sandstones for NaCl removal - Test

- of different clay poultices at the electrodes, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.06.005>.
- [30] J. Feijoo, L.M. Ottosen, O. Matyscak, R. Fort, Electrokinetic desalination of a farmhouse applying a proton pump approach. First in situ experience, *Constr. Build. Mater.* 243 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118308>.
- [31] I. De Rosario, F. Elhaddad, A. Pan, R. Benavides, T. Rivas, M.J. Mosquera, Effectiveness of a novel consolidant on granite: Laboratory and in situ results, *Constr. Build. Mater.* 76 (2015) 140–149. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.11.055>.
- [32] I. de Rosario, T. Rivas, G. Buceta, J. Feijoo, M.J. Mosquera, Surfactant-Synthesized Consolidants Applied To A Granitic Medieval Necropolis In NW Spain. Laboratory And In Situ Effectiveness Evaluation, *Int. J. Archit. Herit.* 11 (2017) 1166–1176. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1354097>.
- [33] A. Sierra-Fernandez, L.S. Gomez-Villalba, M.E. Rabanal, R. Fort, New nanomaterials for applications in conservation and restoration of stony materials: A review, *Mater. Constr.* 67 (2017). <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07616>.
- [34] E. Tesser, A. Conventi, F. Majerle, Characterization of Barium Hydroxide Used as Consolidating Agent for Monumental Surfaces in Venice, *Heritage* 5 (2022) 3280–3297. <https://doi.org/10.3390/heritage5040168>.
- [35] A.G. Casco, Consolidación de materiales pétreos, (n.d.). <https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauro/16Consolidacion.htm>.
- [36] H. Revuelta, Capítulo 3: Tratamientos tipos de consolidantes, in: *Comportamineto Prod. Consolidantes Apl. a Piedras Impregnadas Sales Solubles*, Universidad de Sevilla, 2010: pp. 30–60.
- [37] J.E. Benítez Telles, VALORACIÓN DEL DETERIORO DE LA MADERA Y LA EFECTIVIDAD DE SU CONSOLIDACIÓN, MIDIENDO LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE OSCILACIÓN. Estudio experimental aplicado a la tabla de los artesanos de la iglesia de San Francisco, Quito Ecuador., 2009. http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/ar-carozzi_r/pdfAmont/ar-carozzi_r.pdf.
- [38] L.E. Contreras Paredes, Conservación de la cerámica arqueológica. Un caso particular: La vasija 11B. Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela, 2017. <http://www.redalyc.org/>.
- [39] J. Feijoo, R. Fort, L.S. Gomez-Villalba, M.E. Rabanal, L.M. Ottosen, Electroprecipitation of Magnesium and Calcium Compounds for Weathering Protection of Ornamental Rocks, *Cryst. Growth Des.* 20 (2020) 2337–2355. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01497>.
- [40] A. Gómez-Marfil, M.J. Varas-Muriel, Demanda Gold sandstone (Burgos): effect of consolidation and ageing tests on its petrographic and petrophysical properties, *Mater. Constr.* 73 (2023). <https://doi.org/10.3989/mc.2023.296622>.
- [41] I.G. y M. de España, Mapa geológico de España 1:50.000: Quintanar de la Sierra, IGME, n.d.
- [42] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, Electrokinetic treatment to increase bearing capacity and durability of a granite, *Mater. Struct.* 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1123-6>.
- [43] AENOR, UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total, (n.d.).
- [44] AENOR, UNE-EN 1925:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad, (n.d.).
- [45] J. Feijoo, L.M. Ottosen, J.S. Pozo-Antonio, Influence of the properties of granite and sandstone

- in the desalination process by electrokinetic technique, *Electrochim. Acta* 181 (2015) 280–287. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2015.06.006>.
- [46] E. Franzoni, State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry, *J. Cult. Herit.* 31 (2018) S3–S9. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2018.04.001>.
- [47] AENOR, UNE-EN 14579:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido, (n.d.).
- [48] R. Fort, B. Fernández-Revuelta, M.J. Varas, M. Álvarez De Buergo, M. Taborda-Duarte, Influence of anisotropy on the durability of Madrid-region Cretaceous dolostone exposed to salt crystallization processes, *Mater. Constr.* (2008). <https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i289-290.74>.
- [49] T. Lee, J. Lee, H. Choi, Assessment of Strength Development at Hardened Stage on High-Strength Concrete Using NDT, *Appl. Sci.* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10186261>.
- [50] E. Vasanelli, D. Colangiuli, A. Calia, M. Sileo, M.A. Aiello, Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone, *Ultrasonics* 60 (2015) 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.010>.
- [51] A. Hisashi, Y. Matsukura, Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67 (2008) 23–29. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0116-z>.
- [52] E. Santos De la Cruz, J. Yenque de Dios, R. L.O., Rosales U., Acerca del Ensayo de Dureza, *Ind. Data* 4 (2001) 73–80. <https://doi.org/10.15381/idata.v4i2.6768>.
- [53] J. Feijoo, R. Fort, L.S. Gomez-Villalba, M.E. Rabanal, L.M. Ottosen, Electroprecipitation of Magnesium and Calcium Compounds for Weathering Protection of Ornamental Rocks, *Cryst. Growth Des.* 20 (2020) 2337–2355. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01497>.
- [54] J. Feijoo, M.A. Alvarez-Feijoo, R. Fort, E. Arce, D. Ergenc, Effects of paraffin additives, as phase change materials, on the behavior of a traditional lime mortar, *Constr. Build. Mater.* 361 (2022) 129734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129734>.
- [55] AENOR, UNE-EN 12371:2011. Metodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la helacidad, (n.d.).
- [56] AENOR, UNE-EN 16140:2019. Métodos de ensayo para la piedra natural: Determinación de la sensibilidad a los cambios en la apariencia producida por ciclos térmicos, (n.d.) 4–21.
- [57] F. Systems, FLIR E85 - Advanced thermal camera, (n.d.). FLIR E85 Advanced Thermal Camera - Discontinued %7C Flir.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Este Trabajo de Fin de Grado no solo supone un avance técnico en el procesamiento de datos térmicos y del análisis de la degradación en los materiales pétreos, sino que también presenta diversos impactos de carácter transversal.

- Implicaciones ambientales

El estudio de la degradación por sales mediante termografía infrarroja contribuye a la sostenibilidad y conservación del patrimonio. El uso de técnicas de diagnóstico no destructivas permite detectar patologías de forma temprana, reduciendo intervenciones invasivas y el consumo de recursos. Así mismo, el análisis del efecto de sales como NaCl y Na₂SO₄ favorece la selección de materiales más duraderos, disminuyendo la huella de carbono. Además, la metodología desarrollada puede aplicarse al estudio de envolventes térmicas en edificación, mejorando la eficiencia energética.

- Implicaciones económicas

La implementación de los algoritmos y protocolos propuestos permite reducir costes de mantenimiento mediante el diagnóstico preventivo. El empleo de herramientas de uso público facilita el acceso a tecnologías avanzadas sin costes adicionales. Además, la conservación del patrimonio arquitectónico contribuye a su valorización económica, especialmente en el sector turístico, mientras que la automatización de los procesos, mejora la productividad en investigación y consultoría.

- Implicaciones sociales

Desde el punto de vista social, el trabajo contribuye a la seguridad pública al prevenir fallos estructurales en edificaciones. Además, favorece la preservación del patrimonio como elemento clave de la identidad cultural. Por ello, el uso de metodologías que pueden reproducirse, fomenta la investigación abierta y el desarrollo colaborativo en el ámbito académico.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El presente trabajo, centrado en un revestimiento de auto-reparación para materiales de construcción, genera implicaciones que trascienden el ámbito técnico, en línea con el Sello Internacional de Calidad EUR-ACE.

Desde la seguridad pública y la integridad estructural, la investigación permite prevenir fallos en los materiales, como degradación por sales o fisuras por choque térmico o hielo-deshielo, contribuyendo a la resiliencia de las infraestructuras y a la protección del personal. En términos de patrimonio cultural e identidad social, el estudio favorece la conservación de monumentos y edificaciones históricas, preservando su identidad y asegurando su disposición para futuras generaciones.

En el plano de la ética ambiental y la sostenibilidad, el aumento de durabilidad reduce la extracción de recursos y la huella de carbono, mientras que, el análisis del ciclo de vida, garantiza que el recubrimiento con el consolidante cumpla criterios de sostenibilidad. Por otra parte, en el ámbito de la responsabilidad profesional y la defensa, la investigación refuerza la protección de infraestructuras críticas en entornos estratégicos, optimizando la gestión de recursos públicos.

Por último, en relación con la integridad académica, el uso de herramientas, como en el caso de la Inteligencia Artificial Generativa, se han limitado al apoyo para la redacción y organización.

ANEXO III: DECLARACIÓN DEL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado se ha recurrido al uso de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa con la finalidad de optimizar la calidad de la redacción, así como de mejorar la coherencia, cohesión y precisión del lenguaje empleado a lo largo de la memoria del trabajo llevado a cabo. En concreto, dichas herramientas han sido utilizadas para perfeccionar la expresión escrita, elevar el nivel técnico y facilitar la adecuada exposición de conceptos complejos vinculados con la química y los ciclos realizados para cada ensayo.

Del mismo modo, la inteligencia artificial ha contribuido al proceso de búsqueda, selección y análisis de información, favoreciendo la identificación y organización de fuentes bibliográficas pertinentes para este trabajo. Este apoyo ha permitido una estructuración mejor organizada de los contenidos y un mayor grado de solidez en el desarrollo del marco teórico.

Conviene subrayar que la utilización de esta herramienta ha tenido un carácter estrictamente complementario y académico, constituyendo un recurso de apoyo en las tareas de redacción y gestión de la información. En ningún caso han sustituido el razonamiento crítico, la interpretación de los resultados ni la formulación de las conclusiones, siendo estas competencias únicamente responsabilidad del autor del trabajo.

ANEXO IV: EXPLICACIÓN CÓDIGO UTILIZADO EN GOOGLE COLAB

- **BLOQUE 1:** Configuración e Importación

Propósito: Este bloque inicial se encarga de montar tu Google Drive en el entorno de Colab. Esto es fundamental para que el notebook pueda acceder a los archivos que tengas guardados en tu Drive y guardar los resultados generados. Su funcionamiento detallado consiste en:

- *from google.colab import drive*: Importa la función drive de la librería *google.colab*, necesaria para interactuar con Google Drive.
- *drive.mount('/content/drive')*: Ejecuta el proceso de montaje. Al correr esta línea, Colab te pedirá que autorices el acceso a tu Google Drive a través de una ventana emergente o un enlace. Una vez autorizado, tu Drive estará disponible en la ruta */content/drive/* dentro del entorno de Colab.
- *print("✅ Drive montado correctamente.")*: Confirma que el montaje se ha realizado con éxito.

- **BLOQUE 2:** Procesar imágenes

Este es el bloque principal para transformar tus datos térmicos crudos (en formato CSV) en imágenes individuales y en una matriz de datos procesada lista para el análisis. Se encarga de:

- Leer un archivo CSV de datos térmicos apilados.
- Desapilar las imágenes basándose en la resolución de la cámara.
- Generar imágenes JPG visuales para cada *frame* extraído.
- Crear un nuevo CSV con los datos de temperatura organizados en columnas por tiempo, donde cada fila es un píxel.

Su funcionamiento detallado consiste en:

- Importaciones: Carga librerías como *os* (para manejo de rutas y carpetas), *numpy* (para operaciones numéricas eficientes), *pandas* (para manejo de *DataFrames*, ideal para CSVs), *matplotlib.pyplot* (para guardar las imágenes) y, *tqdm* (para mostrar barras de progreso).
- Función *procesar_csv_termico()*: Contiene toda la lógica del procesamiento.
 - Configuración del Proceso:
 - Pide al usuario la ruta completa del *archivo.csv* de origen en Drive. Limpia la ruta de posibles comillas.
 - Verifica si el archivo existe. Si no, muestra un error.
 - Datos de la Imagen (Parámetros Cruciales):
 - Pregunta por la resolución de una sola imagen (filas y columnas), el FPS de la grabación y el intervalo deseado en segundos para guardar las imágenes y datos. Estos valores son críticos para desapilar correctamente el CSV.
 - Realiza una validación básica para asegurar que se introducen números.
 - Preparación de Carpetas:
 - Crea dos carpetas nuevas en la misma ubicación del CSV original: una para las imágenes JPG (*_IMAGENES*) y otra para el CSV final procesado (*_RESULTADOS*).
 - Carga de Datos:

- Lee el archivo CSV de entrada usando *pd.read_csv()*. Se especifica *sep=';'*, *skiprows=4*, *header=None*, *encoding='utf-8-sig'* y, *decimal=''* para manejar formatos comunes de CSV térmicos.
- Elimina la primera columna: Una modificación específica solicitada para este tipo de CSV.
- Calcula el *total_filas_csv* y *total_cols_csv*.
- Verificación de Integridad: Compara el número de columnas del CSV con el *cols_img* proporcionado por el usuario, emitiendo una advertencia si no coinciden.
- Calcula *total_frames_encontrados* (cuántas imágenes están apiladas verticalmente).
- Calcula *frames_a_saltar*: Determina cuántos *frames* originales se deben saltar para guardar una imagen según el *fps* y el *segundos_intervalo* deseado.
- Procesamiento (Bucle principal):
 - Itera a través de los *frames* detectados, saltando según el *frames_a_saltar* calculado (*tqdm* añade una barra de progreso).
 - *tiempo_actual*: Calcula el tiempo en minutos para nombrar los archivos y columnas.
 - *start_row* y *end_row*: Define qué filas del CSV corresponden a la imagen actual.
 - *img_data*: Extrae el bloque de datos de la imagen actual y lo convierte a un array NumPy de tipo *float*.
 - Guardar como Imagen Visual (.jpg):
 - Normalización: Los datos de temperatura (ej. en °C) se normalizan a un rango de 0-255. Esto es necesario para poder visualizar y guardar la imagen como un JPG.
 - *plt.imsave()*: Guarda la imagen normalizada en la carpeta *_IMAGENES* con un nombre que incluye el índice del *frame* y el tiempo. Se usa el *colormap 'inferno'* (adecuado para termografía).
 - Procesar para Matriz Final (Columnar):
 - *img_data.flatten()*: Convierte la matriz 2D de la imagen en un array 1D. Cada elemento de este array representa un píxel de la imagen en un momento dado.
 - *matriz_final_columnas.append(columna_datos)*: Cada array 1D (una imagen aplanada) se añade a una lista, que luego se convertirá en una columna del CSV final.
 - *encabezados_tiempo.append(f't_{tiempo_actual/60}min')*: Se guarda el tiempo para usarlo como encabezado de columna en el CSV final.
- Guardar CSV Final:
 - *np.column_stack()*: Une todos los arrays 1D de *matriz_final_columnas* para formar una única matriz NumPy donde cada array original se convierte en una columna.
 - *pd.DataFrame()*: Convierte esta matriz NumPy en un *DataFrame* de Pandas, asignando los *encabezados_tiempo*.
 - *df_resultado.to_csv()*: Guarda el *DataFrame* final en la carpeta *_RESULTADOS*. Este CSV tendrá una fila por cada píxel de la imagen

y una columna por cada intervalo de tiempo procesado, conteniendo la temperatura de ese píxel en ese momento.

- **BLOQUE 3:** Representación gráficas temperatura frente al tiempo.

Este bloque toma los archivos CSV generados por el "Bloque 2" (o cualquier otro CSV con el mismo formato de matriz de píxeles vs. tiempo), calcula estadísticas clave (media, desviación estándar) de la temperatura a lo largo del tiempo, y genera varias gráficas que muestran la evolución térmica de las muestras, así como un archivo CSV con todas las estadísticas detalladas. Su funcionamiento detallado consiste en:

- Variables Globales: Se definen variables globales (*ruta_carpeta*, *archivos_csv*, etc.) para que puedan ser accesibles y compartidas con el Bloque 4.
- Función *analizar_y_graficar_matrices()*:
 - Carga y Preparación:
 - Ruta de Entrada: Solicita al usuario la ruta de la carpeta donde se encuentran los archivos CSV de matrices procesadas (los que terminan con *_PROCESADO_MATRIZ.csv*).
 - Detección de Archivos: Escanea la carpeta para encontrar todos los archivos *.csv* relevantes.
 - Filtrado por Intervalo de Tiempo:
 - Permite al usuario especificar un rango de tiempo (mínimo y máximo en minutos) para centrar el análisis solo en una parte específica de la evolución térmica. Este filtro se aplica a todas las gráficas y cálculos posteriores.
 - Creación de Carpetas de Salida:
 - Crea una nueva carpeta *GRAFICAS_Y_CSV_EVOLUCION* (con un sufijo si se aplicó un filtro de tiempo) dentro de la ruta de entrada para guardar todas las gráficas y el CSV de estadísticas.
 - Asignación de Colores Personalizados:
 - *color_map_by_prefix*: Un diccionario que asigna colores específicos (negro, gris, rojo, rosa) a los archivos CSV cuya primera letra es 'A', 'B', 'C' o 'D', respectivamente. Esto permite identificar fácilmente las series en las gráficas.
 - *assigned_colors_for_plots*: Itera sobre los archivos CSV detectados y asigna un color de *color_map_by_prefix* si la primera letra coincide. Para cualquier otro archivo, se usa un color de una paleta por defecto (*plt.cm.tab10*).
 - Procesamiento y Recolección de Datos (Bucle Principal):
 - Para cada archivo CSV encontrado:
 - Lee el archivo CSV en un *DataFrame*.
 - Extrae los valores de tiempo de los nombres de las columnas (ej. *t_0.0min* se convierte en 0.0).
 - Aplica el filtro de tiempo si el usuario lo especificó, manteniendo solo las columnas dentro del rango.
 - Calcula la media (*df.mean(axis=0)*) y la desviación estándar (*df.std(axis=0)*) de las temperaturas para cada columna (es decir, para cada instante de tiempo).
 - Almacena estos datos (nombre del archivo, tiempos, media, desviación y el color asignado) en *plot_data_list* para su posterior graficado.
 - Crea un *DataFrame stats_totales* con las medias, desviaciones y los límites superior/inferior (media $\pm$ desviación) para cada archivo y tiempo. Esta información se usará para el CSV de estadísticas final.
 - Generación de Gráficas (*guardar_grafica()*):

- Esta función auxiliar crea diferentes tipos de gráficas basadas en los datos recolectados:
 - *'comparativa'*: Muestra la evolución de la temperatura media para cada archivo, junto con un área sombreada que representa la desviación estándar (intervalo de confianza).
 - *'media'*: Solo muestra la evolución de la temperatura media.
 - *'mas_desv'*: Muestra la media más la desviación estándar.
 - *'menos_desv'*: Muestra la media menos la desviación estándar.
- Cada gráfica tiene un título, etiquetas para los ejes, una leyenda y se guarda como un archivo PNG de alta resolución en la carpeta *folder_graficas*.
- Guardado de CSV de Estadísticas:
 - Si se procesaron datos, combina todos los *DataFrames* de *stats_totales* en un único *DataFrame* (*df_final_stats*) usando *pd.merge()*.
 - Guarda este *DataFrame* combinado como *Estadisticas_Evolucion_Detallada.csv* en la carpeta de resultados, utilizando ; como separador y codificación *utf-8-sig* para compatibilidad.