



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de la penetración de campo eléctrico en
materiales de construcción*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Daniel Bartolomé Gil

DIRECTORES: Jorge Feijoo Conde

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación de la penetración del campo eléctrico en
materiales de construcción*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado analiza la penetración y distribución del campo eléctrico de corriente continua en materiales pétreos. El estudio se motiva por la degradación que sufren infraestructuras navales estratégicas, como los arsenales de Ferrol y La Carraca, debido a la humedad y la agresiva cristalización de sales en el interior de los poros y al desconocimiento existente en la profundidad de penetración del campo. La investigación experimental empleó muros de granito y calcarenita, materiales con distinta porosidad y origen geológico. A partir de los resultados obtenidos con dos montajes experimentales, uno de distribución de caídas de potencial y otro de movilidad iónica, y simulaciones en MATLAB, se evaluó cómo influye la distancia entre electrodos, el voltaje aplicado y el tipo de material en la profundidad efectiva del tratamiento. Los resultados demuestran que el voltaje no influye en la penetración del campo; en función de la distancia entre electrodos (d) el campo penetra en torno a $0,52 \cdot d$ en el granito y $0,35 \cdot d$ en la calcarenita. Esto se debe a que la conectividad de la red porosa y la forma del poro del material influye más que la porosidad accesible y la permitividad eléctrica.

PALABRAS CLAVE

Electrocinética, corriente continua, penetración, granito, calcarenita

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Jorge Feijoo, por su disposición, su paciencia y por guiar este trabajo con rigor y sabiduría. Sus correcciones y consejos han sido fundamentales para llevar este proyecto a buen puerto.

A mi familia, por ser mi apoyo incondicional no solo en esta etapa, sino en cada paso de mi vida. Gracias por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba, y por recordarme siempre la importancia del esfuerzo y la constancia.

Finalmente, a Carmen. Gracias por estar a mi lado en las noches de insomnio y por tu paciencia infinita durante los meses de estrés. Sin tu apoyo, este camino habría sido mucho más difícil.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	9
1.3 Organización de la memoria	10
2 Estado del arte	11
2.1 Patologías en los materiales de construcción	11
2.1.1 Generalidades	11
2.1.2 Patologías físicas	12
2.1.3 Patologías mecánicas	12
2.1.4 Patologías químicas	13
2.1.5 Patologías electroquímicas	13
2.1.6 Patologías biológicas	13
2.2 El impacto de las sales solubles en las edificaciones.....	14
2.2.1 Edificaciones de la Armada	14
2.2.2 La cristalización de las sales solubles.....	14
2.2.3 Metodologías para combatir las sales	15
2.2.4 Técnicas de desalación	16
2.3 Electrocínética. Fundamentos y aplicaciones	19
2.3.1 Transporte iónico en medios porosos	19
2.3.2 Comportamiento eléctrico de materiales porosos y distribución de campo aplicado.....	19
2.3.3 Atenuación y profundidad efectiva del campo eléctrico	20
2.3.4 Desalación electrocinética	20
2.3.5 Consolidación electrocinética	22
2.4 Tomografía eléctrica	23
2.5 Implicaciones experimentales y justificación del estudio de penetración de campo eléctrico	27
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Materiales empleados.....	29
3.2 Preparación de los muros	32
3.3 Ensayos realizados	34

3.3.1 Material empleado	34
3.3.2 Montaje 1. Caída de potencial con tres electrodos	34
3.3.3 Montaje 2. Movilización iónica	36
3.4 Evaluación de la eficacia en los montajes planteados	38
3.4.1 Montaje 1. Caída de potencial con tres electrodos	38
3.4.2 Montaje 2. Movilización iónica	39
3.5 Simulación de la distribución y penetrabilidad del campo eléctrico	39
4 Resultados y Discusión	41
4.1 Propiedades de los materiales	41
4.2 Mapeo de humedad y estado hídrico previo al ensayo	42
4.3 Caída de potencial con tres electrodos (montaje 1)	44
4.4 Movilización iónica (montaje 2)	48
4.5 Simulaciones realizadas con Matlab	49
5 Conclusiones y líneas futuras	53
5.1 Conclusiones	53
5.2 Líneas futuras	53
6 Bibliografía	55
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	59
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	60
Anexo III: Código empleado en Matlab	61
Anexo IV: Uso ético y responsable de la inteligencia artificial	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Fotografías de diferentes patologías asociadas a la acción de sales solubles a lo largo de la Escuela Naval Militar. Imagen extraída de [3]	6
Figura 1-2 Colocación de electrodos sobre la misma superficie de la pared (a) y esquema donde se muestra la profundidad de penetración del campo (b). Imagen extraída de [24].....	8
Figura 2-1 Resumen de las patologías constructivas. Generada por Gemini.	12
Figura 2-2 Imagen explicativa del proceso de cristalización de las sales. Generada mediante Gemini.	15
Figura 2-3 Imagen explicativa del proceso de desalación mediante baños de inmersión. Generada por Gemini.	16
Figura 2-4 Imagen explicativa del proceso de desalación por cataplasmas. Generada por Gemini.	17
Figura 2-5 Imagen comparativa entre los procesos de desalación electrocinética convencional y desalación electrocinética empleando un campo eléctrico. Generado por Gemini.....	18
Figura 2-6 Explicación gráfica del proceso de transporte iónico. Generada por ChatGPT.	19
Figura 2-7 Esquema de dos montajes de desalación, uno con un electrodo por compartimento (imagen de la izquierda) y otro con dos electrodos en el compartimento anódico (imagen de la derecha). Imagen extraída de [43].	21
Figura 2-8 Explicación del proceso de consolidación electrocinética en dos etapas. Los puntos rojos son cationes, los azules aniones y las zonas verdes representan el compuesto precipitado. Imagen extraída de [44].	23
Figura 2-9 Imagen resumen del procedimiento de tomografía. Imagen generada con ChatGPT.	24
Figura 2-10 Ejemplo de penetración de la corriente en el terreno con un dispositivo dipolo-dipolo. Imagen extraída de [53].	25
Figura 2-11 Ejemplo de perfil de resistividad eléctrica de un material de construcción. Imagen extraída de [54].	26
Figura 3-1 Granito (izquierda) y calcarenita (derecha) seleccionados para este proyecto.....	29
Figura 3-2 Muro de calcarenita empleado en el desarrollo del trabajo. Elaboración propia.....	31
Figura 3-3 Muro de granito empleado en el desarrollo del trabajo. Elaboración propia.....	32
Figura 3-4 Imagen de ambos muros mientras se humedecían tanto por la parte superior con los trapos como con el agua de la parte inferior. Elaboración propia.	32
Figura 3-5 Imagen del protímetro empleado durante la medición de humedad. Elaboración propia.	33
Figura 3-6 Muro de calcarenita en los que se realizan los ensayos con un ejemplo de la retícula en la que se realizan las mediciones con el protímetro, además de la distribución del eje xy que se usa como referencia. Elaboración propia.	34
Figura 3-7 Ensayo de distribución de potencial con los electrodos separados 20 cm en el muro de calcarenita. Elaboración propia.....	35
Figura 3-8 Colocación del electrodo E3 durante ensayo de distribución de potencial en la cara opuesta a los electrodos E1 y E2. Elaboración propia.	35

Figura 3-9 Ensayo con la primera muestra con una separación de 20 cm en el muro de calcarenita. Elaboración propia.	37
Figura 3-10 Colocación de la papeta de celulosa y sales colocada en la cara contraria a los electrodos durante los ensayos. Elaboración propia.	37
Figura 4-1 Mapa de distribución de humedad de la cara norte del muro de calcarenita. La flecha indica el lugar de colocación del tercer electrodo.	43
Figura 4-2 Mapa de distribución de humedad en la cara sur del muro de calcarenita. Se representan las posiciones de los electrodos al inicio de los ensayos, posteriormente se irá ampliando la separación.	43
Figura 4-3 Mapa de distribución de humedad de la cara norte del muro de granito. La flecha indica el lugar de colocación del tercer electrodo.	44
Figura 4-4 Mapa de distribución de humedad en la cara sur del muro de granito. Se representan las posiciones de los electrodos al inicio de los ensayos, posteriormente se irá ampliando la separación.	44
Figura 4-5 Evolución de los parámetros eléctricos de ambos muros a distintas distancias y voltajes aplicados.	45
Figura 4-6 Evolución de la resistividad eléctrica en función de la distancia entre electrodos y voltaje aplicado.	45
Figura 4-7 Contenido de Cl^- que permanece en la papeta después de las 2 h de ensayo a 25 V variando la distancia entre electrodos.	48
Figura 4-8 Magnitud de densidad de corriente (izquierda) y distribución de potencial (derecha) de la muestra de granito a 10 V y 20 V con una separación de electrodos de 20 cm. Las coordenadas x e y representan las dimensiones del muro visto en planta.	50
Figura 4-9 Magnitud de densidad de corriente (izquierda) y distribución de potencial (derecha) de la muestra de calcarenita a 10 V y 20 V con una separación de electrodos de 20 cm. Las coordenadas x e y representan las dimensiones del muro visto en planta.	50
Figura 5-1 Modificación propuesta para el ensayo de distribución de potencial con los electrodos separados 20 cm en el muro de calcarenita. Elaboración propia.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resumen de las características de las distintas disposiciones empleadas en tomografía.	27
Tabla 3-1 Permitividad eléctrica de distintos minerales y medios.	30
Tabla 3-2 Relación entre la distancia entre electrodos con el factor geométrico.	39
Tabla 3-3 Tabla en la que se incluyen aquellos parámetros que deberán cambiarse en el código de MATLAB.	40
Tabla 4-1 Composición mineralógica y porosidad de los materiales empleados.	41
Tabla 4-2 Comparativa de los modelos CRIM y Lichtenecker en estado seco y saturado en agua.	42
Tabla 4-3 Caídas de potencial registradas entre los electrodos del montaje. Se muestra además el ratio existente entre las caídas de los electrodos móviles aplicados sobre una misma superficie y el electrodo fijo situado en la cara opuesta.	46
Tabla 4-4 Campo eléctrico y densidad de carga, tanto para material seco como para material saturado.	47
Tabla 4-5 Coeficiente de penetración P en cada uno de los casos ensayados.	47
Tabla 4-6 Evolución de la intensidad y la caída de potencial relacionado en función del tiempo. Se muestra además el valor de la resistencia.	49
Tabla 4-7 Datos de densidad de corriente y profundidad de penetración, a partir de la cual el campo se atenúa en un 50%, estimados mediante MATLAB.	51
Tabla 4-8 Datos de densidad de corriente y profundidad de penetración, a partir de la cual el campo se atenúa en un 50%, estimados mediante MATLAB.	51

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Las infraestructuras localizadas en entornos marinos se enfrentan a un nivel de exigencia muy alto desde el punto de vista de la durabilidad de sus materiales y del mantenimiento. La combinación de la elevada humedad relativa, la presencia constante de espray salino, variaciones térmicas y ciclos repetidos en los que los materiales se humedecen y se secan, genera un entorno particularmente agresivo para los materiales de construcción [1,2]. En estas condiciones, tanto las estructuras históricas ejecutadas en piedra natural y morteros tradicionales como las infraestructuras modernas de hormigón armado y acero estructural experimentan procesos de degradación progresiva que comprometen su funcionalidad, su estabilidad estructural y su valor patrimonial.

En el ámbito de las infraestructuras navales esta problemática adquiere una relevancia estratégica. Arsenales, bases navales, diques secos, muelles y edificaciones auxiliares constituyen activos fundamentales para la operatividad de la Armada. Muchos de estos, como los arsenales históricos de Ferrol o La Carraca, fueron construidos en mampostería de granito, calizas locales o morteros de cal, materiales cuya durabilidad depende en gran medida de su comportamiento frente a la humedad y a la presencia de sales solubles. En edificaciones más recientes, como determinadas instalaciones portuarias construidas en el siglo XX, el empleo de hormigón armado introduce además fenómenos electroquímicos como la corrosión inducida por los cloruros.

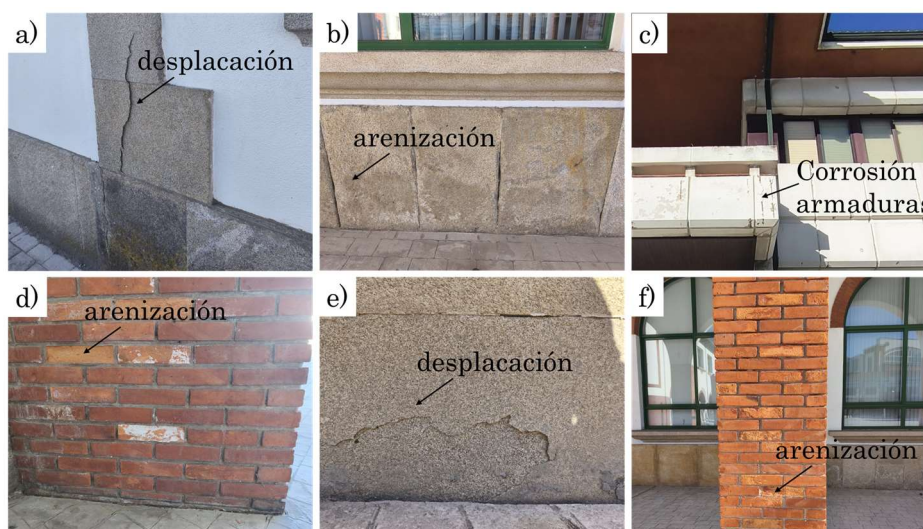


Figura 1-1 Fotografías de diferentes patologías asociadas a la acción de sales solubles a lo largo de la Escuela Naval Militar. Imagen extraída de [3]

Entre los distintos mecanismos de alteración que afectan a los materiales en estos entornos, la cristalización de sales solubles en el interior de los poros constituye uno de los procesos más agresivos y complejos. Cuando una disolución salina presente en el interior del material alcanza un estado de sobresaturación, ya sea por evaporación del agua o por cambios en la humedad relativa, se produce la nucleación y crecimiento cristalino generando presiones internas, conocidas como presiones de cristalización, que pueden superar la resistencia mecánica a tracción del material, provocando fisuración, disgregación granular, alveolización y pérdida progresiva de cohesión [4–6].

La agresividad de este fenómeno depende de múltiples factores: el tipo de sal presente, su grado de saturación, la existencia de fases hidratadas con cambios volumétricos significativos, la distribución de tamaños de poro y las condiciones ambientales externas [1,7]. Las fluctuaciones de humedad relativa desempeñan un papel determinante, ya que inducen ciclos repetidos de disolución y recristalización. Estos ciclos generan expansiones y contracciones sucesivas que producen fatiga en la microestructura del material, agravando el daño con el paso del tiempo. La previsión de escenarios climáticos con mayores oscilaciones ambientales sugiere que estos procesos podrían intensificarse en el futuro, aumentando la vulnerabilidad de infraestructuras expuestas [8,9].

Tradicionalmente, la intervención frente a la presencia de sales en materiales de construcción se ha basado en tres grandes estrategias: el control ambiental para reducir los ciclos de cristalización, la aplicación de técnicas de desalación para extraer las sales existentes y la utilización de productos consolidantes o hidrofugantes para modificar la porosidad accesible del material [1]. Entre las técnicas de desalación más empleadas destacan los baños de inmersión, la aplicación de papetas o cataplasmas y los morteros de sacrificio. Sin embargo, estas metodologías presentan limitaciones significativas:

- Los baños de inmersión se basan exclusivamente en procesos difusivos gobernados por gradientes de concentración [1,10]. La pieza por desalar se somete a baños periódicos, estáticos o dinámicos, con agua de baja salinidad, como puede ser el agua ultrapura o el agua destilada. El método presenta una elevada efectividad, sin embargo, presenta como limitaciones que es un proceso lento y que está restringido a elementos que sean desmontables o de bajo tamaño.

- La aplicación de papetas o cataplasmas se utilizan principalmente en restauraciones realizadas in situ, combinan procesos de difusión (debido a la existencia de gradientes de concentraciones) y de advección (debido al movimiento de agua por transporte capilar) [11,12]. Este método presenta como principal inconveniente la profundidad a la que es capaz de llegar, ya que únicamente se consiguen extraer las sales en los presentes en los primeros centímetros de profundidad (en torno a 4 cm), quedando el problema latente dentro del material, lo que conlleva un retorno del problema en un breve periodo de tiempo [13].

- Los morteros de sacrificio, por su parte, actúan como sistemas tampón diseñados para favorecer la cristalización preferente en un material reemplazable, sin eliminar necesariamente las sales presentes en el núcleo del elemento original. Presenta como inconveniente que es necesario reemplazarlos cada cierto tiempo para que no se conviertan en un nuevo foco de sales que puedan retornar al elemento a proteger [14].

En todos los casos, el transporte iónico implicado en la extracción de sales solubles depende de mecanismos difusivos o advectivos intrínsecamente lentos y condicionados por la evaporación superficial [1,7,15].

En este contexto, el desarrollo de técnicas electrocinéticas ha supuesto un cambio de paradigma en la conservación de materiales afectados por sales. La aplicación de un campo eléctrico continuo a través de un medio poroso saturado induce fenómenos de electroósmosis y electromigración que permiten movilizar el agua y los iones disueltos en una dirección controlada [16,17]. Desde el punto de vista físico, el transporte iónico en estos sistemas puede describirse mediante la ecuación de Nernst-Planck

(ecuación 1), en la que intervienen simultáneamente la difusión, la migración eléctrica o electromigración y la advección [18].

$$J_i(x) = -D_i \frac{\delta C_i(x)}{\delta x} - \frac{|z_i|F}{RT} D_i C_i \frac{\delta \phi(x)}{\delta x} + C_i \gamma(x) \quad (\text{ecuación 1})$$

Siendo $J_i(x)$ el flujo de las especies i expresado en ($\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) a la distancia x desde una superficie normal a la dirección del flujo, D_i el coeficiente de difusión de la especie i ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), $\delta C_i / \delta x$ el gradiente de concentración a la distancia x , $\delta \phi(x) / \delta x$ el gradiente de potencial, $|z_i|$ la carga de la especie i en (eq mol^{-1}), C_i la concentración de la especie i en (mol m^{-3}), $\gamma(x)$ la velocidad a la cual se mueve un elemento en la dirección x (m s^{-1}), F la constante de Faraday (C eq^{-1}), R la constante de los gases ideales ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) y T la temperatura en (K).

Cuando se aplica un campo eléctrico externo suficientemente intenso, la electromigración se convierte en el principal mecanismo de transporte iónico, estimándose que la movilidad iónica es aproximadamente 40 veces más alta por voltio aplicado que el coeficiente de difusión del mismo anión [19].

Diversos estudios experimentales han demostrado que la desalación electrocinética puede alcanzar profundidades de actuación significativamente superiores a las obtenidas mediante técnicas tradicionales, incluso en materiales de porosidad fina [15,20,21]. Asimismo, la presencia de humedad, lejos de constituir un obstáculo, favorece la continuidad eléctrica del medio y, por tanto, la eficacia del transporte iónico. Estas características convierten a la electrocinética en una herramienta especialmente prometedora para la intervención en muros de gran espesor o en soportes pétreos históricos sometidos a ambientes marinos [22,23].

No obstante, a pesar de los resultados positivos obtenidos en numerosos trabajos experimentales, existe una cuestión fundamental que no ha sido abordada, cuando los electrodos se colocan sobre una misma superficie (Figura 1-2), como es la profundidad de penetración del campo eléctrico y su distribución real en el interior del material. Este parámetro, que cuando se aplica corriente alterna se estima en un quinto de la distancia entre electrodos, depende de varios factores tales como: la intensidad y continuidad del campo aplicado (las cuales están condicionadas por la conductividad eléctrica efectiva del medio poroso), el grado de saturación en agua del material, la concentración salina presente y la conectividad de la red porosa [18].



Figura 1-2 Colocación de electrodos sobre la misma superficie de la pared (a) y esquema donde se muestra la profundidad de penetración del campo (b). Imagen extraída de [24].

En materiales como el granito, característicos de numerosas infraestructuras navales, la porosidad total es relativamente baja, pero la presencia de microfisuras y la conectividad capilar permiten la propagación de la fase líquida y del campo eléctrico. Sin embargo, la heterogeneidad interna del material

puede generar variaciones locales de resistividad que provoquen gradientes de potencial no uniformes. En elementos de gran espesor, la caída progresiva de potencial puede conducir a fenómeno de atenuación del campo eléctrico, reduciendo la velocidad de migración iónica en zonas alejadas de los electrodos limitando la profundidad efectiva de actuación.

La mayoría de los estudios publicados se centran en evaluar la reducción final de concentración salina tras el tratamiento, pero no analizan de forma directa la evolución espacial del potencial eléctrico ni la propagación real del campo en el interior del elemento tratado, especialmente cuando se aplica un campo de corriente continua como es el caso de las aplicaciones electrocinéticas en la intervención de materiales de construcción [22,23,25]. Esta ausencia de caracterización experimental dificulta la optimización de configuraciones de electrodos, intensidades aplicadas y tiempos de tratamiento de estructuras reales.

Por tanto, resulta necesario abordar el problema desde una perspectiva más fundamental, centrada no únicamente en el resultado final de la extracción salina, sino en el comportamiento físico del campo eléctrico en el interior del material. La determinación experimental de la penetración y atenuación de este permitirá establecer criterios objetivos sobre la viabilidad del tratamiento en función del espesor del material, la humedad presente y las propiedades eléctricas del soporte.

En este marco, el presente Trabajo de Fin de Grado se orienta al estudio de la penetración de un campo eléctrico de corriente continua aplicado en materiales de construcción, con especial atención a aquellos empleados en infraestructuras situadas en entornos marinos. El uso de la corriente continua es fundamental en este proceso, ya que establece el gradiente de potencial necesario para forzar la electromigración unidireccional de los iones hacia electrodos externos. El enfoque adoptado pretende complementar los conocimientos existentes sobre la movilidad iónica bajo la influencia de un campo eléctrico (aplicable tanto a desalación como a consolidación electrocinética), analizando cómo la polaridad constante y la intensidad del campo se distribuyen en la matriz porosa. A través de este análisis, se busca aportar una base experimental que contribuya a optimizar futuras aplicaciones en estructuras reales permitiendo una gestión más eficiente y técnica de la durabilidad del patrimonio construido frente a la agresividad del medio marino.

1.2 Objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal determinar la penetración y distribución del campo eléctrico aplicado en dos materiales porosos de naturaleza pétreo en función de la intensidad aplicada, distancia entre electrodos y propiedades del material. Para ello, se emplearán dos materiales con características estructurales distintas (diferente tipo de porosidad y de composición mineralógica).

Como objetivos secundarios se establecen los siguientes:

1. Determinar la permitividad eléctrica de cada uno de los materiales empleados.
2. Analizar posibles configuraciones que permitan evaluar de manera experimental el objetivo principal.
3. Modelización del proceso mediante Matlab.

La motivación de este estudio se fundamenta en la necesidad de comprender en profundidad los mecanismos físicos que gobiernan la penetración del campo eléctrico en el interior de materiales pétreos. Este conocimiento resulta esencial para optimizar la eficacia de las técnicas electrocinéticas empleadas en la eliminación de sales, las cuales constituyen una de las principales causas de deterioro de infraestructuras históricas portuarias.

1.3 Organización de la memoria

La memoria se estructura en cinco capítulos principales.

El Capítulo 1 tiene como objetivo la contextualización del trabajo, en él se exponen motivaciones y se establecen los objetivos del estudio.

El Capítulo 2 cubre el estado del arte el cual aborda las patologías asociadas a la presencia de sales, las metodologías tradicionales de desalación, los fundamentos fisicomatemáticos del transporte iónico en medios porosos y las bases de la desalación y consolidación electrocinética.

En el Capítulo 3 describimos el desarrollo experimental del trabajo, incluyendo la metodología empleada, la configuración del sistema eléctrico, materiales utilizados y los procesos de medición.

En el Capítulo 4 se recogen los resultados obtenidos y se evalúa la distribución del campo eléctrico y su relación con los parámetros físicos del material.

Por último, el Capítulo 5 trata de las conclusiones del estudio y plantea posibles líneas futuras de investigación orientadas a la mejora de los tratamientos electrocinéticos en estructuras reales.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo desarrollaremos los diferentes temas que en su conjunto conformarán este trabajo de fin de grado, las patologías que afectan a los materiales de construcción, cuáles de ellas se producen en aquellos ambientes salinos, cómo podemos detectar y reducir los efectos negativos que estas patologías causan en los materiales de construcción.

2.1 Patologías en los materiales de construcción

2.1.1 Generalidades

Las alteraciones en edificaciones e infraestructuras, comúnmente denominadas patologías constructivas, engloban el conjunto de daños y procesos de degradación que pueden afectar a una obra como consecuencia de deficiencias en el diseño, de una selección inadecuada de materiales o de problemas asociados al comportamiento estructural. Asimismo, incluyen los deterioros producidos por la acción de agentes externos, así como el desgaste progresivo derivado del uso, de la exposición ambiental y del paso del tiempo. Estos procesos no solo comprometen la seguridad, la funcionalidad y la durabilidad de las construcciones, sino que también generan un impacto económico significativo, al incrementar los costes de mantenimiento preventivo y, en casos más severos, exigir intervenciones correctivas prematuras.

El análisis y control de las causas que originan estas patologías deben abordarse desde las fases iniciales de concepción y diseño del proyecto, con el objetivo de garantizar una calidad constructiva adecuada de la edificación o infraestructura. Este planteamiento, complementado con una estrategia de mantenimiento preventivo adecuada, permite prolongar la vida útil del bien construido y minimizar los costes asociados a reparaciones tempranas. Atendiendo a la bibliografía técnica y científica, las patologías más frecuentes en edificaciones pueden clasificarse en los siguientes grupos [1,26,27].



Figura 2-1 Resumen de las patologías constructivas. Generada por Gemini.

2.1.2 Patologías físicas

Las patologías físicas se manifiestan mediante fenómenos relacionados con la presencia de humedad, la erosión física, la meteorización superficial y la acción de las sales solubles. En la mayoría de los casos, este tipo de patologías está directamente relacionado con la pérdida de material.

La humedad puede originarse de distintos mecanismos. Entre ellos se encuentran la infiltración directa del agua, como ocurre en los procesos de ascenso capilar a través de muros o fábricas porosas y de suelos en contacto con el terreno; las filtraciones, entendidas como la entrada masiva de agua desde el exterior; las roturas o defectos en las instalaciones; y los fenómenos de condensación. En este último caso, la humedad puede proceder tanto del ambiente interior, debido a una ventilación insuficiente, la presencia de puentes térmicos o superficies mal aisladas, como del agua incorporada durante la ejecución de la obra que no fue eliminada correctamente durante el proceso de secado [28]. La entrada de agua suele llevar asociada la entrada de otros agentes como las sales solubles, las cuales al cristalizar en el interior de los poros ocasionan presiones contra las paredes de estos que pueden superar la resistencia mecánica del material, provocando fisuración, disgregación y pérdida de material (este aspecto se comentará más en detalle en apartados posteriores).

2.1.3 Patologías mecánicas

Las patologías mecánicas comprenden aquellas alteraciones que se manifiestan como deformaciones, agrietamientos, fisuras, procesos de erosión mecánica o desprendimientos de elementos constructivos o estructurales. Su origen suele estar asociado a la acción de cargas y sobrecargas no previstas en el proyecto, al aumento del efecto de esbeltez de los elementos, a fallos en la sustentación o en el sistema estructural, o a los movimientos de dilatación y retracción de los materiales. Asimismo, la acción del viento, el desgaste derivado del uso continuo de la estructura o una ejecución deficiente de la obra pueden favorecer significativamente la aparición y la progresión de este tipo de patologías.

Como consecuencia de estas alteraciones, se forman grietas y fisuras en los elementos constructivos. Las grietas se definen como aberturas que atraviesan por completo el espesor del

elemento, mientras que las fisuras son discontinuidades superficiales que no lo atraviesan. En función de su origen, estas manifestaciones presentan distintas características geométricas y comportamientos evolutivos, pudiendo clasificarse en patologías de carácter intrínseco, inherentes al propio proceso constructivo o al comportamiento del material, y en patologías de carácter extrínseco, provocadas por acciones externas o por sollicitaciones no contempladas en el proyecto.

El origen de grietas y fisuras suele estar relacionado con movimientos del terreno, fallos en los cimientos o en la estructura del edificio [1]. Los cimientos constituyen la parte de la edificación encargada de recibir los esfuerzos de la estructura y transmitirlos al terreno. Para evitar daños, las cargas transmitidas deben ser inferiores a la capacidad portante del suelo y las deformaciones inducidas deben ser compatibles con la deformabilidad de la estructura, los sistemas de cerramiento y los revestimientos. Un desequilibrio en este aspecto suele causar daños graves en los edificios, por lo que la legislación obliga a realizar estudios geotécnicos para el cálculo estructural de las edificaciones.

2.1.4 Patologías químicas

Las patologías químicas se caracterizan por procesos de degradación química de los materiales constructivos, tales como la disgregación o disolución del material, la oxidación, la hidratación, la combustión localizada, las deformaciones inducidas por reacciones químicas y los fenómenos de meteorización. Entre los agentes responsables de estas alteraciones se encuentran los contaminantes atmosféricos, la presencia y circulación de agua, los procesos de combustión y la exposición a temperaturas y condiciones ambientales extremas.

Estos mecanismos, de naturaleza progresiva, alteran la estabilidad, la cohesión y las propiedades fisicoquímicas de los materiales, comprometiendo su integridad estructural y funcional a lo largo del tiempo.

2.1.5 Patologías electroquímicas

La corrosión constituye la manifestación más característica de las patologías electroquímicas. Se trata de un proceso de degradación de los materiales metálicos que se desarrolla preferentemente en presencia simultánea de agua y oxígeno, lo que implica la formación de zonas anódicas y catódicas, con transferencia de electrones y disolución iónica. La cinética y la severidad del fenómeno se ven aceleradas por una ejecución deficiente de la obra, una protección superficial insuficiente y la presencia de agentes agresivos, como iones cloruro y sulfatos, o por ambientes contaminados, que favorecen la corrosión localizada, la formación de picaduras y el desarrollo de pilas galvánicas [29].

2.1.6 Patologías biológicas

Las patologías biológicas se caracterizan por procesos de biodeterioro que incluyen la pudrición parda y blanca de la madera, la desintegración de materiales orgánicos y la pérdida de cohesión de los elementos constructivos. En materiales de naturaleza pétreo, tales como rocas u hormigones, la acción de los microorganismos puede ocasionar cambios químicos y físicos, desencadenando la pérdida de material superficial, pátinas de color y, a largo plazo, daños estructurales [30,31].

Estos fenómenos son consecuencia de la actividad de organismos vivos, principalmente hongos, insectos xilófagos como termitas y carcomas, y, en menor medida, bacterias y líquenes que degradan la matriz orgánica o alteran las propiedades fisicoquímicas del sustrato. La proliferación de estos agentes se ve favorecida por condiciones ambientales caracterizadas por elevadas humedades, ventilación deficiente, acumulación de condensaciones y presencia de materiales con baja resistencia biológica [1].

2.2 El impacto de las sales solubles en las edificaciones

2.2.1 Edificaciones de la Armada

La Armada dispone de un conjunto de infraestructuras propias, como los arsenales, bases navales, muelles, diques secos, pantalanos y depósitos logísticos, todos ellos de carácter portuario, destinados al mantenimiento, aprovisionamiento, atraque y proyección operativa de sus unidades. Todas estas infraestructuras tienen la propiedad común de encontrarse en zona de costa, lo que supone que están sometidas a unas condiciones ambientales agresivas.

Además de las infraestructuras citadas, las instalaciones permanentes de los arsenales de Ferrol y Cartagena, y las bases navales de Rota, Las Palmas, Mahón, Marín y San Fernando, presentan edificaciones con usos diversos (administrativo, residencial, docente, etc.) sometidas al mismo ambiente agresivo y con patologías propias de este tipo de edificaciones.

En el caso del Arsenal de Ferrol, su construcción fue ordenada por Felipe V en 1726, con el objetivo de que perdurase más en el tiempo. Se realizó empleando mampostería de piedra y mortero de cal. Además, junto con el resto de los edificios del arsenal, se construyeron distintos diques y esclusas internos para reparaciones navales, así como el Dique de la Campana.

Por otro lado, tenemos el Arsenal de la Carraca, impulsado por José Patiño y el Marqués de la Ensenada. Toda la obra se construyó mayoritariamente en cantería de piedra caliza de la zona y en ladrillo. Las patologías identificadas son similares a las que se observan en el resto de la ciudad de Cádiz: desgaste de morteros por salitre, eflorescencias en sillares de piedra y agrietamiento en bóvedas subterráneas causado por el agua salina.

También en Cádiz, pero construida en el siglo XX, tenemos la Base Naval de Rota, construida en los años 50 del siglo pasado como base militar conjunta entre España y Estados Unidos. Para su construcción se empleó principalmente el hormigón armado y acero estructural. Dentro de las patologías aquí destacamos la corrosión que se dan en las armaduras debido a la humedad marina, además de las retracciones en el hormigón debido a su antigüedad.

2.2.2 La cristalización de las sales solubles

Como ya se ha mencionado, la cristalización de las sales solubles es uno de los procesos más agresivos que pueden afectar a los materiales de construcción, especialmente a los porosos. Este agente de alteración, que por lo general no forma parte de la composición de los materiales pétreos, procede de diversas fuentes, tanto naturales, por ejemplo los aerosoles marinos como antropogénicas, es decir, contaminantes atmosféricos, contaminación urbana, otros materiales de construcción, restos de antiguos tratamientos de limpieza [1,32].

Las sales solubles penetran en la roca en disolución acuosa y cristalizan en el interior de los poros cuando se produce la evaporación del agua. Este proceso es reversible, ya que las sales pueden disolverse de nuevo al incrementarse la humedad en el material. Para que precipite un mineral, la humedad relativa (HR) debe ser menor que la del equilibrio de la sal presente. Las fluctuaciones en la humedad del material o de la HR del ambiente son responsables de la disolución y cristalización, así como de la deshidratación e hidratación de sales higroscópicas, lo que genera expansiones y contracciones que provocan fatiga en el material.

La alternancia de ciclos de disolución y cristalización genera presiones internas que, en numerosas ocasiones, superan la resistencia mecánica del material, provocando la pérdida de cohesión y, en consecuencia, la degradación de este. La presión de cristalización depende del grado de saturación salina y de la energía interfacial entre el cristal precipitado y la superficie del poro [33,34]. Para que se produzca la precipitación de una sal, es necesario que la disolución alcance un estado de saturación. Este parámetro resulta determinante en la agresividad del proceso y está condicionado tanto por la concentración de sales como por las condiciones ambientales. En particular, aquellas sales que presentan amplias variaciones en su grado de saturación son más agresivas. Del mismo modo, los sistemas que incluyen

fases hidratadas, como los sulfatos, muestran una elevada capacidad de alteración debido a su sensibilidad frente a las fluctuaciones ambientales [7,35].

Las principales formas de deterioro que afectan a las infraestructuras y que están asociadas a la cristalización de sales solubles son la desagregación arenosa asociada principalmente al cloruro de sodio, los desprendimientos superficiales ocasionados principalmente por sales sulfatadas y la alveolización. Además, las sales pueden causar daños estéticos debido a la precipitación de eflorescencias en las superficies. Todos estos daños influyen de manera negativa sobre la perdurabilidad de la infraestructura. Se prevé que en los próximos años estos procesos se intensifiquen debido al cambio climático y a la influencia de las variaciones ambientales en las fases de transición de las sales [8]. Por ello, se requieren procesos y técnicas que salvaguarden la integridad de las infraestructuras.

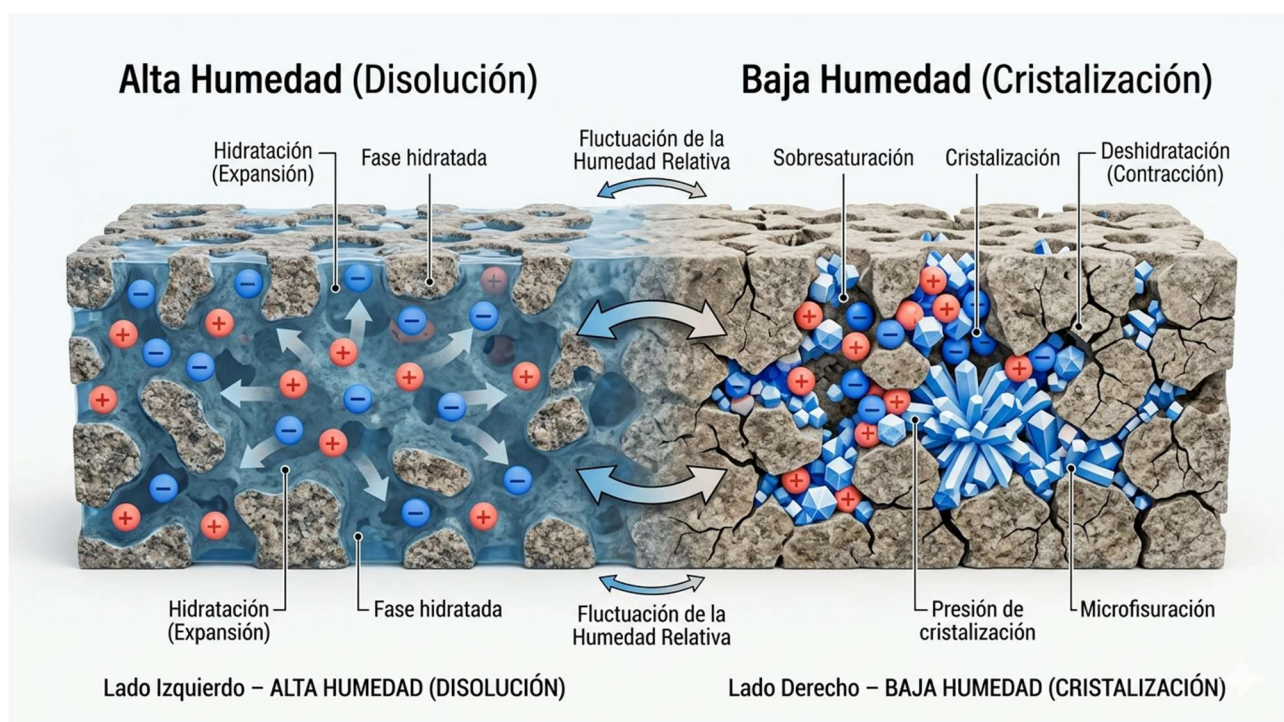


Figura 2-2 Imagen explicativa del proceso de cristalización de las sales. Generada mediante Gemini.

2.2.3 Metodologías para combatir las sales

Hasta la fecha, no existen métodos plenamente eficaces para eliminar o detener los daños provocados por la cristalización salina, salvo aquellos que buscan eliminar la fuente de origen de las sales y la de entrada de la humedad, lo cual es prácticamente imposible.

Las principales estrategias aplicadas por los profesionales del sector frente a la acción alterante de las sales se centran en [1,7,27]:

- Controlar las condiciones ambientales para dificultar los ciclos de disolución-cristalización de las sales. Esta estrategia es difícil de aplicar a grandes objetos y, al mismo tiempo, de mantener a lo largo del tiempo.
- Reducir el contenido de sales presentes en el material mediante técnicas de desalinización, como baños de inmersión [10,13], aplicación de papetas o morteros de sacrificio [12,14], uso de inhibidores de la cristalización [36,37] y técnicas electrocinéticas [20,22].
- Dificultar la entrada de agentes externos en el interior del material, reduciendo su porosidad accesible mediante la aplicación de productos consolidantes e hidrofugantes [16,38]. Sin embargo, a pesar de los avances en la tecnología de las nanopartículas, estos tratamientos,

aplicados superficialmente mediante spray o brochas, presentan una penetrabilidad limitada, lo que conlleva que el ascenso de humedad, junto con las sales, pueda producirse desde el núcleo del pilar o del muro en cuestión. Esto puede acelerar el proceso de daño, ya que, si el consolidante o hidrofugante dificulta la salida de las sales hacia la superficie del material, estas tenderán a cristalizar en su interior, ejerciendo cada vez mayores presiones y causando daños. Además, los resultados obtenidos en obra, una vez aplicados estos compuestos, difieren de los que se suelen observar en investigaciones científicas, ya que las condiciones de laboratorio suelen ser ideales. La presencia de factores como la humedad o las sales influye directamente en la distribución del compuesto aplicado, en la cantidad de materia seca del producto polimerizado y en la penetrabilidad, ya que el agua reduce los poros disponibles para albergar el compuesto y aumenta la velocidad del proceso de hidrólisis en la reacción sol-gel.

2.2.4 Técnicas de desalación

Baños de inmersión: La desalación por inmersión constituye una de las técnicas más tradicionales y se basa exclusivamente en la difusión iónica gobernada por la segunda ley de Fick (ecuación 2), generándose un gradiente de concentración entre la solución interna del material y el agua desionizada del baño (Figura 2-3), movilizándose los iones desde zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración hasta que se alcance la misma fuerza iónica entre ambos medios.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta C^2}{\delta x^2} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde C es la concentración de sales en (mol/L), D es el coeficiente de difusión en (m^2/s), t el tiempo en segundos y x la distancia en metros.

La efectividad del proceso depende de varios factores, como son: la temperatura del baño, el volumen de la disolución desalinizadora, el movimiento y/o flujo del baño, y las características propias del objeto a desalinizar [39].

Este procedimiento ofrece la ventaja de posibilitar la eliminación de sales en materiales afectados, alcanzando niveles de extracción cercanos al 100 %. Asimismo, resulta eficaz en cualquier tipo de material poroso, con independencia de su distribución de poros. No obstante, presenta ciertas limitaciones: se trata de un proceso lento, aplicable únicamente a elementos de pequeño tamaño y que, además, exige la renovación constante de la disolución desalinizante para evitar la interrupción del proceso.

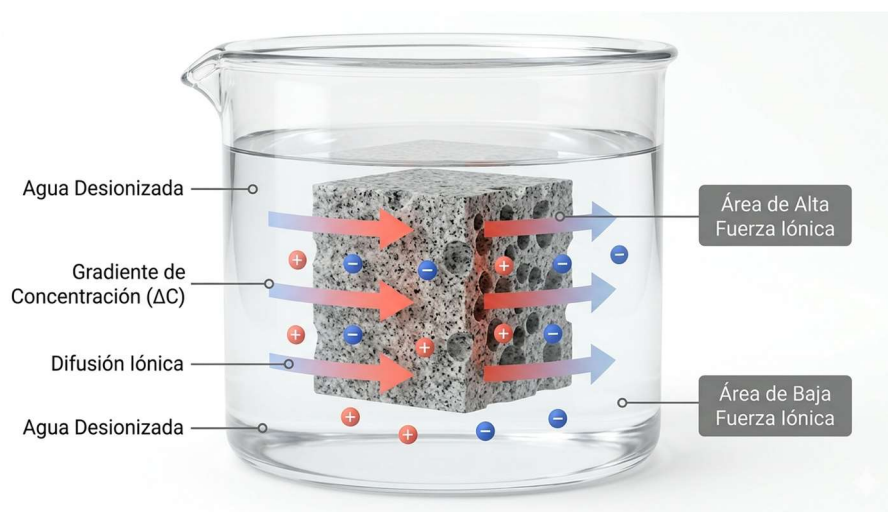


Figura 2-3 Imagen explicativa del proceso de desalación mediante baños de inmersión. Generada por Gemini.

Aplicación de papetas: Este tratamiento se basa en la aplicación de apósitos constituidos con diferentes tipos de materiales (fibras de celulosa de diferente tamaño, arcillas absorbentes, etc.) con el objeto de lograr que las sales presentes en el material afectado se movilen hacia el interior de la papeta. Constituye la técnica más extendida en la restauración in situ y combina procesos de disolución, difusión y advección capilar [11]. La eficacia depende críticamente de la relación entre la distribución de poros del material tratado y la de la papeta utilizada: si este posee un diámetro capilar menor que el del material poroso sobre el que se aplica, el transporte se produce principalmente por advección (arrastre de las sales junto con el frente de humedad hacia la papeta); si el diámetro de poro es mayor, domina la difusión (desalación por gradiente de concentraciones). La literatura indica que la profundidad efectiva rara vez supera los 2-4 cm y que puede producirse un retorno parcial de sales durante la fase de secado [1]. Aunque su aplicación es sencilla y poco invasiva, en materiales con disgregación granular intensa existe un riesgo de desprendimiento superficial, lo que justifica, en algunos casos, la necesidad de tratamientos de preconsolidación previos [40,41]. La aplicación de consolidantes permite restaurar la cohesión superficial perdida ocasionando una modificación en la distribución de los poros y una reducción en el volumen capilar accesible. Esto no impide la desalación, pero afecta tanto a la velocidad de extracción como a la eficiencia de las técnicas desaladoras.

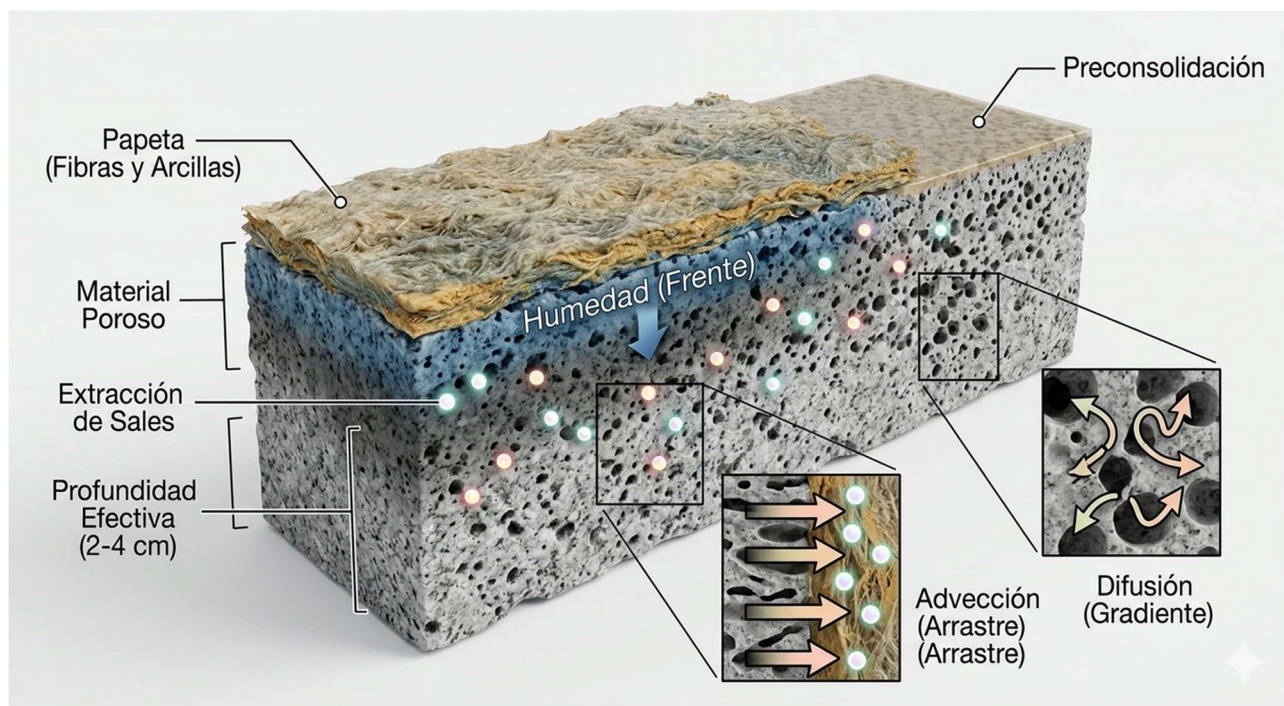


Figura 2-4 Imagen explicativa del proceso de desalación por cataplasmas. Generada por Gemini.

Morteros de sacrificio: funcionan como sistemas tampón basados en la jerarquía capilar, diseñados con un mayor volumen de poros capilares que el del sustrato original para favorecer la migración de sales hacia ellos. El flujo continuo de humedad transporta las sales hacia el mortero, donde estas cristalizan preferentemente, protegiendo el material original. Este enfoque se aplica por ejemplo a fachadas históricas sometidas a ciclos húmedo-seco. No obstante, no elimina por completo las sales profundas y requiere reposición periódica, actuando más como medida de gestión del deterioro que como técnica de extracción total.

Modificadores de cristalización: Estos actúan alterando la nucleación y el crecimiento cristalino mediante efectos termodinámicos y cinéticos. El empleo de compuestos como el ferrocianuro potásico ha demostrado retrasar la nucleación del cloruro de sodio, aumentar la sobresaturación necesaria para la cristalización y modificar el hábito cristalino hacia formas dendríticas menos adherentes. Esto reduce la presión ejercida sobre las paredes de poro y, por tanto, el daño mecánico asociado. Sin embargo, no

implica una eliminación directa de sales, sino una mitigación del deterioro, y su eficacia depende de la naturaleza iónica del sistema y de la coexistencia de sales múltiples. [16]

Electrocinética: Esta técnica se fundamenta en la aplicación de un campo eléctrico continuo que induce un transporte iónico forzado, descrito por la ecuación de Nernst-Planck (ecuación 1), en la que la migración eléctrica se convierte en el mecanismo dominante frente a la difusión. Este método permite movilizar iones en profundidad, alcanzando eficiencias superiores al 90% en numerosos estudios experimentales [15,18,42]. Su principal ventaja radica en la capacidad de actuar sobre toda la sección del material que se ve influenciada por la presencia del campo eléctrico aplicado.

Durante la aplicación del campo eléctrico los aniones son forzados a migrar hacia el ánodo, donde se oxidan, mientras que los cationes son forzados a migrar hacia el cátodo donde se reducen. Para garantizar la salida de las sales, los electrodos se colocan en el interior de papetas aplicadas sobre la superficie del material a tratar y que servirán además de lugares de almacenamiento de las sales movilizadas. A medida que en el interior del material queden menos iones que puedan transportar la corriente, la resistencia eléctrica de este irá en aumento.

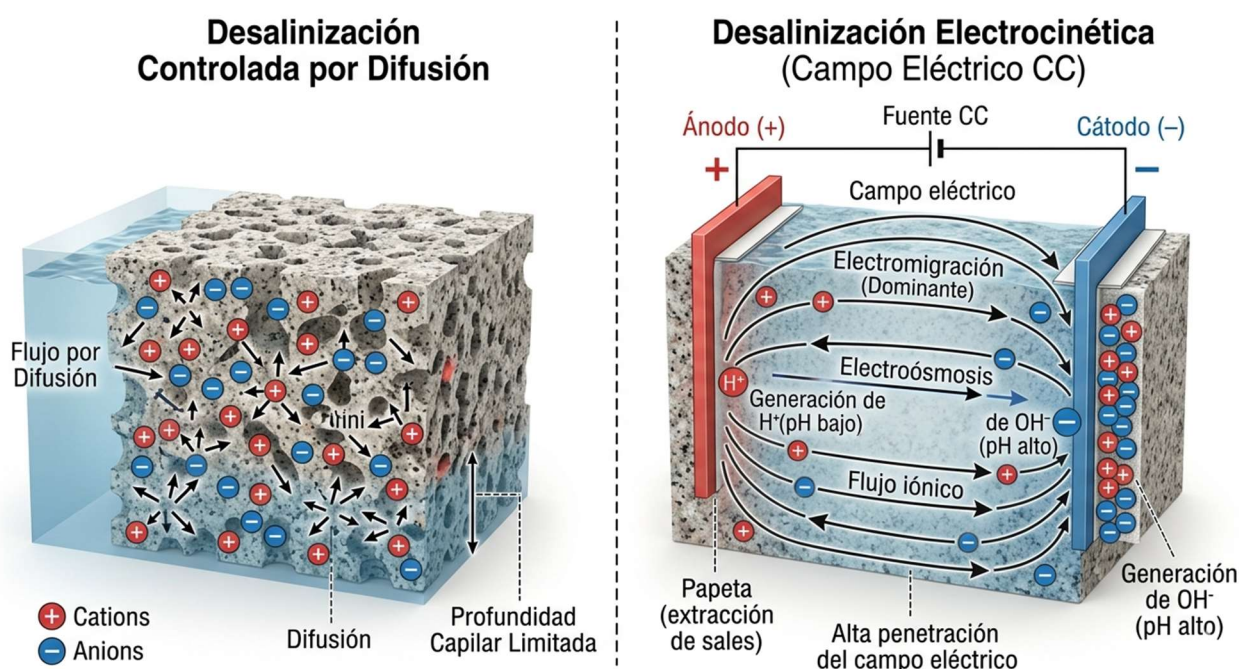


Figura 2-5 Imagen comparativa entre los procesos de desalación electrocinética convencional y desalación electrocinética empleando un campo eléctrico. Generado por Gemini.

El principal problema asociado a esta técnica radica en que en las inmediaciones de los electrodos tiene lugar la electrólisis del agua, lo que ocasiona variaciones extremas de pH que pueden llegar a ocasionar procesos de alteración químicos si llegan a alcanzar la superficie del material a tratar. Para evitar esto existen diferentes soluciones, como son el uso de electrolitos tamponantes, el uso de papetas que contengan carbonato de calcio en el ánodo, así como el uso de dos electrodos por compartimento conectados en serie que permiten modular la cantidad de iones H⁺ y OH⁻ generados [21,43]

En los últimos años se ha producido un avance significativo en las tecnologías aplicadas tanto a la extracción de sales como a la consolidación de materiales de construcción, al enfocar las estrategias de intervención en la movilización iónica forzada mediante el campo eléctrico [44,45]. Este enfoque ha dado lugar al desarrollo de técnicas electrocinéticas que permiten actuar de manera eficaz sobre

materiales porosos afectados por procesos de degradación asociados a la presencia tanto de sales como de humedad.

2.3 Electrocinética. Fundamentos y aplicaciones

2.3.1 Transporte iónico en medios porosos

Tal y como se mencionó en la sección 1, el transporte de especies iónicas en materiales saturados puede describirse mediante la ecuación de Nernst-Planck (ecuación 1). En ausencia de campo eléctrico, el transporte iónico se produce por difusión o por advección capilar. Estos mecanismos dependen de gradientes de concentración o de evaporación superficial y son más lentos que los ocasionados cuando se aplica un campo eléctrico.

Cuando se aplica un campo eléctrico externo, la componente de migración eléctrica se vuelve dominante. El gradiente del potencial será:

$$E = -\nabla\phi \quad (\text{ecuación 3})$$

Este introduce una fuerza direccional capaz de movilizar iones incluso en ausencia de gradientes de concentración significativos.

La eficiencia de proceso depende de:

- Conductividad eléctrica efectiva del material, la cual depende del contenido iónico.
- Saturación hídrica.
- Tortuosidad.
- Conectividad de la red porosa.

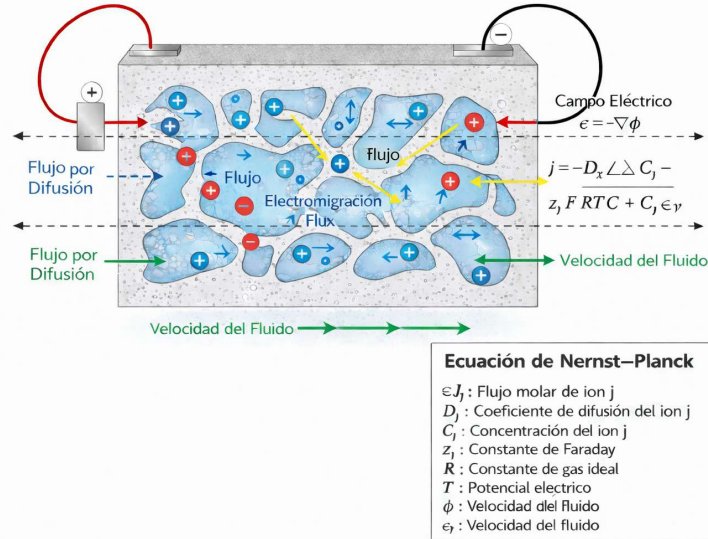


Figura 2-6 Explicación gráfica del proceso de transporte iónico. Generada por ChatGPT.

2.3.2 Comportamiento eléctrico de materiales porosos y distribución de campo aplicado

Cuando se aplica un diferencial de potencial entre dos electrodos colocados en un muro, la distribución del campo eléctrico depende de la conductividad eléctrica efectiva del material, la geometría del sistema y el grado de saturación hídrica. En el caso de un medio homogéneo, la distribución del potencial puede describirse a través de la ecuación de Laplace:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (\text{ecuación 4})$$

Dónde σ representa la conductividad eléctrica efectiva del medio poroso.

Cuando se trata de materiales pétreos, la conductividad varía espacialmente debido a heterogeneidades microestructurales, presencia de sales y variaciones de humedad. Estas discontinuidades generan gradientes locales de potencial que condicionan la migración iónica y la profundidad efectiva de tratamiento.

De esta forma, la eficiencia de la desalación electrocinética no depende únicamente de la intensidad aplicada, sino también de la resistividad interna del material, la cual está directamente relacionada con la saturación, la porosidad conectada y la concentración salina. Por esto es de vital importancia este aspecto para comprender la penetración real del campo eléctrico en muros cuyo espesor sea mayor.

2.3.3 Atenuación y profundidad efectiva del campo eléctrico

Cuando se realizan tratamientos electrocinéticos a materiales de gran espesor, la caída de potencial a lo largo del material puede provocar una disminución progresiva de la intensidad de campo eléctrico. Esto está directamente relacionado con la Ley de Ohm en medios continuos:

$$J = \sigma \cdot E \quad \text{(ecuación 5)}$$

Dónde J es la densidad de campo eléctrico (A/m^2) y E el campo eléctrico (V/m).

Si el material tiene una conductividad baja, la corriente efectiva disminuye, en consecuencia, la velocidad de migración iónica también puede verse reducida. En materiales cuya porosidad sea baja, como es el caso de los materiales pétreos, este comportamiento es particularmente relevante, ya que la conducción depende exclusivamente de la fase líquida presente en los poros.

Debido a esto, el grado de humedad constituye un parámetro determinante en la profundidad de penetración del campo eléctrico. A mayor saturación, mayor continuidad eléctrica y mayor eficiencia del transporte iónico. Este fenómeno explica por qué la presencia de humedad no constituye un obstáculo, sino un factor que favorece el tratamiento electrocinético.

2.3.4 Desalación electrocinética

Los estudios publicados hasta la fecha sobre la desalación electrocinética, tanto en ensayos de laboratorio como en aplicaciones in situ, confirman que esta técnica, a diferencia de los métodos tradicionales, permite reducir el contenido de sales hasta porcentajes cercanos al 100 %, tanto en la superficie como en capas más profundas del material tratado, independientemente de la presencia de humedad en el muro [22,23]. Asimismo, se ha demostrado que este procedimiento no ocasiona daños significativos en el material objeto de la intervención. La técnica se basa fundamentalmente en dos fenómenos electrocinéticos: la electroósmosis y la electromigración [17].

La aplicación de técnicas electrocinéticas provoca:

- El movimiento dirigido de partículas cargadas bajo la influencia de un campo eléctrico. En un material poroso saturado con una solución salina, al colocar electrodos y aplicar una diferencia de potencial, los iones disueltos experimentan una fuerza eléctrica que los hace moverse: los cationes migran hacia el electrodo negativo y los aniones, hacia el positivo. Este transporte iónico inducido provoca que la concentración de sal en el material disminuya gradualmente, ya que los iones son trasladados fuera de la matriz porosa hacia los electrodos. En la práctica, las sales inicialmente distribuidas en los poros se acumulan cerca de la superficie del material, en las inmediaciones de los electrodos. Si hay un medio adecuado, las sales migradas quedan retenidas en él, lo que las separa del material de construcción. Este principio es el eje de la desalación electrocinética. Emplea corriente eléctrica para extraer los iones salinos del interior de piedras, morteros o ladrillos hacia un medio externo que los reciba.
- Un movimiento del agua contenida en el material, que generalmente se produce desde el ánodo hacia el cátodo [46,47]. Este comportamiento se debe a que el potencial es negativo

en la mayoría de los materiales de construcción. Dicho desplazamiento de la fase líquida recibe el nombre de flujo electroosmótico y constituye uno de los mecanismos fundamentales que explican la eficacia de los procesos de desalación y consolidación electrocinética. Esta técnica ha sido históricamente utilizada para deshidratar y consolidar suelos y para controlar la humedad ascendente, invirtiendo el flujo de agua mediante campos eléctricos.

Este método, aunque efectivo, no está exento de resultados negativos. Durante el proceso electrocinético tiene lugar la electrólisis del agua en las inmediaciones de los electrodos. Como consecuencia, se generan productos que modifican el entorno químico: en el ánodo, la reacción produce iones de hidrógeno positivos, acidificando la zona, y en el cátodo, se producen iones hidroxilo, lo que alcaliniza la zona cercana. Si no se impide que estos valores de pH alcancen el material a tratar se podrían provocar daños químicos en el mismo. Para resolver esto es necesario seguir el siguiente protocolo [15]:

- La corriente aplicada entre los electrodos debe ser de baja intensidad, es decir, mA.
- Una vez realizado el montaje, conectado el circuito y aplicada la diferencia de potencial, comienza a circular corriente a través del material y se ponen en marcha los mecanismos electrocinéticos.
- Para extraer las sales, es necesario interponer entre los electrodos y el material pétreo una papeta que permita: 1) mantener un buen contacto eléctrico; 2) tamponar las variaciones de pH y 3) absorber las sales movilizadas. Es común emplear en el ánodo una papeta que contenga carbonato de calcio, mientras que en el cátodo se emplea una papeta de caolín.
- Con el fin de facilitar el transporte inicial de la corriente y para ayudar al tamponamiento del pH, se suele emplear un electrolito tampón.

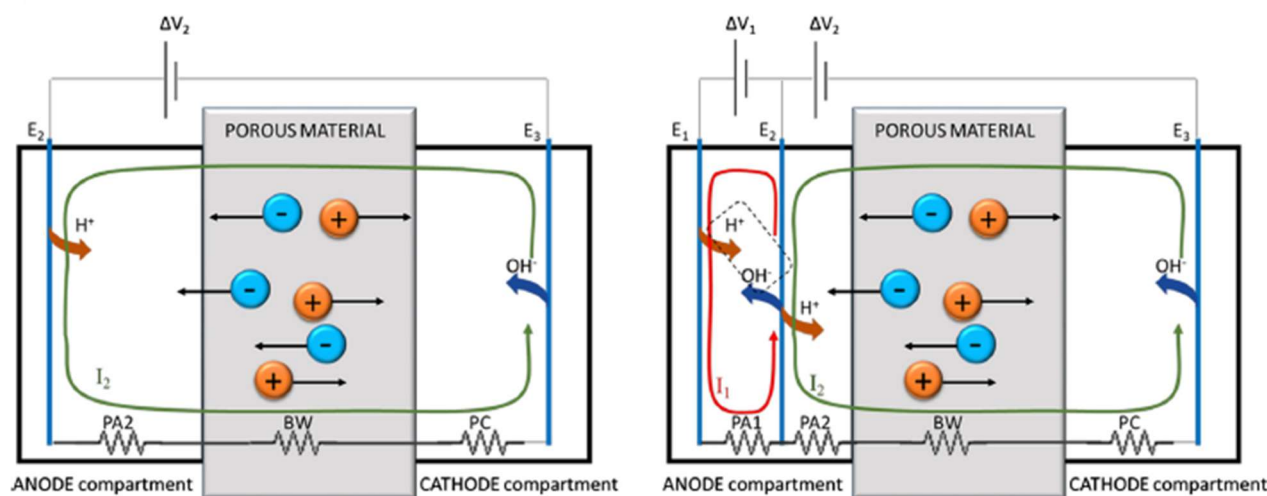


Figura 2-7 Esquema de dos montajes de desalación, uno con un electrodo por compartimento (imagen de la izquierda) y otro con dos electrodos en el compartimento anódico (imagen de la derecha). Imagen extraída de [43].

Entre las distintas ventajas que tienen estas técnicas se podrían citar las siguientes:

- Extracción profunda de sales: como se ha mencionado anteriormente, a diferencia de otros métodos cuyo alcance se limitaba a la superficie de los materiales, con esta técnica se puede alcanzar capas más profundas, llegando incluso a los 30-40 cm en piedra. Esto supone una gran ventaja cuando se pretende aplicar a muros de mayor grosor o a aquellos materiales en los que las sales se distribuyen a lo largo de todo su volumen y no únicamente en la cara superficial.
- Eficaz en materiales de poro fino: En aquellos materiales, como los morteros de cal o los cementos con porosidad muy fina, la desalación por apósitos falla, ya que estas técnicas son incapaces de arrastrar las sales fuera del material. Por el contrario, la desalación por

electrocinética no depende del tamaño del poro para generar flujo, ya que el campo eléctrico atraviesa todo el material independientemente de su microestructura.

- Menor sensibilidad a las condiciones ambientales: Mientras que la eficacia de un apósito depende de la evaporación, muy limitada en climas fríos o húmedos, el método electrocinético funciona incluso en entornos de alta humedad relativa o de baja temperatura, ya que el movimiento de los iones no depende del secado. Gracias a esto, las situaciones en las que se puede llevar a cabo la desalación de materiales se amplían.
- Cobertura amplia con intervención limitada: Para desalinizar un muro completo empleando apósitos, se debería cubrir toda su superficie en sucesivas capas, lo que resultaría en un trabajo laborioso y de largo tiempo. Este no es el caso de la electrocinética, puesto que con la instalación de electrodos cada cierta distancia es suficiente.

2.3.5 Consolidación electrocinética

En lo que respecta a la consolidación electrocinética, los desarrollos realizados en laboratorio han demostrado que es posible consolidar materiales en profundidad mediante la introducción controlada de compuestos inorgánicos compatibles con su estructura [48]. Estos estudios ponen de manifiesto que el proceso de consolidación permite incrementar las propiedades mecánicas del material al reducir el número de poros accesibles al agua y, además, permite incorporar nuevas propiedades funcionales, como la acción biocida [49,50].

A diferencia de otros tratamientos convencionales, la humedad favorece la eficacia del tratamiento electrocinético y la presencia de sales no constituye un obstáculo, ya que el proceso de consolidación puede desarrollarse simultáneamente a la extracción de dichas sales [45].

Al igual que en la desalación electrocinética, la consolidación se basa en los mismos principios. A través de la electromigración, los iones del consolidante presentes en la solución de los electrodos se movilizan por el material hacia el otro electrodo, de la misma forma que las sales eran arrastradas por los poros del material hacia los electrodos. Durante esa movilización, al encontrarse condiciones químicas adecuadas, los iones reaccionan o precipitan formando un sólido inorgánico dentro del material. De esta forma, se pueden rellenar algunos de los poros del material, lo que favorece que, en el futuro, no se vuelva a producir desgaste debido a la presencia de sales. El tratamiento en sí se realiza en dos etapas, de modo que puedan optimizarse los resultados: una primera que sirva para generar un bloqueo parcial y luego se invierte la polaridad, para profundizar en la consolidación.

Con esta técnica se busca reforzar los muros dañados; se obtienen resultados muy positivos, ya que, a diferencia de los consolidantes tradicionales, que solo actuaban en la superficie, con este procedimiento se alcanza una mayor profundidad de actuación.

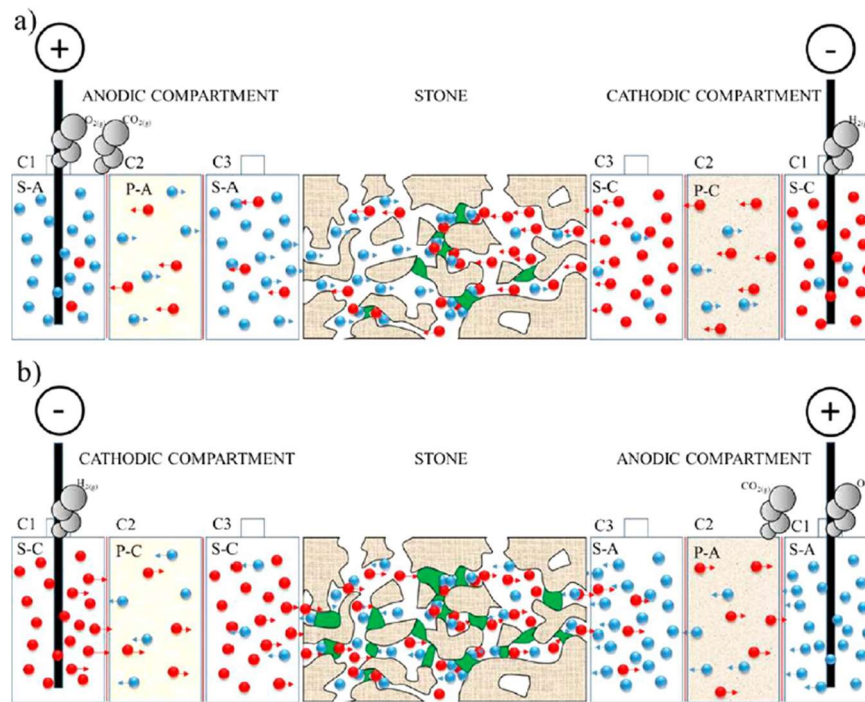


Figura 2-8 Explicación del proceso de consolidación electrocinética en dos etapas. Los puntos rojos son cationes, los azules aniones y las zonas verdes representan el compuesto precipitado. Imagen extraída de [44].

2.4 Tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica es un método de exploración geofísica de superficie que permite obtener un corte continuo de resistividad del subsuelo [51,52].

Aunque teóricamente se basa en la corriente continua, en la práctica utiliza una corriente alterna de muy baja frecuencia (onda cuadrada). Esto significa que el equipo inyecta corriente en un sentido, se detiene y luego la inyecta en sentido contrario. Este ciclo es fundamental para obtener datos limpios y evitar errores de lectura por la carga eléctrica natural del propio terreno, ya que una inyección unidireccional prolongada provocaría la polarización de los electrodos, generando una acumulación de carga que falsearía los valores de potencial medidos. Mediante este ciclo de conmutación, se logra anular tanto el efecto de la polarización como la influencia del potencial del propio material, asegurando una adquisición de datos libre de distorsiones.

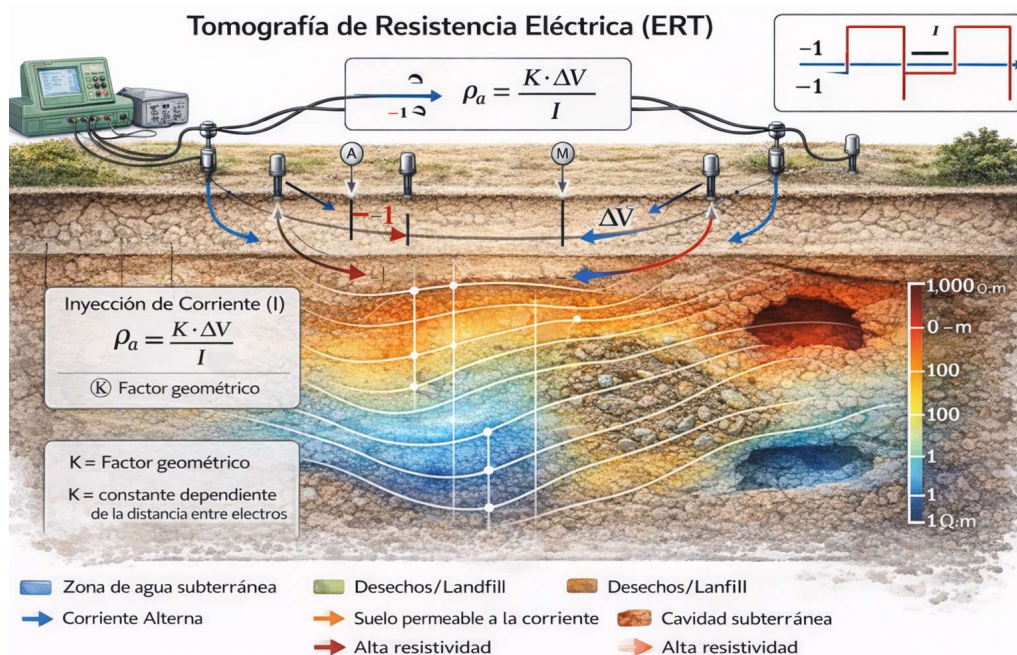


Figura 2-9 Imagen resumen del procedimiento de tomografía. Imagen generada con ChatGPT.

Debemos entender que la densidad de corriente en el subsuelo no presenta un comportamiento ni uniforme ni lineal, sino que se encuentra intrínsecamente unido a las configuraciones de resistividades de las formaciones geológicas que atraviesa. De acuerdo con la ley de Ohm en medios continuos, las líneas de flujo eléctrico tienden a concentrarse en dominios de alta conductividad específica. Estos canales preferenciales suelen estar vinculados a la presencia de fluidos electrolíticos en la porosidad interconectada, donde el aumento de la saturación de agua o la concentración de sales disueltas reduce drásticamente la resistencia al paso de carga. Por el contrario, los materiales de matriz rocosa consolidada o zonas no saturadas actúan como barreras dieléctricas, forzando una desviación de las líneas de corriente hacia zonas periféricas. Este fenómeno de canalización del flujo es crítico para la interpretación, ya que la presencia de cuerpos altamente conductivos puede crear un efecto de apantallamiento a poca profundidad, lo que puede dificultar la caracterización de estructuras situadas en niveles inferiores.

La capacidad de penetración del método y la calidad de la imagen obtenida dependen de un equilibrio hidrodinámico y geométrico. Principalmente, la profundidad de investigación está determinada por la separación entre los electrodos de emisión y recepción. Generalmente un incremento en la distancia entre electrodos expande el volumen del campo eléctrico hacia horizontes más profundos; sin embargo, esta ganancia en profundidad conlleva una degradación de la resolución espacial, debido a que el volumen de roca promediado en la medición aumenta, diluyendo la firma de las anomalías de pequeña escala.

De la misma forma, la resistividad del propio medio ejerce un control sobre el alcance efectivo del campo. En terrenos de alta resistividad, la inyección de corriente se ve limitada por la resistencia de contacto y la baja permitividad del material, lo que se traduce en una atenuación prematura de la señal. Este escenario suele requerir un aumento de la potencia de emisión o emplear dispositivos químicos en los electrodos para mejorar la relación señal-ruido y asegurar una profundidad de investigación coherente que esté alineado con los objetivos del estudio.

El método se fundamenta en la capacidad de los materiales geológicos para conducir corriente:

-Inyección y medida: Se utiliza cuatro electrodos. Dos inyectan una intensidad de corriente I conocida y otros dos miden la diferencia de potencial o voltaje ΔV resultante.

-Resistividad aparente: El sistema calcula cuánto se opone el terreno al paso de esa corriente mediante la fórmula.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{(ecuación 6)}$$

Donde K es el factor geométrico, una constante que depende exclusivamente de la distancia y disposición entre los electrodos en superficie.

-Inversión: Los valores medidos en campo se procesan mediante un software para generar un modelo de resistividad real, que es el que permite identificar estratos, rocas o contaminantes.

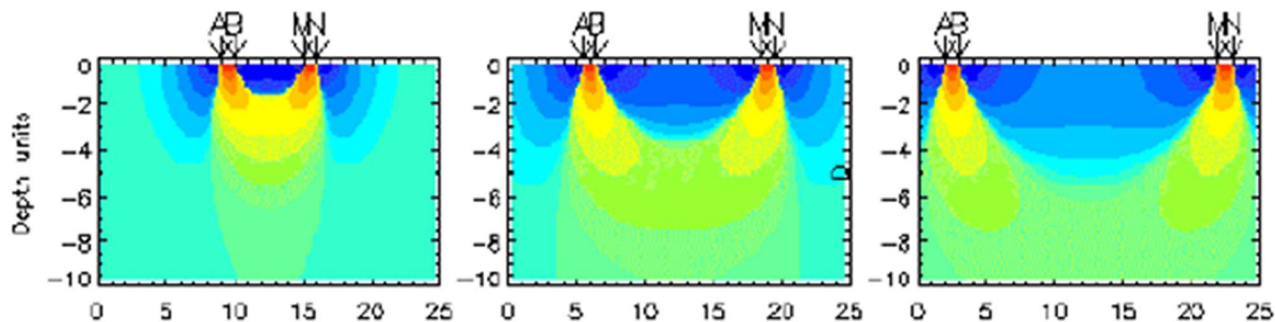


Figura 2-10 Ejemplo de penetración de la corriente en el terreno con un dispositivo dipolo-dipolo. Imagen extraída de [53].

La implementación de sistemas de multielectrodos automatizados dota a la tomografía de una resolución espacial y una eficiencia operativa de las que carecían los métodos convencionales, permitiendo una caracterización bidimensional y tridimensional continua del subsuelo:

- Caracterización de vertederos (RCD): Esto permite diferenciar residuos que se encuentran en el suelo natural, dividiéndolos en muy resistivos o en materiales conductivos.
- Hidrogeología: Localización de niveles freáticos, acuíferos y detección de plumas de contaminación como los lixiviados. Esto se visualiza de la siguiente forma: En el tomograma las zonas de humedad aparecen como anomalías conductoras, si se aprecian zonas en las que los valores son de entre 5-20 $\Omega \cdot m$ rodeada de materiales con valores de 200 $\Omega \cdot m$, has encontrado una acumulación de agua o zona de saturación.
- Detección de cavidades: Identificación de huecos o zonas de colapso de proyectos de ingeniería civil.
- Perfilado 2D y 3D: Capacidad de crear radiografías del terreno a profundidades que pueden variar desde pocos metros hasta cientos de ellos.

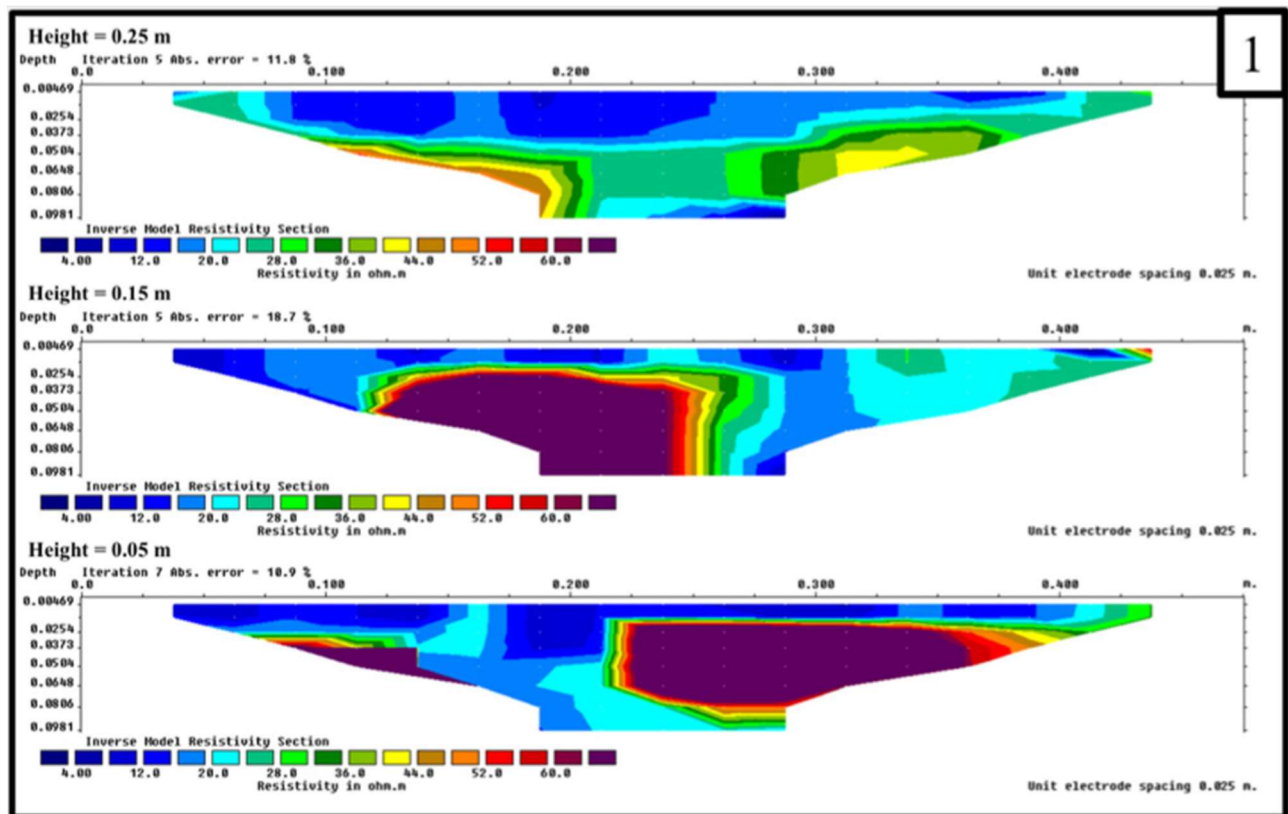


Figura 2-11 Ejemplo de perfil de resistividad eléctrica de un material de construcción. Imagen extraída de [54].

Como cualquier procedimiento, su realización conlleva una serie de ventajas como [52]:

- Resolución continua: A diferencia de los sondeos mecánicos que solo dan información en un punto, la tomografía ofrece una visión de toda la sección del terreno.
- No invasiva: No requiere excavar ni dañar el suelo, lo que reduce costes y riesgos ambientales.
- Eliminación de errores: Al usar corriente alterna, se elimina el efecto de la polarización de electrodos y el ruido de potencial espontáneo del suelo.

Entre las limitaciones de este procedimiento encontramos [52]:

- Ambigüedad interpretativa: Diferentes materiales pueden tener la misma resistividad. Requiere interpretación geológica previa.
- Interferencias Antrópicas: La presencia de tuberías metálicas, vallas o cables eléctricos puede desviar la corriente y generar anomalías falsas.
- Pérdida de resolución: Cuanta mayor es la profundidad que se quiere estudiar, menor resolución se obtendrá de aquellos objetos de menor tamaño del subsuelo.

En este proceso, se pueden emplear tres tipos distintos de disposiciones a la hora de la colocación de los electrodos, estos son:

Disposición Wenner: Es el más robusto de los tres al mantener los electrodos una distancia constante entre sí, esto da como resultado una señal eléctrica muy fuerte. Se emplea principalmente cuando el suelo tiene mucho ruido eléctrico o cuando solo interesa saber a qué profundidad cambia el tipo de suelo.

Disposición Schlumberger: Se trata de un modelo híbrido. En la tomografía moderna (Wenner-Schlumberger), se busca tener una mejor resolución lateral que el Wenner puro, permitiendo ver si una capa se interrumpe, pero manteniendo una buena profundidad de investigación.

Disposición Dipolo-Dipolo: En este caso, los electrodos de inyección están separados de los de medida. Esto hace que la corriente viaje de forma más compleja, permitiendo detectar objetos verticales

o cavidades. Su gran desventaja es que la señal llega muy débil al receptor, por lo que no funciona bien en suelos muy resistivos o con mucha interferencia.

Característica	Wenner	Schlumberger	Dipolo-Dipolo
Sensibilidad vertical	Muy alta	Alta	Baja
Sensibilidad lateral	Baja	Media	Muy alta
Profundidad	Media	Alta	Baja
Resistencia al ruido	Muy alta	Alta	Baja
Mejor uso	Identificar niveles freáticos o estratos planos	Mapeo geológico general y cimentaciones	Detección de túneles, cavidades y muros verticales

Tabla 2-1 Resumen de las características de las distintas disposiciones empleadas en tomografía.

2.5 Implicaciones experimentales y justificación del estudio de penetración de campo eléctrico

Los trabajos experimentales publicados en la última década sobre desalación electrocinética en materiales pétreos y morteros históricos, han demostrado que la eficiencia del tratamiento depende de manera determinante de la distribución real del campo eléctrico en el interior del material. Aunque numerosos estudios reportan elevados porcentajes de extracción salina y profundidades de actuación significativas, la mayoría de ellos evalúan el resultado final en términos de reducción de concentración, sin analizar con detalle la evolución espacial del potencial eléctrico ni la atenuación del campo en función del espesor, la conductividad efectiva o el grado de saturación.

Desde el punto de vista físico, el transporte iónico en medios porosos saturados está gobernado por la ecuación de Nernst-Planck, en la que intervienen simultáneamente la difusión, la migración eléctrica y la advección. Cuando se aplica un campo eléctrico externo, la componente de migración se convierte en el mecanismo dominante, siempre que la conductividad eléctrica del material depende principalmente de la fase líquida interconectada, de la concentración de sales disueltas y de la tortuosidad de la red porosa. En consecuencia, la humedad no actúa como limitación, sino como factor facilitador del transporte electrocinético.

Sin embargo, en materiales de baja porosidad como las rocas ornamentales, característicos de numerosas infraestructuras portuarias, la conectividad capilar y la distribución heterogénea de la humedad pueden generar zonas de diferente resistividad interna. Esta heterogeneidad provoca gradientes locales de potencial y posibles fenómenos de atenuación del campo eléctrico a medida que aumenta la distancia entre electrodos. La caída de potencial en sistemas de gran espesor puede condicionar la velocidad de migración iónica y, por tanto, la eficiencia global del tratamiento, especialmente en configuraciones no optimizadas.

Asimismo, los estudios sobre configuraciones avanzadas evidencian que la estabilidad del campo aplicado es un factor crítico para evitar redistribuciones internas, o procesos secundarios, no deseados. Sin embargo, la mayor parte de los trabajos disponibles se centran en optimizar la extracción salina o la consolidación electrocinética, sin profundizar en la caracterización experimental directa de la penetración y distribución espacial del campo eléctrico en el interior del material.

En este contexto, se identifica una laguna relevante: la necesidad de cuantificar la presencia y directividad del campo eléctrico en función de la distancia, el espesor del elemento y las propiedades físicas del soporte. La determinación experimental de la propagación del campo aplicado permitirá establecer criterios objetivos sobre la profundidad efectiva de influencia, la relación entre saturación y conductividad y la viabilidad real de tratamientos electrocinéticos en muros de gran espesor.

Por tanto, este trabajo se orienta a estudiar de forma controlada la penetración de un campo eléctrico en materiales de construcción, analizando su distribución espacial y su variación con la distancia. Este enfoque permitirá complementar los resultados existentes en estudios realizados previamente, aportando una buena base experimental para optimizar futuras aplicaciones de desalación y consolidación en distintas infraestructuras.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales empleados

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se han usado dos materiales distintos y ampliamente utilizados en el patrimonio histórico español como son el granito Rodas, procedente de una explotación en activo en Galicia y empleado en el centro histórico de Mondariz y la calcarenita de Santa Ana, procedente de una explotación situada entre las localidades andaluzas de Alcalá la Real y Santa Ana y empleado en numerosas construcciones monumentales de Córdoba.

La selección de estos materiales se ha llevado a cabo por:

1. La diferente composición mineralógica y química de ambas rocas teniendo granito como roca silicatada y calcarenita como roca carbonatada.
2. El diferente origen geológico siendo ígneo en el caso del granito y sedimentario en el caso de la calcarenita.
3. La diferente porosidad. Estas propiedades tan distintas hacen que este estudio permita analizar distintas situaciones que podemos encontrar en edificaciones patrimoniales.



Figura 3-1 Granito (izquierda) y calcarenita (derecha) seleccionados para este proyecto.

Ambos materiales se han caracterizado desde el punto de vista mineralógico y desde el punto de vista de su porosidad accesible. La caracterización mineralógica se realizó mediante difracción de rayos X, para ello se envió una muestra de cada tipo de roca al Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación (CACTI) de la Universidad de Vigo. El equipo utilizado para la identificación de fases

minerales es el modelo X Philips XPERT-PRO, XCelerator con detector RTMS, operando en modo continuo, en un rango de 2θ de 4° a 80° . con un tamaño de paso de $0,0334^\circ$ y un tiempo de recuento de 50,165 s por paso, y radiación alfa Cu-K.

Para la caracterización de la porosidad accesible se siguió el procedimiento marcado por la norma UNE-EN 1936:2007 [55], empleando para ello 5 muestras cilíndricas de cada tipo de material. Para ello se registró el peso seco de las muestras (M_0), el peso tras saturación a vacío (M_s) y la pesada hidrostática (M_h). Con estos tres pesos se determinó la porosidad accesible (n) empleando la ecuación 7.

$$n(\%) = \frac{M_s - M_0}{M_s - M_h} \times 100 \quad (\text{ecuación 7})$$

Tanto la composición mineralógica como la porosidad accesible influyen en la permitividad eléctrica de un material. Este parámetro fundamental influye en la penetración del campo eléctrico ya que esta propiedad mide la capacidad del material para permitir el paso de líneas de campo eléctrico y, al mismo tiempo, su tendencia a polarizarse en respuesta a dicho campo. Esta propiedad está relacionada con la susceptibilidad (χ), o la facilidad de un dieléctrico a ser polarizado.

Como modelo para determinar la permitividad eléctrica de roca, como sistema compuesto por varios minerales, se ha empleado el modelo de Lichtenecker o modelo logarítmico, el cual permite predecir, hasta cierto punto, la constante dieléctrica efectiva del material en función de las permitividades de sus constituyentes (Tabla 3-1) y sus volúmenes fraccionarios presentes en el material. Este modelo se puede derivar de las ecuaciones de Maxwell si se asume que la carga se conserva, tanto en el material compuesto como en sus componentes, y que los componentes están orientados de manera aleatoria.

$$\ln(\varepsilon_m) = \sum f_i \ln(\varepsilon_i) \quad (\text{ecuación 8})$$

Donde ε_m es la permitividad de la matriz mineral, f_i son las fracciones volumétricas de cada mineral y ε_i su permitividad correspondiente.

Medio/mineral	ε_r
Aire	1
Agua destilada	80
Cuarzo	4,5
Feldespato potásico	5,5
Anortita	6,5
Moscovita	6,0
Biotita	7,0
CaCO ₃	8,0

Tabla 3-1 Permitividad eléctrica de distintos minerales y medios.

Teniendo en cuenta la porosidad accesible del material y la saturación de sus poros, la permitividad se puede estimar a partir de uno de los siguientes modelos:

-Modelo CRIM (Método del Índice de Refracción Complejo), el cual se utiliza para estimar la permitividad de medios porosos constituidos por tres fases (sólida, líquida y gaseosa)

$$\sqrt{\varepsilon_r} = (1 - n)\sqrt{\varepsilon_m} + S_w n \sqrt{\varepsilon_f} + (1 - S_w)n \sqrt{\varepsilon_a} \quad \text{(ecuación 9)}$$

-Modelo Lichtenecker

$$\ln(\varepsilon_r) = (1 - n)\ln(\varepsilon_m) + n\ln(\varepsilon_f) \quad \text{(ecuación 10)}$$

Donde ε_r es la permitividad de la roca, n es la porosidad accesible, S_w el grado de saturación en agua, ε_f es la permitividad del fluido y ε_a la permitividad del aire.

Para la realización de los ensayos de penetración del campo eléctrico en laboratorio se usaron dos muros, uno de granito y otro de calcarenita, presentes en las instalaciones del CUD-ENM. Los muros se componen de tres hiladas de sillares unidos al tresbolillo con mortero de cal hidráulica NHL5 y arena de granito en proporción 1:3. La dimensión final de los muros es de 120 cm de largo, 100 cm de alto y 21 cm de fondo. Los muros se encuentran montados dentro de dos maceteros que permiten almacenar un fluido.



Figura 3-2 Muro de calcarenita empleado en el desarrollo del trabajo. Elaboración propia.



Figura 3-3 Muro de granito empleado en el desarrollo del trabajo. Elaboración propia.

3.2 Preparación de los muros

Previamente a la realización de los ensayos, y con objeto de reducir la influencia del diferente grado de saturación en agua en distintas zonas del muro, se procedió a humedecerlos durante 2 semanas. Para ello se llenaron hasta la mitad las cestas con agua para provocar el ascenso de humedad por capilaridad desde la zona baja del muro. Además, se cubrieron los muros con esponjas absorbentes y se procedió a humedecerlos periódicamente a fin de garantizar que la humectación se produjese en toda la altura.



Figura 3-4 Imagen de ambos muros mientras se humedecían tanto por la parte superior con los trapos como con el agua de la parte inferior. Elaboración propia.

Transcurridas las dos semanas, y con el objeto de conocer cómo se distribuyó la humedad por cada muro, se procedió a registrar la humedad superficial mediante el uso de un Protimeter Surveymaster de dos picas que permite medir la presencia de humedad hasta aproximadamente 19-25 mm de profundidad en función de la densidad del material.

El resultado de las mediciones se expresa en unidades WME (Wood Moisture Equivalent), que representan una equivalencia de humedad basada en el comportamiento eléctrico del material. Aunque el objeto de estudio son materiales pétreos, se ha empleado la escala WME debido a que es el estándar de calibración de la mayoría de los equipos de inspección de humedad por contacto.



Figura 3-5 Imagen del protímetro empleado durante la medición de humedad. Elaboración propia.

Para conocer la distribución de la humedad y poder realizar dicho mapeo, se creó una retícula de áreas de medición en intervalos de 10 cm tanto a lo largo como a lo ancho, quedando 11 intervalos en el eje x y 7 en el eje y. Las mediciones se realizaron en los puntos de intersección de la retícula, lo que permitió obtener una matriz de valores de humedad que posteriormente se usaron para realizar un mapeo de la distribución de humedad empleando para ello una interpolación estadística usando el método kriging de interpolación y el software Surfer.

Durante los ensayos posteriores, que se explicarán en detalle en los siguientes apartados y que se realizaron a lo largo de las siguientes semanas, se mantuvo el proceso de absorción capilar.



Figura 3-6 Muro de calcarenita en los que se realizan los ensayos con un ejemplo de la retícula en la que se realizan las mediciones con el protímetro, además de la distribución del eje xy que se usa como referencia.
Elaboración propia.

3.3 Ensayos realizados

3.3.1 Material empleado

Para la realización de los ensayos se emplearon electrodos de grafito de $41 \times 6,6$ cm, los cuales se colocaron sobre la superficie de los muros. Este material es inerte y no es polarizable, algo fundamental para tratar de analizar la penetrabilidad del campo cuando se trabaja con corriente continua.

Con el objetivo de garantizar un buen contacto eléctrico entre los electrodos y el material, se utilizó una mezcla de celulosa con agua. Este material permite mantener una humedad adecuada en la zona de contacto, mejorando así la conductividad eléctrica entre el electrodo y la superficie del muro. Además, el material permitirá, llegado el momento, almacenar las sales que se pudieran movilizar durante el ensayo.

La tensión eléctrica se suministró mediante una fuente de corriente continua, lo que permitió aplicar diferencias de potencial constantes durante periodos prolongados de tiempo. Esto resulta necesario para reproducir las condiciones de funcionamiento de los tratamientos electrocinéticos.

Las variables eléctricas del sistema se midieron mediante multímetros digitales. Uno de ellos se dispuso en serie con el circuito para registrar la intensidad de corriente que circula a través del material, mientras que el otro se utilizó para medir las diferencias de potencial entre los distintos electrodos empleados en el sistema.

3.3.2 Montaje 1. Caída de potencial con tres electrodos

El primer montaje evaluado consistió en colocar tres electrodos, dos móviles sobre una misma superficie (electrodos 1 y 2) y otro fijo, situado en el punto medio de los dos anteriores, sobre la superficie opuesta (electrodo 3). Al aplicar una diferencia de potencial entre los dos electrodos de la

misma cara, se genera un campo eléctrico en el interior del material. Al tercer electrodo se le aplica un potencial conocido de 1V para evitar que se polarice y que el potencial alcanzado en este electrodo varíe.

La presencia del electrodo 3 permite realizar mediciones transversales a lo largo del muro y no solo superficiales.

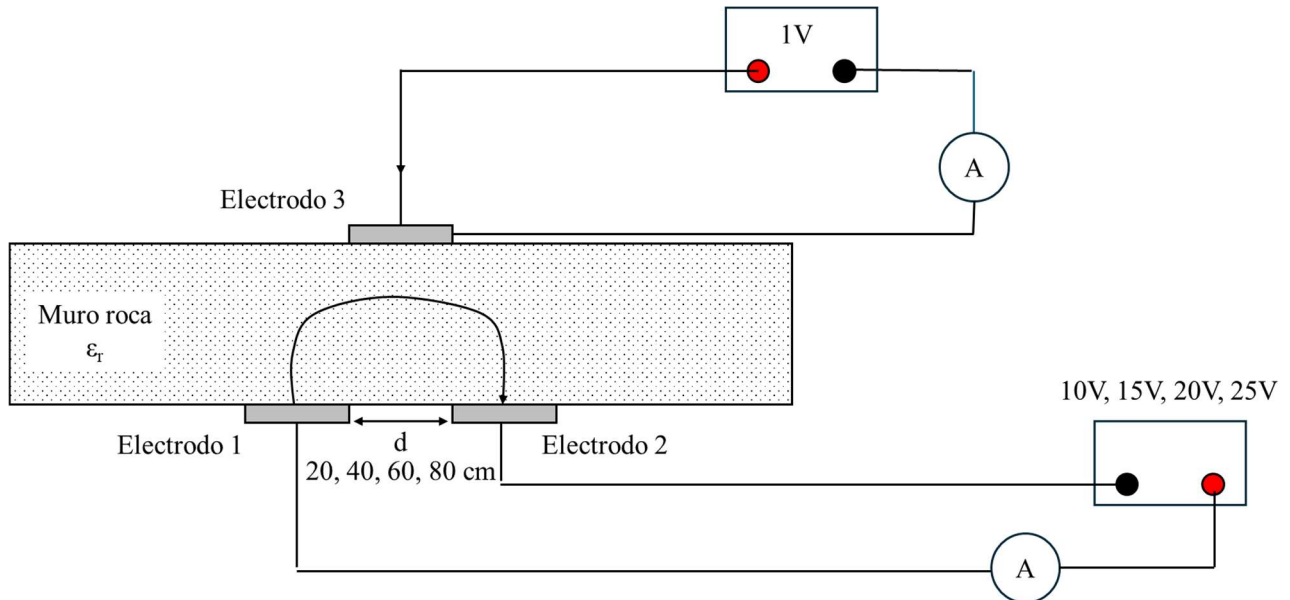


Figura 3-7 Ensayo de distribución de potencial con los electrodos separados 20 cm en el muro de calcarenita.
Elaboración propia.

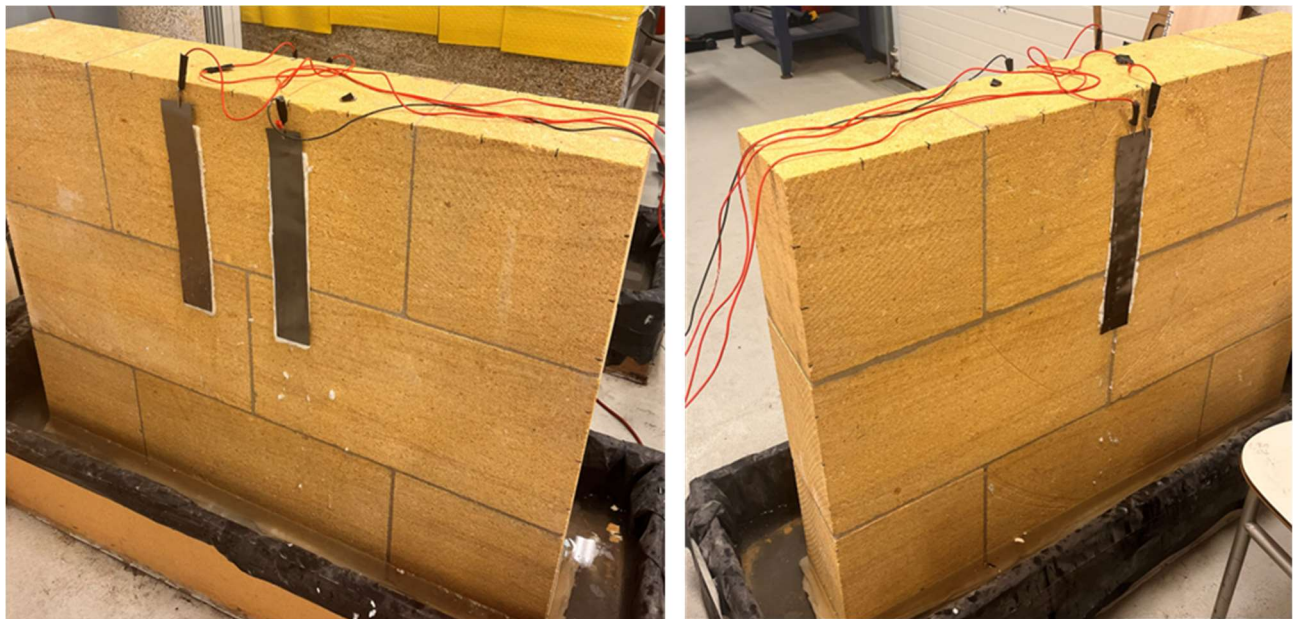


Figura 3-8 Colocación del electrodo E3 durante ensayo de distribución de potencial en la cara opuesta a los electrodos E1 y E2. Elaboración propia.

En el desarrollo de este ensayo se consideraron tres variables principales: la distancia entre electrodos, la tensión eléctrica aplicada y la intensidad de corriente resultante. De estas, la distancia entre electrodos y la tensión aplicada fueron variables controladas, mientras que la intensidad se registró como variable dependiente del sistema.

La separación entre los electrodos situados en una misma cara del muro varió de forma progresiva en un rango comprendido entre 20 y 80 cm, con el objetivo de analizar la influencia de la distancia en la

distribución del campo eléctrico en el material. Por su parte, la tensión aplicada se modificó entre 10 y 25 V, realizándose incrementos regulares de 5 V, lo que permitió estudiar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de excitación eléctrica.

El procedimiento experimental seguido consistió en aplicar, para cada configuración de distancia entre electrodos, los distintos niveles de tensión previamente establecidos. Para cada una de estas configuraciones, se realizaron mediciones de diferencia de potencial entre las distintas combinaciones de electrodos disponibles: E1–E2, E1–E3 y E2–E3. De este modo, fue posible obtener tres valores independientes de diferencia de potencial para cada ensayo, lo que permitió caracterizar de forma más completa la distribución del potencial eléctrico en el sistema.

La realización de los ensayos variando tanto la distancia entre electrodos como la tensión aplicada responde a la necesidad de caracterizar de forma completa el comportamiento eléctrico del material.

Por un lado, la variación de la distancia entre electrodos permite analizar cómo se distribuye el campo eléctrico en el interior del material. A medida que aumenta la separación, el volumen de material afectado por el paso de corriente también se incrementa, lo que permite obtener información no solo de la zona superficial, sino también de regiones más profundas. De este modo, es posible detectar variaciones en las propiedades eléctricas del material en función de la profundidad o de la distancia recorrida por la corriente.

Además, el uso de diferentes tensiones permite mejorar la calidad de los datos obtenidos, ya que a voltajes más bajos pueden aparecer problemas de sensibilidad en la medida, mientras que a voltajes más altos se obtiene una señal más clara, siempre dentro de un rango que no altere significativamente el material. En definitiva, aumentar la tensión de 10 V a 25 V no aumenta la profundidad de penetración de forma directa; lo que hace es aumentar la intensidad del campo y la densidad de corriente en todos los puntos.

3.3.3 Montaje 2. Movilización iónica

Para la realización del montaje del ensayo de movilización iónica se emplearon dos electrodos, colocados sobre una misma cara del muro. En la cara opuesta se dispuso una papeta de celulosa mezclada con cloruro de sodio y agua ultrapura, la cual se utilizó como medio para simular la presencia de contaminantes iónicos en el material.

Esta configuración permite reproducir de forma controlada el proceso de desalación electrocinética, facilitando la observación del movimiento de los iones cloruro a través del material bajo la acción del campo eléctrico aplicado. De este modo, es posible analizar la eficacia del sistema en la movilización de este anión, así como la evolución de la distribución iónica en el interior del muro durante el ensayo.

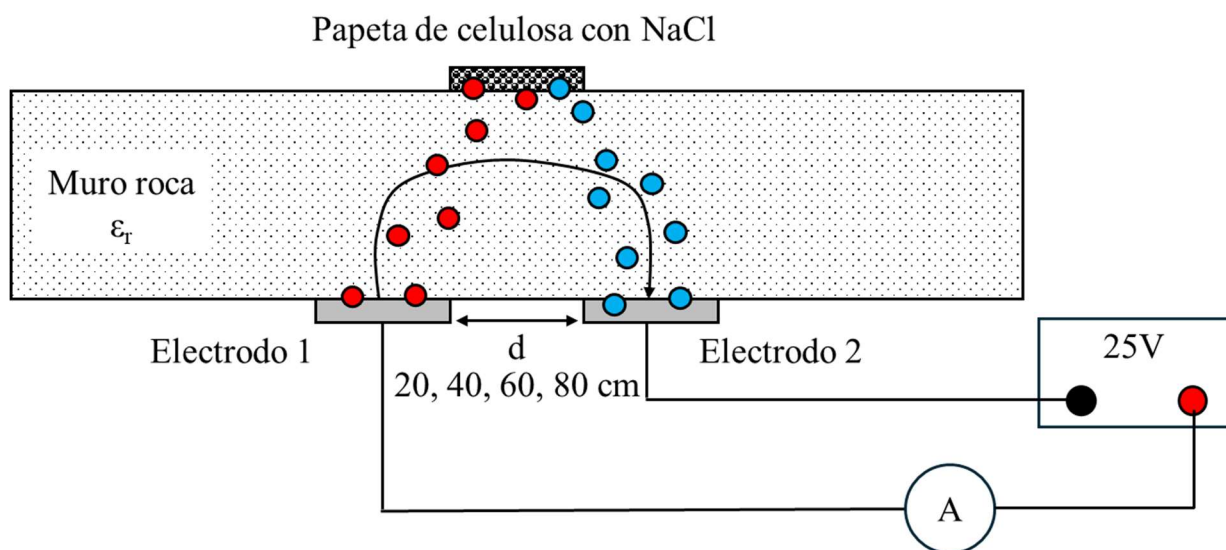


Figura 3-9 Ensayo con la primera muestra con una separación de 20 cm en el muro de calcarenita. Elaboración propia.



Figura 3-10 Colocación de la papeta de celulosa y sales colocada en la cara contraria a los electrodos durante los ensayos. Elaboración propia.

Al igual que en el ensayo anterior, el montaje experimental se llevó a cabo de forma idéntica en ambas muestras de material, manteniéndose tanto la disposición de los electrodos como las condiciones generales de trabajo, con el objetivo de asegurar la comparabilidad de los resultados obtenidos.

En este caso, la única variable modificada fue la distancia entre electrodos, manteniéndose constante la tensión aplicada. El ensayo comenzó con una separación inicial de 20 cm, aplicando una diferencia de potencial de 25 V durante un período de 2 horas. Durante este tiempo, el campo eléctrico generado en el interior del material provoca el desplazamiento de los iones presentes, principalmente Cl^- y Na^+ , mediante fenómenos de migración iónica y, en menor medida, electroósmosis.

El fundamento de este ensayo se basa en la capacidad que tiene el campo eléctrico para movilizar los iones presentes en la papeta hacia las proximidades de los electrodos, ocasionando por tanto una

reducción en la cantidad iónica inicial presente en la papeta. Esta movilización vendrá influenciada por la intensidad de corriente que llegue a afectar a la papeta. A mayor intensidad de corriente, mayor será la movilización iónica que tendrá lugar.

Transcurridas las 2 horas de aplicación de la tensión, se retiró la muestra de papeta y se dejó funcionar el sistema durante otras 2 horas adicionales. Este período de reposo se introduce con el objetivo de permitir que los procesos iniciados durante la fase activa continúen desarrollándose. Esto contribuye a completar el proceso de desalación y a estabilizar el sistema antes de la siguiente medición o ensayo.

Una vez completado este ciclo de 4 horas, se procedió a colocar una nueva muestra, incrementando la distancia entre electrodos hasta 40 cm, y repitiendo el mismo procedimiento experimental.

Este proceso se llevó a cabo de forma sistemática, aumentando progresivamente la separación entre electrodos hasta alcanzar los 80 cm. La variación de esta distancia permite analizar la influencia de la distribución del campo eléctrico en la eficacia del proceso de desalación, ya que a mayores separaciones el campo eléctrico se distribuye de manera diferente en el interior del material, afectando al movimiento de los iones y, por tanto, al rendimiento del tratamiento.

3.4 Evaluación de la eficacia en los montajes planteados

Una vez establecido el montaje de los distintos ensayos, es necesario evaluar la eficacia de estos. Para ello, y en función del tipo de ensayo realizado, se han empleado distintos métodos de análisis que permiten valorar el comportamiento del sistema.

En particular, se analizan tanto los resultados obtenidos en los ensayos de distribución de potencial como en los ensayos de migración iónica. En el primer caso, el estudio de la caída de potencial permite caracterizar cómo se distribuye el campo eléctrico en el interior del material y evaluar la influencia de variables como la distancia entre electrodos o la tensión aplicada. Por su parte, los ensayos de migración iónica permiten valorar la capacidad del sistema para movilizar y redistribuir las sales presentes en el material mediante la acción del campo eléctrico.

De este modo, el análisis conjunto de ambos ensayos proporciona una visión más completa del comportamiento eléctrico del sistema y de la eficacia del proceso electrocinético, así como de su posible aplicación en condiciones reales.

3.4.1 Montaje 1. Caída de potencial con tres electrodos

A partir de las lecturas registradas durante el ensayo se procedió a analizar el comportamiento del sistema evaluando la resistencia y la resistividad aparente a determinadas distancias mediante las ecuaciones 11 y 12.

$$R = V/I \quad \text{(ecuación 11)}$$

$$\rho_a = k \frac{V}{I} \quad \text{(ecuación 12)}$$

donde k es el factor geométrico, que según el montaje empleado en este estudio y teniendo en cuenta que se emplean electrodos lineales (con mayor longitud que anchura) y paralelos a lo largo de la misma superficie, se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$k = \frac{\pi L}{\ln\left(\frac{2d}{w}\right)} \quad \text{(ecuación 13)}$$

donde L es la longitud del electrodo, w la anchura del electrodo y d la distancia entre ellos. Para cada una de las distancias, este factor de escala toma los siguientes valores

Distancia entre electrodos	K
20 cm	0,71
40 cm	0,52
60 cm	0,44
80 cm	0,40

Tabla 3-2 Relación entre la distancia entre electrodos con el factor geométrico.

A partir de las lecturas de potencial eléctrico se realizó un análisis de la distribución del campo eléctrico. Concretamente se determinaron los siguientes parámetros:

- Gradiente de potencial superficial E (V/m)

$$E = \frac{\Delta V_{1-2}}{a} \quad \text{(ecuación 14)}$$

- Densidad de carga superficial σ (C/m²)

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad \text{(ecuación 15)}$$

- Asimetrías del material a partir de la comparativa entre ΔV_{1-3} y ΔV_{2-3} . Si estos valores son distintos quiere decir que el muro no es homogéneo debido a variaciones en la humedad, presencia de fisuras o problemas con el contacto electrodo-roca.

- Coeficiente de penetración P

$$P = \frac{\Delta V_{salida}}{\Delta V_{entrada}} \cong \frac{\Delta V_{1-3}}{\Delta V_{1-2}} \quad \text{(ecuación 16)}$$

sí $P \approx 1$ hay una alta penetración, mientras que si $P \ll 1$ el campo apenas penetra.

3.4.2 Montaje 2. Movilización iónica

Debido a la naturaleza del segundo ensayo, en el que se pretende comprobar la presencia y evolución de las sales contenidas en la mezcla empleada, las muestras obtenidas en cada ensayo fueron recogidas y enviadas al CACTI para su posterior análisis.

Previamente al envío de las muestras fue necesario realizar una extracción acuosa de las papetas recogidas, siguiendo para ello el siguiente protocolo:

- Secado de las papetas en estufa a 70°C
- Molienda de la papeta en mortero para homogeneizar la muestra.
- Toma de un peso conocido, en este caso 7 g de papeta, e inmersión en un volumen de agua ultrapura conocido (50 ml).
- Agitación de la mezcla en centrífuga durante 2 h.
- Filtración a vacío del extracto acuoso.

A partir de este extracto acuoso se determina la concentración del anión, en este caso del ion cloruro, mediante cromatografía iónica, empleando para ello un Cromatógrafo de líquidos dionex ics3000.

Dado que todas las papetas empleadas proceden de una misma papeta madre, las muestras que presenten una menor concentración iónica serán aquellas que se han visto influenciadas en mayor medida por un campo eléctrico más intenso.

3.5 Simulación de la distribución y penetrabilidad del campo eléctrico

La penetrabilidad del campo eléctrico, mediante la aplicación del montaje 1, se simuló mediante el software matemático MATLAB. Para ello se diseñó un código, que viene recogido en el anexo III, en el que era necesario introducir los siguientes parámetros para cada una de las simulaciones a realizar:

Parámetros para introducir	Parámetros fijados
Permitividad de la roca (ϵ_r) - Granito = 8,31 - Calcarenita = 19,96 Separación entre electrodos (d) - Gap $\rightarrow$ 20, 40, 60, 80 Potencial electrodo 1 - V1 $\rightarrow$ 10, 15, 20, 25 Corriente conocida (A) Conductividad (inverso de la resistividad)	Parámetros geométricos del muro - Ancho del muro $L_x = 0,3$ m - Espesor del muro $L_y = 0,15$ m Dimensiones de los electrodos - Ancho del electrodo = 0,04 m Potencial electrodo 2 y 3 - V2 = 0 - V cara opuesta = 1

Tabla 3-3 Tabla en la que se incluyen aquellos parámetros que deberán cambiarse en el código de MATLAB.

A partir de los gráficos generados es posible identificar, la forma del campo eléctrico producido y el alcance de su profundidad. En el código se ha establecido que se calcule la profundidad a la cual la intensidad se atenúa un 50%.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propiedades de los materiales

Tanto la composición mineralógica obtenida mediante difracción de rayos X como la porosidad accesible de ambas rocas se recogen en la Tabla 4-1., pudiendo apreciarse que tal y como cabría esperarse debido a la naturaleza de ambas rocas, la calcarenita muestra una mayor porosidad que el granito.

	Granito	Calcarenita
Porosidad accesible (%)	7,81±0,22	27,85±1,26
Composición mineralógica (%)		
Cuarzo	25.6	11
Feldespato potásico	26.4	
Anortita	30.7	
Moscovita	11.6	
Biotita	5.7	
CaCO ₃		89

Tabla 4-1 Composición mineralógica y porosidad de los materiales empleados.

Teniendo en cuenta estos parámetros mineralógicos y la porosidad accesible de cada material y atendiendo a los modelos descritos en el apartado de metodología para la estimación de la permitividad eléctrica, se aprecia que:

1. La permitividad de la matriz mineral del granito es:

$$Ln(\varepsilon_m) = 0,256Ln(4,5) + 0,246Ln(5,5) + 0,307Ln(6,5) + 0,116Ln(6,0) + 0,057Ln(7,0)$$

$$\varepsilon_m - granito = 5,6$$

2. Mientras que para la calcarenita:

$$Ln(\varepsilon_m) = 0,89Ln(8,0) + 0,11Ln(4,5)$$

$$\varepsilon_m - calcarenita = 7,5$$

Incorporando la influencia de la porosidad del material y la saturación de sus poros, el valor de la permitividad de cada material, determinado mediante los modelos CRIM y Lichtenecker, sería el recogido en la Tabla 4-2.

	Granito	Calcarenita
Modelo CRIM		
Seco	5,12	5,08
Saturado en agua	8,31	19,96
Modelo Lichtenecker		
Seco	4,91	4,27
Saturado en agua	6,91	14,48

Tabla 4-2 Comparativa de los modelos CRIM y Lichtenecker en estado seco y saturado en agua.

A partir de los valores de permitividad eléctrica obtenidos, se aprecia que en estado seco ambos materiales presentan valores de permitividad relativamente bajos y similares. El granito muestra valores ligeramente superiores (5,12 en el modelo CRIM y 4,91 en el modelo Lichtenecker) frente a la calcarenita (5,08 y 4,27, respectivamente), lo que indica que, en ausencia de agua, sus propiedades dieléctricas son comparables, aunque con una leve mayor capacidad de polarización en el granito. Sin embargo, las diferencias se acentúan notablemente en estado saturado en agua. En estas condiciones, la calcarenita presenta un incremento mucho más significativo de la permitividad (19,96 según CRIM y 14,48 según Lichtenecker) en comparación con el granito (8,31 y 6,91, respectivamente). Este comportamiento pone de manifiesto: 1) una mayor capacidad de la calcarenita para retener agua, lo que puede atribuirse a su mayor porosidad accesible y a una red de poros más conectada y 2) pese a que ambos pueden ser considerados como materiales aislantes, la calcarenita será más conductora que el granito en condiciones húmedas.

Finalmente, al comparar ambos modelos (CRIM y Lichtenecker), se observa que el modelo CRIM proporciona sistemáticamente valores más elevados de permitividad que el modelo Lichtenecker en todos los casos. No obstante, ambos modelos mantienen la misma tendencia, lo que refuerza la fiabilidad de los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas.

4.2 Mapeo de humedad y estado hídrico previo al ensayo

En medios porosos como los materiales pétreos ensayados, el campo eléctrico no se distribuye de manera uniforme, sino que depende de la conductividad eléctrica del material, la cual está condicionada por factores como el contenido de humedad, la concentración de sales disueltas y la conectividad de la red porosa. En zonas donde la conductividad es mayor, el potencial tiende a distribuirse de forma más homogénea, lo que se traduce en gradientes de potencial más bajos. Por el contrario, en regiones más resistivas, el potencial presenta variaciones más acusadas, dando lugar a gradientes más elevados. Esta variación en la caída de potencial puede, por tanto, asociarse a diferentes características del material. Una mayor humedad o concentración de sales favorecen la conducción eléctrica, reduciendo las diferencias de potencial entre puntos cercanos. De igual forma, una red porosa más conectada facilita el paso de corriente, mientras que una estructura más compacta o seca dificulta la conducción y provoca mayores gradientes de potencial.

Las siguientes figuras muestran la distribución de humedad registrada en cada una de las caras de ambos muros antes de la realización del ensayo 1 (es decir, empleando un electrodo de referencia en la cara posterior).

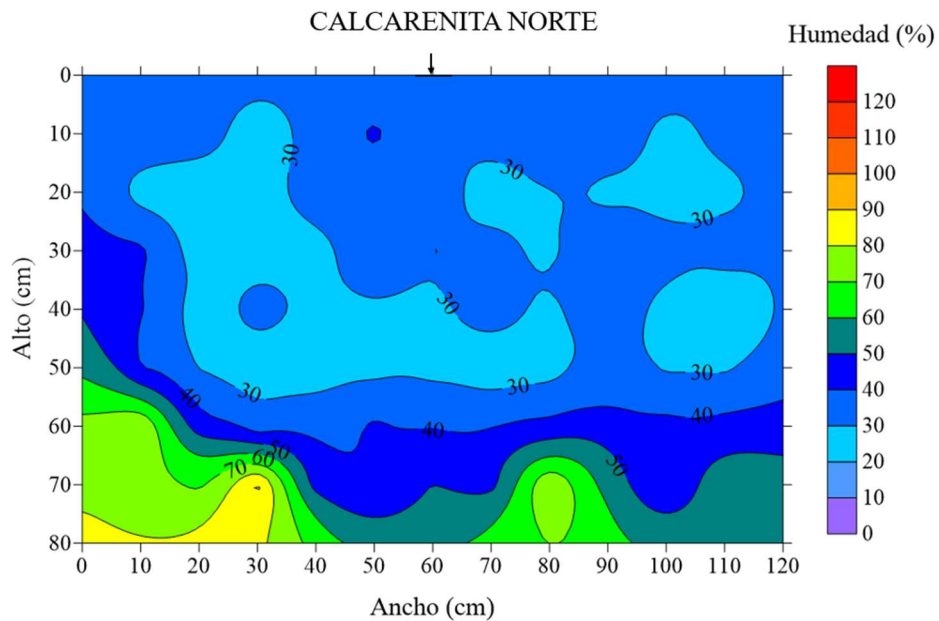


Figura 4-1 Mapa de distribución de humedad de la cara norte del muro de calcarenita. La flecha indica el lugar de colocación del tercer electrodo.

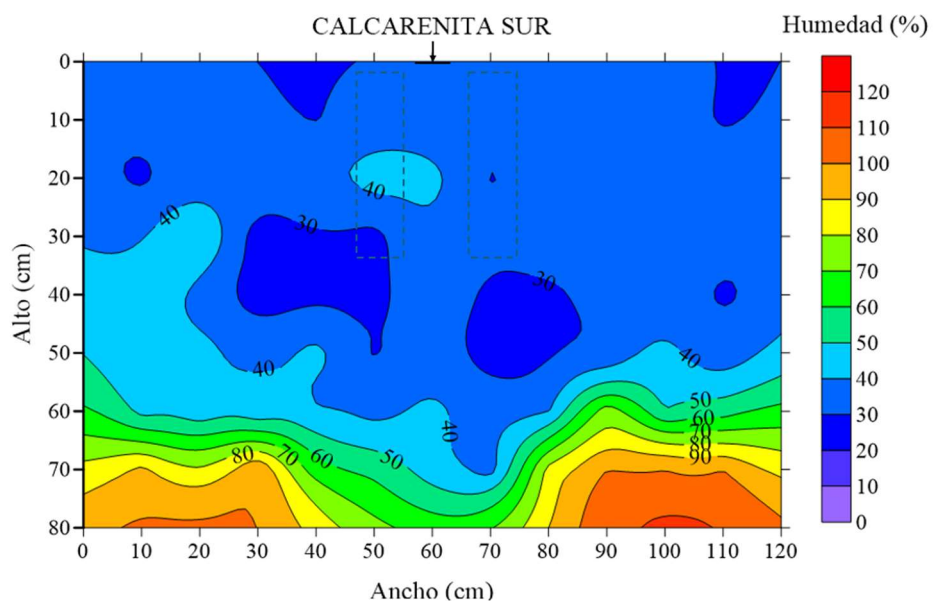


Figura 4-2 Mapa de distribución de humedad en la cara sur del muro de calcarenita. Se representan las posiciones de los electrodos al inicio de los ensayos, posteriormente se irá ampliando la separación.

Se puede apreciar en todos los casos que los mayores contenidos de humedad se encuentran en la parte baja de los muros, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que estos están absorbiendo agua por capilaridad ya que los cajones en los que se encuentran los muros están llenos de agua del grifo.

En el caso de la calcarenita se aprecia que a la altura a la que se sitúan los electrodos (2 móviles sobre la fachada sur y 1 fijo sobre la fachada norte), los valores de humedad se mantienen prácticamente constantes en torno al 30-40%, lo que limita la influencia del grado de saturación en la interpretación de las medidas.

En el granito predominan niveles moderados de humedad en torno al 20-30% en las zonas de medición y valores altos en las zonas próximas a la zona de contacto con el agua. En este material la transición entre ambas zonas.

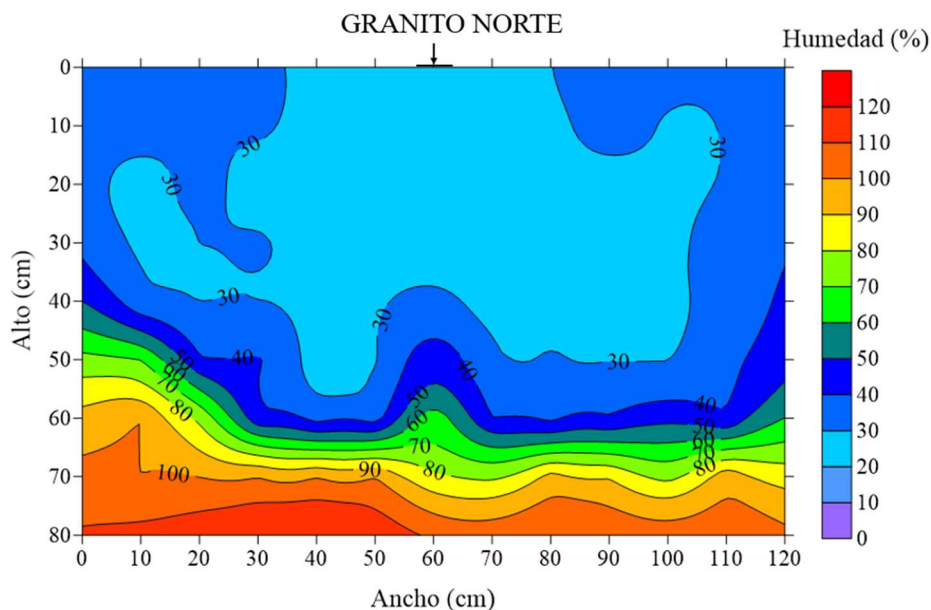


Figura 4-3 Mapa de distribución de humedad de la cara norte del muro de granito. La flecha indica el lugar de colocación del tercer electrodo.

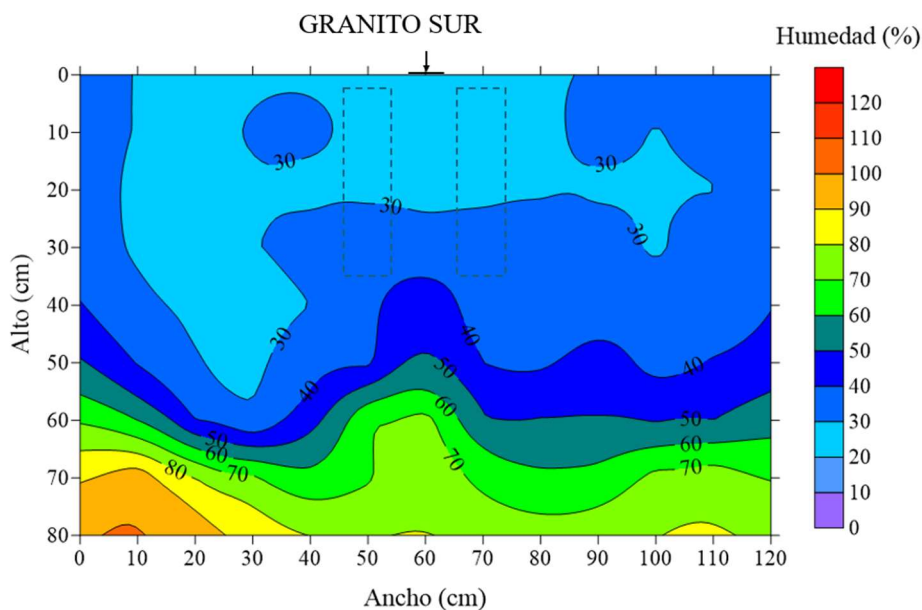


Figura 4-4 Mapa de distribución de humedad en la cara sur del muro de granito. Se representan las posiciones de los electrodos al inicio de los ensayos, posteriormente se irá ampliando la separación.

Comparativamente entre rocas se aprecia que el granito se encuentra más húmedo en su parte baja, lo cual podría estar relacionado con una mayor capacidad de succión capilar, pero presenta un menor grado de humectación en la zona de medición, en torno a un 20-30% de humedad, esto podría estar relacionado con su menor porosidad accesible.

4.3 Caída de potencial con tres electrodos (montaje 1)

La Figura 4-5 muestra que el sistema hay un comportamiento lineal entre el voltaje aplicado y la intensidad que circula, es decir, que el sistema presenta un comportamiento óhmico y apenas presenta

efectos capacitivos. Este hecho indica que la resistencia del muro se mantiene constante independientemente del voltaje o corriente que circula a través de él.

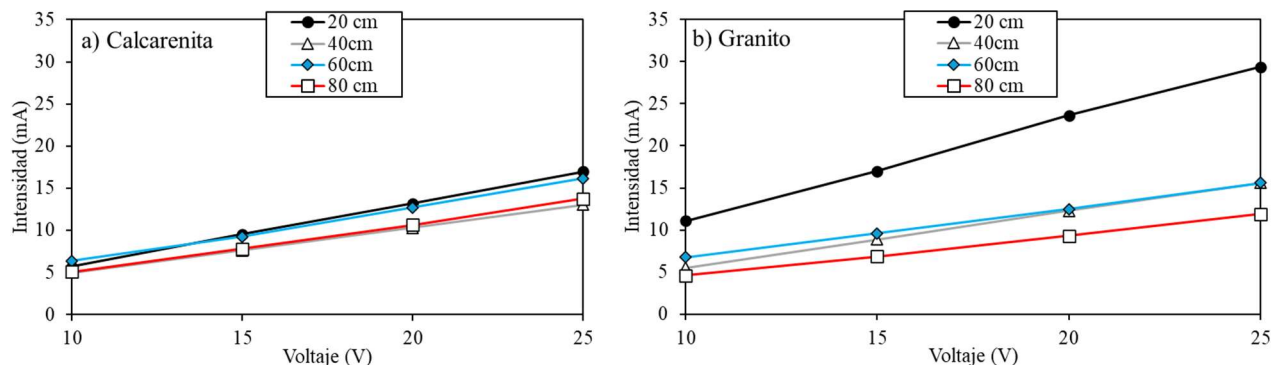


Figura 4-5 Evolución de los parámetros eléctricos de ambos muros a distintas distancias y voltajes aplicados.

En cuanto a la resistividad, se observa que en la mayoría de las configuraciones el valor tiende a la estabilidad frente al voltaje, aunque se aprecia una ligera tendencia decreciente al aumentar el potencial, especialmente en las distancias menores. Esto suele ocurrir en materiales porosos o rocas porque un mayor potencial puede ayudar a superar pequeñas barreras de potencial de contacto o efectos capacitivos en los poros del material.

En el caso de la calcarenita la resistividad va disminuyendo a medida que se incrementa la distancia entre electrodos. Esto pone de manifiesto que a mayor profundidad (mayor separación), el campo eléctrico debe estar atravesando zonas menos resistivas. Estas zonas quizás presentan un mayor contenido de humedad por el propio menisco que se genera durante el proceso de absorción capilar, o son zonas menos alteradas que presentan menos oquedades que la zona superficial.

Por el contrario, el granito muestra un comportamiento más errático donde las curvas se cruzan (por ejemplo, la de 40 cm y 80 cm), lo que pone de manifiesto la anisotropía y heterogeneidad interna de la roca, donde la resistividad no sigue un gradiente lineal con la profundidad.

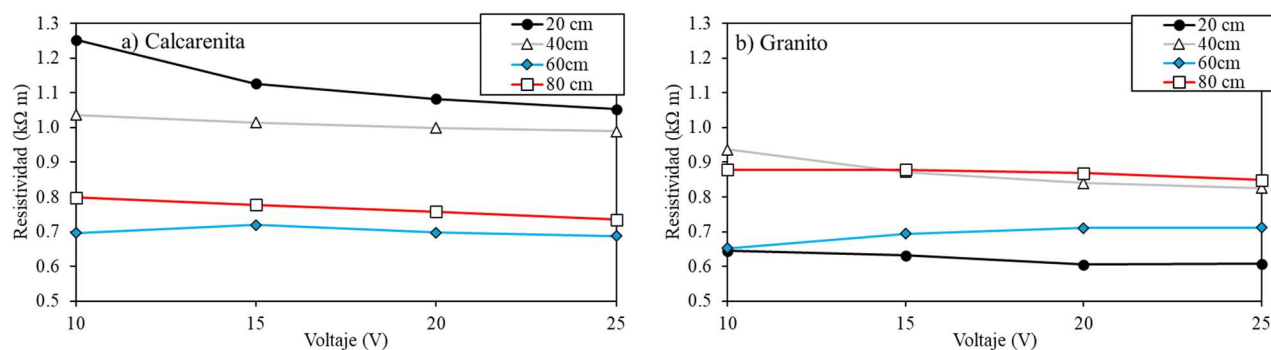


Figura 4-6 Evolución de la resistividad eléctrica en función de la distancia entre electrodos y voltaje aplicado.

Las diferencias de potencial registradas entre los distintos electrodos, ΔV_{1-2} , ΔV_{1-3} y ΔV_{2-3} , muestran que:

1. Independientemente del material y del potencial aplicado, la caída de potencial ΔV_{1-2} mantiene un comportamiento similar a lo largo de todas las distancias evaluadas.
2. Las caídas de potencial ΔV_{1-3} y ΔV_{2-3} son distintas lo que demuestra que el medio no es homogéneo y que por tanto existen discontinuidades, ya sea en el contenido de humedad o estructurales por la existencia de fracturas o poros de distinto tamaño, que van a influir en la distribución del campo eléctrico. Esto también podría estar relacionado con pérdidas de

contacto entre electrodo y papeta, aunque se ha tratado minimizar este aspecto manteniendo un mayor control durante la realización del ensayo.

3. Comparativamente, y pese a que en la calcarenita se perdieron los valores registrados en los ensayos a 20, 40 y 60 cm, la ratio entre ambos potenciales se situó en torno a 1. Este hecho indica que este material es más homogéneo en el transporte de la corriente que el granito, lo que concuerda con las lecturas de resistividad mostradas anteriormente.

	GRANITO				CALCARENITA			
20 cm	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio
10V	9.5	5.4	3.8	1.4	9.7	5.3		
15V	14.3	8.3	5.8	1.4	14.6	8.0		
20V	19.6	11.5	8.06	1.4	19.4	10.5		
25V	24.2	14.1	9.8	1.4	24.1	12.9		
40 cm	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio
10V	9.8	5.6	4.1	1.4	9.8	5.4		
15V	14.7	8.5	6.1	1.4	14.7	8.1		
20V	19.6	11.4	8.2	1.4	19.6	10.8		
25V	24.2	14.0	9.9	1.4	24.3	13.2		
60 cm	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio
10V	9.8	7.3	2.5	2.9	9.6	5.5		
15V	14.7	10.5	4.2	2.5	14.7	8.0		
20V	19.6	13.8	5.8	2.4	19.5	10.7		
25V	24.5	17.0	7.3	2.3	24.2	13.0		
80 cm	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio	ΔV_{1-2}	ΔV_{1-3}	ΔV_{2-3}	Ratio
10V	10.0	6.4	3.6	1.8	9.7	5.1	4.6	1.1
15V	14.8	9.5	5.3	1.8	14.7	7.5	7.1	1.1
20V	19.7	12.7	7.0	1.8	19.5	10.0	9.4	1.1
25V	24.5	15.8	8.5	1.9	24.4	12.7	11.5	1.1

Tabla 4-3 Caídas de potencial registradas entre los electrodos del montaje. Se muestra además el ratio existente entre las caídas de los electrodos móviles aplicados sobre una misma superficie y el electrodo fijo situado en la cara opuesta.

De los datos de campo eléctrico en superficie y densidad de carga, Tabla 4-4, se deduce que al aumentar el voltaje se produce un incremento en estos dos parámetros. Al pasar de 10 V a 20 V, la densidad de carga prácticamente se duplica. Esto confirma que el material se comporta como un dieléctrico lineal en este rango de tensiones.

Con respecto a la distancia entre electrodos, se aprecia que existe una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor distancia, menor intensidad de campo y menor densidad de carga, a pesar de mantener el mismo voltaje. Al aumentar la distancia, el campo "pierde fuerza" en la superficie porque las líneas de corriente se hunden más profundamente en el muro (buscan el camino de menor resistencia a través del volumen de la roca), reduciendo la densidad de carga acumulada en la interfaz electrodo-roca.

Finalmente, con respecto al tipo de roca, se aprecia una diferencia mínima en seco, esto se debe a que las permitividades relativas de ambos materiales son muy similares. Sin embargo, sí que se aprecian diferencias si se tiene en cuenta el grado de saturación ya que en este caso la calcarenita presenta valores de densidad de carga hasta 4 veces superiores a las del granito. Esto se debe a que la calcarenita presenta una mayor porosidad y por tanto una mayor capacidad de albergar agua, lo que ocasiona que tenga una mayor capacidad de almacenamiento de carga que el granito.

DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN DEL CAMPO
ELÉCTRICO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

	GRANITO			CALCARENITA		
20 cm	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)
10V	47.5	2.2	3.5	48.6	2.2	8.6
15V	71.5	3.2	5.3	73.0	3.3	12.9
20V	97.9	4.4	7.2	97.0	4.4	17.1
25V	121.0	5.5	8.9	120.5	5.4	21.3
40 cm	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)
10V	24.5	1.1	1.8	24.5	1.1	4.3
15V	36.7	1.7	2.7	36.7	1.7	6.5
20V	48.9	2.2	3.6	49.0	2.2	8.7
25V	60.5	2.7	4.5	60.8	2.7	10.7
60 cm	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)
10V	16.4	0.7	1.2	16.0	0.7	2.8
15V	24.6	1.1	1.8	24.4	1.1	4.3
20V	32.7	1.5	2.4	32.6	1.5	5.8
25V	40.8	1.9	3.0	40.3	1.8	7.1
80 cm	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)	E sup. (V/m)	σ-seco (nC/m²)	σ-sat (nC/m²)
10V	12.5	0.6	0.9	12.2	0.6	2.2
15V	18.5	0.8	1.4	18.3	0.8	3.2
20V	24.6	1.1	1.8	24.4	1.1	4.3
25V	30.6	1.4	2.3	30.5	1.4	5.4

Tabla 4-4 Campo eléctrico y densidad de carga, tanto para material seco como para material saturado.

		GRANITO	CALCARENITA
20 cm	10V	0.57	0.55
	15V	0.58	0.54
	20V	0.59	0.54
	25V	0.58	0.54
	PROMEDIO	0.58	0.54
40 cm	10V	0.57	0.55
	15V	0.58	0.55
	20V	0.58	0.55
	25V	0.58	0.54
	PROMEDIO	0.58	0.55
60 cm	10V	0.74	0.57
	15V	0.71	0.55
	20V	0.70	0.55
	25V	0.69	0.54
	PROMEDIO	0.71	0.55
80 cm	10V	0.64	0.52
	15V	0.64	0.51
	20V	0.65	0.51
	25V	0.64	0.52
	PROMEDIO	0.64	0.52

Tabla 4-5 Coeficiente de penetración P en cada uno de los casos ensayados.

Con respecto al coeficiente de penetración P (Tabla 4-5), se aprecia que la mayor penetración se debe producir a los 60 cm, mientras que en la calcarenita los mayores valores se sitúan entre 40-60 cm, aunque no hay mucha diferencia, en este caso, con respecto a las otras distancias muestreadas.

4.4 Movilización iónica (montaje 2)

En términos generales, la cantidad de cloruros remanentes en la papeta disminuye al pasar de 20 cm a 40-60 cm, pero vuelve a subir a los 80 cm. Esto se indica que:

- A 20 cm la penetrabilidad del campo es baja, es decir, aunque el campo eléctrico en la superficie es máximo (Tabla 4-4), las líneas de corriente no logran atravesar los 21 cm de espesor del muro. Por eso queda tanto cloruro en las papetas.
- Entre 40 y 60 cm se produce la mayor movilización, esto quiere decir (el campo tiene la curvatura necesaria para alcanzar la cara posterior (donde está la papeta) manteniendo todavía una intensidad de corriente suficiente para movilizar los iones. Este rango de distancia es el que se suele emplear en intervenciones en obra [56], pudiendo destacar ahora que con esta distancia, en torno a 50 cm, el campo llega a penetrar los 21 cm de espesor, es decir que la penetración se sitúa en torno a un 0,42 veces la distancia entre electrodos.
- A 80 cm baja la fuerza del campo para ocasionar la movilización de las sales. En este caso, aunque el campo eléctrico penetra de sobra, la intensidad del campo (E) es tan baja (en torno a 30 V/m) que no tiene energía suficiente para vencer la resistencia del material y mover los iones.

Comparativamente entre materiales, se aprecia que:

- Las papetas colocadas sobre el muro de granito siempre terminan con menos cloruros que la aplicadas sobre la calcarenita. Esto indica que, tal y como ya se demostró en estudios previos donde se comparan granitos con rocas sedimentarias [18], que la mayor conexión entre los poros y la menor tortuosidad de la red porosa del granito facilita que el proceso de movilización iónica sea más rápido.
- En granito el mayor rendimiento se encuentra a 40 cm mientras que en la calcarenita se encuentra a 60 cm. Esto sugiere que la longitud efectiva de penetración es mayor en el granito. Debido a su estructura mineral, el campo eléctrico se propaga con menos pérdida de energía, permitiendo alcanzar la parte trasera con una distancia de electrodos menor que en la calcarenita.

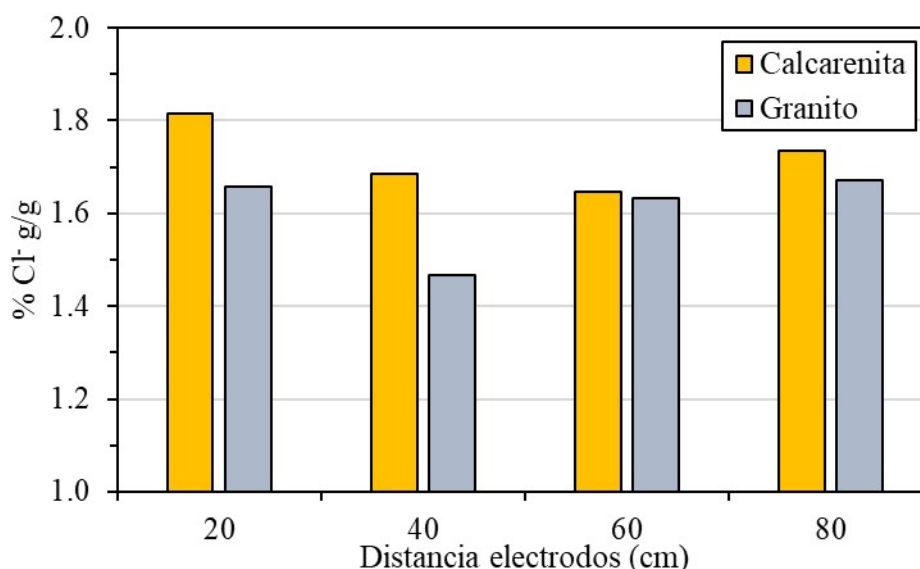


Figura 4-7 Contenido de Cl⁻ que permanece en la papeta después de las 2 h de ensayo a 25 V variando la distancia entre electrodos.

	GRANITO			CALCARENITA		
	Intensidad (mA)	Caída de potencial (V)	Resistencia (k Ω)	Intensidad (mA)	Caída de potencial (V)	Resistencia (k Ω)
20 cm						
1 min	47,7	23,8	0,50	20,8	24,1	1,16
120 min	30,2	23,8	0,79	18,8	24,4	1,30
240 min	22,6	23,8	1,05	17,2	24,4	1,42
40 cm						
1 min	83,2	23,6	0,28	17	24,1	1,42
120 min	72,7	23,6	0,32	14,4	24,4	1,69
240 min	67,9	23,6	0,35	14,1	24,4	1,73
60 cm						
1 min	59,8	24,4	0,41	14,3	24,4	1,71
120 min	23,4	24,4	1,04	11,7	24,4	2,09
240 min	11,6	24,4	2,10	10,4	24,4	2,35
80 cm						
1 min	69,6	23,1	0,33	16,4	24,5	1,49
120 min	41,9	23,9	0,57	15,3	24,5	1,60
240 min	28,1	23,5	0,84	12,0	24,5	2,04

Tabla 4-6 Evolución de la intensidad y la caída de potencial relacionado en función del tiempo. Se muestra además el valor de la resistencia.

Los datos experimentales mostraron que la movilización iónica fue mucho más efectiva en el granito ya que a igual distancia, y aplicando el mismo potencial de 25 V, las intensidades que circularon por el material fueron mucho más altas.

Se aprecia además que, en el caso del granito, las mayores intensidades se alcanzaron a 40 cm de distancia entre electrodos, indicativo de que hay una alta movilización iónica. Esta distancia concuerda con los análisis de cloruro efectuados en las papetas.

En la calcarenita, quitando la distancia de 20 cm donde la mayor circulación se produce en superficie, se aprecia que la mayor circulación también se produce a 40 cm. Sin embargo, y a diferencia de lo que ocurre en el muro de granito, las diferencias con respecto a las otras distancias no son muy marcadas.

4.5 Simulaciones realizadas con Matlab

En las siguientes figuras (Figura 4-8 y Figura 4-9) se muestra un montaje con las gráficas generadas por Matlab para diferentes escenarios ensayados, tomando como datos de partida los registrados durante la fase experimental.

En la Tabla 4-7 se muestran los valores de penetración de campo, estimada para una atenuación del 50% de la corriente eléctrica aplicada, y la densidad de carga que circula a esa profundidad, tomando como permitividad relativa del muro que este está completamente saturado.

Teniendo en cuenta los valores de la tabla se aprecia que en general la profundidad de penetración del campo es similar en todos los casos, independientemente del material y potencial aplicado. Esto indica que a esa distancia la corriente se atenúa en un 50% con respecto a la corriente total que circula en cada caso. Únicamente esta distancia aumenta ligeramente al ir aumentado la distancia entre electrodos. Esto confirma que la geometría del montaje (distancia entre ánodo y cátodo) influye más en la distribución espacial del campo que el voltaje aplicado o el tipo de material.

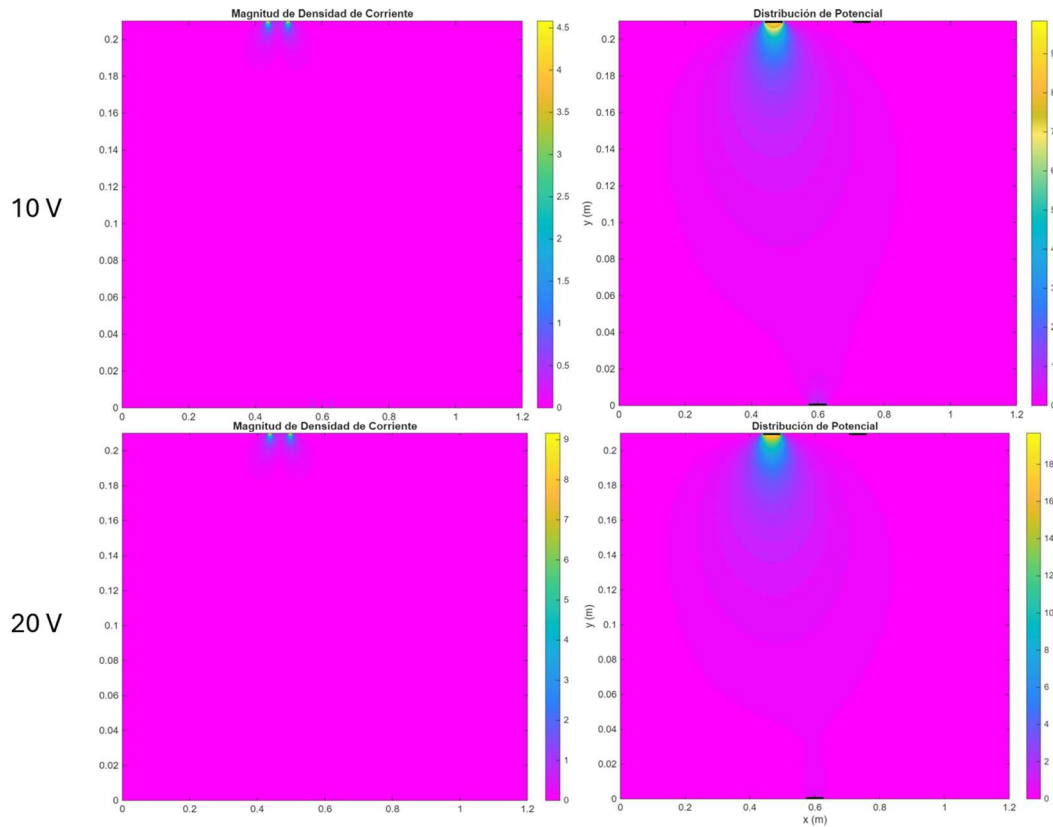


Figura 4-8 Magnitud de densidad de corriente (izquierda) y distribución de potencial (derecha) de la muestra de granito a 10 V y 20 V con una separación de electrodos de 20 cm. Las coordenadas x e y representan las dimensiones del muro visto en planta.

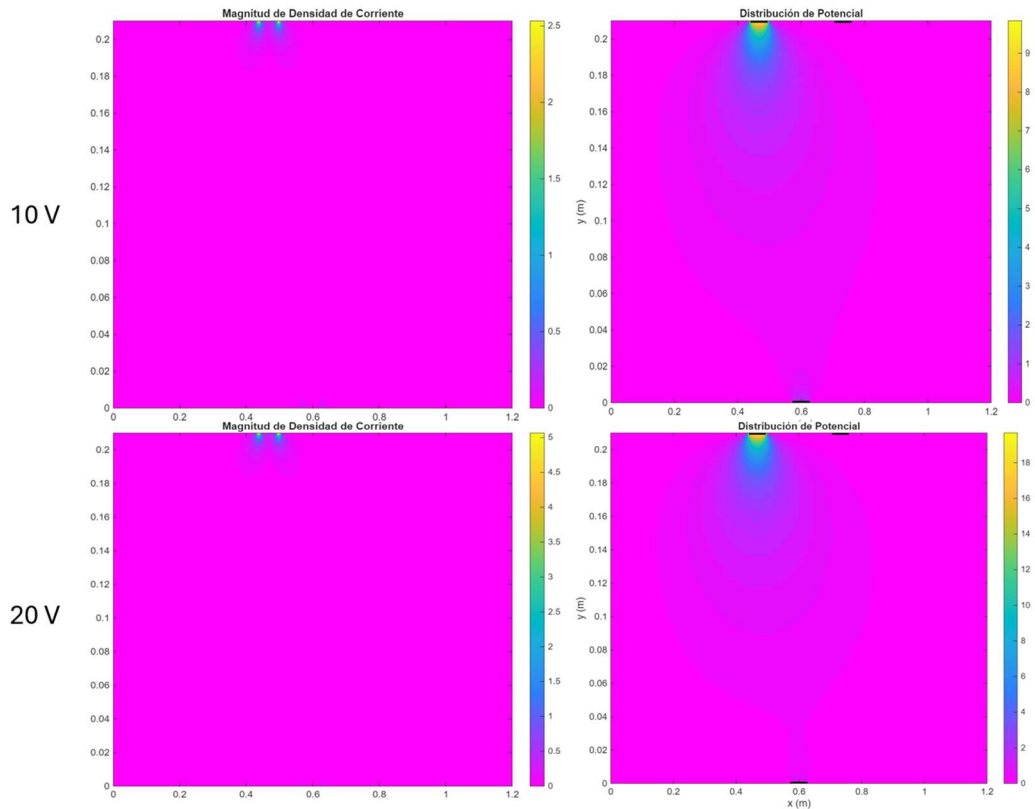


Figura 4-9 Magnitud de densidad de corriente (izquierda) y distribución de potencial (derecha) de la muestra de calcarenita a 10 V y 20 V con una separación de electrodos de 20 cm. Las coordenadas x e y representan las dimensiones del muro visto en planta.

	Distancia (cm)	GRANITO		CALCARENITA	
		Profundidad (cm)	Densidad de corriente (A/m ²)	Profundidad (cm)	Densidad de corriente (A/m ²)
10V	20	0,9367	0,17	0,9367	0,09
	40	0,9369	0,12	0,9369	0,10
	60	0,9375	0,15	0,9375	0,15
	80	0,9389	0,12	0,9389	0,14
15V	20	0,9367	0,26	0,9367	0,14
	40	0,9369	0,18	0,9369	0,16
	60	0,9375	0,23	0,9375	0,23
	80	0,9388	0,18	0,9388	0,21
20V	20	0,9367	0,34	0,9367	0,19
	40	0,9369	0,24	0,9369	0,21
	60	0,9375	0,30	0,9375	0,30
	80	0,9388	0,24	0,9388	0,28
25V	20	0,9367	0,43	0,9367	0,23
	40	0,9369	0,30	0,9369	0,26
	60	0,9375	0,38	0,9375	0,38
	80	0,9388	0,31	0,9388	0,35

Tabla 4-7 Datos de densidad de corriente y profundidad de penetración, a partir de la cual el campo se atenúa en un 50%, estimados mediante MATLAB.

Además, se aprecia que la densidad de corriente aumenta al incrementar el voltaje aplicado, siendo estos valores superiores en el granito. Esto sugiere que, a igualdad de saturación, el granito presenta una menor resistencia eléctrica o una red porosa que facilita una mayor conductividad iónica efectiva.

	Distancia (cm)	GRANITO		CALCARENITA	
		Profundidad (cm)	Densidad de corriente (A/m ²)	Profundidad (cm)	Densidad de corriente (A/m ²)
10V	20	0,9367	0,17	0,9367	0,09
	40	0,9369	0,12	0,9369	0,10
	60	0,9375	0,15	0,9375	0,15
	80	0,9389	0,12	0,9389	0,14
15V	20	0,9367	0,26	0,9367	0,14
	40	0,9369	0,18	0,9369	0,16
	60	0,9375	0,23	0,9375	0,23
	80	0,9388	0,18	0,9388	0,21
20V	20	0,9367	0,34	0,9367	0,19
	40	0,9369	0,24	0,9369	0,21
	60	0,9375	0,30	0,9375	0,30
	80	0,9388	0,24	0,9388	0,28
25V	20	0,9367	0,43	0,9367	0,23
	40	0,9369	0,30	0,9369	0,26
	60	0,9375	0,38	0,9375	0,38
	80	0,9388	0,31	0,9388	0,35

Tabla 4-8 Datos de densidad de corriente y profundidad de penetración, a partir de la cual el campo se atenúa en un 50%, estimados mediante MATLAB.

Asumiendo que el grado de humedad detectado con el termohigrómetro (Figura 4-1 y Figura 4-3) se pueda corresponder con el grado de saturación real de los muros, pese a que la medida obtenida es superficial y es una escala relativa a la humedad en madera, los valores de permitividad relativa de ambas rocas, empleando la ecuación 9, serían granito 5,83 para un grado de saturación de 0,25 y para la calcarenita de 9,17 para un grado de saturación de 0,35.

En este caso los datos obtenidos (Tabla 4-8) no varían mucho de los analizados anteriormente, mostrando las mismas tendencias antes indicadas.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Como principales conclusiones de este trabajo se destacan las siguientes:

- La penetración del campo no depende del voltaje aplicado. Este parámetro sólo afecta a la densidad de carga que va a circular. Lo cual va a influir en la mayor movilidad de iones a la profundidad alcanzada
- La penetración del campo depende de la distancia entre electrodos. A muy bajas distancias el campo apenas penetra, quedando concentrado la mayor parte en superficie, y a grandes distancias el campo se atenúa tanto que apenas es capaz de movilizar los iones.
- La distancia óptima para ambos materiales se sitúa en torno a 40-60 cm. Tomando como valor medio los 50 cm y el espesor del muro de 21 cm, se puede establecer que el campo eléctrico en corriente continua penetra en torno a 0,42 veces la distancia entre electrodos.
- Con respecto al material, se aprecia una mayor influencia de la conectividad entre los poros que el valor de permitividad relativa y de porosidad accesible. Esto explica por qué la movilización es mayor en el granito que en la calcarenita. Ajustando a los valores de movilidad iónica la penetración en el granito (máxima a 40 cm) podría estimarse de manera más exacta como 0,52 veces la distancia entre electrodos, mientras que en la calcarenita (máxima a 60 cm) quedaría en torno a 0,35 veces esa distancia.

5.2 Líneas futuras

Como líneas futuras se proponen mejoras a los montajes realizados.

Con respecto al montaje 1, se propone conectar el ramal correspondiente al electrodo 3 al muro (Figura 3-7). De esta manera es posible determinar la corriente que circula por la roca (I_3) y por tanto la impedancia del material. Con el montaje realizado en el presente TFG la intensidad aplicada en el electrodo 3 se mantenía constante.

Con esta variación y con la posibilidad de analizar la variación en la corriente total I_3 , se puede establecer que, si al aumentar la distancia d , la corriente I_3 , que será la suma de las otras dos corrientes (I_{1-3} e I_{2-3}) crece significativamente, significa que la corriente eléctrica ha alcanzado la cara opuesta.

Con este esquema se podría determinar la resistencia transversal del muro (ecuación 17), aspecto que con el montaje que realizamos no fue posible.

$$R_{1-3} = \frac{V_{1-3}}{I_{1-3}} \quad (\text{ecuación 17})$$

Este parámetro se puede determinar teniendo en cuenta que el montaje es simétrico y que por tanto se puede hacer una aproximación de manera que

$$I_{1-3} \cong \frac{I_3}{2} \quad (\text{ecuación 18})$$

Además, al conectar el electrodo 3 al muro es posible determinar los siguientes parámetros:

- **Coefficiente de Penetración Medio (α)**

Este coeficiente define qué fracción del campo eléctrico "útil" alcanza el centro del muro. Con el esquema corregido, se calcula comparando la potencia disipada en la superficie con la transversal:

$$\alpha = \frac{I_3}{I_{1-2}} \frac{L}{d} \quad (\text{ecuación 19})$$

donde L es el espesor del muro que en este caso es de 21 cm y d la distancia entre electrodos.

- **Longitud Efectiva de Penetración (δ)**

En materiales pétreos, la longitud efectiva es la profundidad a la cual la intensidad del campo cae a un valor de aproximado del 37% de su valor en superficie. Con este nuevo esquema se puede determinar la atenuación real comparando el campo en ambas caras del muro. Si la corriente I_3 es muy baja para una distancia determinada, significa que la longitud efectiva δ es menor que los 21 cm del muro.

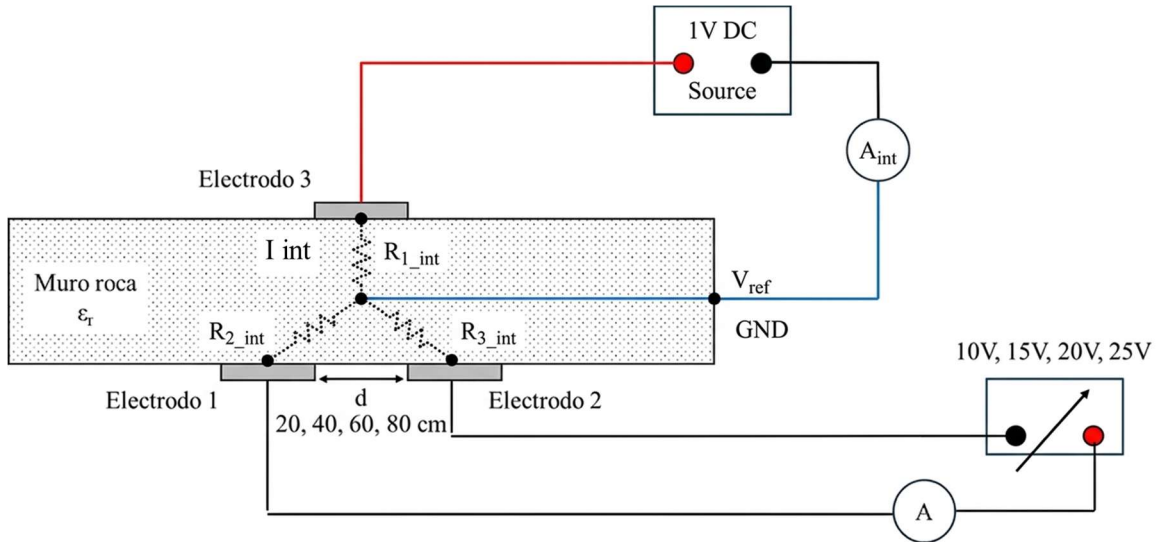


Figura 5-1 Modificación propuesta para el ensayo de distribución de potencial con los electrodos separados 20 cm en el muro de calcarenita. Elaboración propia.

Para ser más precisos, podemos calcular qué porcentaje de la corriente total circula por encima de una profundidad determinada (z). Para se puede emplear la siguiente ecuación:

$$\frac{I_z}{I_{total}} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{2z}{d}\right) \quad (\text{ecuación 20})$$

De esta manera podemos estimar a qué profundidad ha penetrado el 50% de la corriente.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] 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.
- [2] S. Siegesmund, R. Snethlage, Stone in architecture: Properties, durability, Fifth edit, 2014.
- [3] J. Feijoo, E-CODESAL – Uso de técnicas Electroquímicas para la CONsolidación y DESalación simultánea de edificaciones afectadas por SALes (PICUD-2025-01), 2025.
- [4] R.J. Flatt, N.A. Mohamed, F. Caruso, H. Derluyn, J. Desarnaud, B. Lubelli, R.M. Espinosa-marzal, L. Pel, C. Rodriguez-navarro, G.W. Scherer, N. Shahidzadeh, M. Steiger, Predicting salt damage in practice: a theoretical insight into laboratory tests, RILEM Tech. Lett. 2 (2017) 108–118. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2017.41>.
- [5] R.M. Espinosa Marzal, G.W. Scherer, Crystallization of sodium sulfate salts in limestone, Environ. Geol. (2008). <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1441-7>.
- [6] R.M. Espinosa-Marzal, G.W. Scherer, Mechanisms of damage by salt, Geol. Soc. London, Spec. Publ. (2010). <https://doi.org/10.1144/sp331.5>.
- [7] 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>.
- [8] D. Benavente, P. Brimblecombe, Salt weathering and climate change, New Trends Anal. Environ. Cult. Herit. Chem. (2008).
- [9] B. Menéndez, Estimators of the impact of climate change in salt weathering of cultural heritage, Geosci. (2018). <https://doi.org/10.3390/geosciences8110401>.
- [10] J. Unruh, A Revised Endpoint for Ceramics Desalination at the Archaeological Site of Gordion, Turkey, Stud. Conserv. (2007). <https://doi.org/10.2307/1506839>.
- [11] 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>.
- [12] 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>.
- [13] 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>.

- [14] N. Husillos-Rodríguez, P.M. Carmona-Quiroga, S. Martínez-Ramírez, M.T. Blanco-Varela, R. Fort, Sacrificial mortars for surface desalination, *Constr. Build. Mater.* 173 (2018) 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.029>.
- [15] 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>.
- [16] E. Franzoni, Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge, *Constr. Build. Mater.* 54 (2014) 123–136. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.054>.
- [17] L.M. Ottosen, I. V. Christensen, I. Rörig-Dalgård, P.E. Jensen, H.K. Hansen, Utilization of electromigration in civil and environmental engineering - Processes, transport rates and matrix changes, *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 43 (2008) 795–809. <https://doi.org/10.1080/10934520801973949>.
- [18] 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>.
- [19] J.M. Paz-García, B. Johannesson, L.M. Ottosen, A.B. Ribeiro, J.M. Rodríguez-Maroto, Simulation-based analysis of the differences in the removal rate of chlorides, nitrates and sulfates by electrokinetic desalination treatments, *Electrochim. Acta.* 89 (2013) 436–444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.087>.
- [20] J. Feijoo, O. Matyščák, L.M. Ottosen, T. Rivas, X.R. Nóvoa, Electrokinetic desalination of protruded areas of stone avoiding the direct contact with electrodes, *Mater. Struct. Constr.* 50 (2017) 1–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0946-x>.
- [21] J. Feijoo, T. Rivas, X.R. Nóvoa, L.M. Ottosen, New Double Electrode System for the Electrochemical Desalination of Building Stones, *Int. J. Archit. Herit.* 14 (2020) 678–693. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1561962>.
- [22] J. Feijoo, T. Rivas, X.R. Nóvoa, I. de Rosario, J. Otero, In situ desalination of a granitic column by the electrokinetic method, *Int. J. Archit. Herit.* 12 (2018) 63–74. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1370509>.
- [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). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118308>.
- [24] J. Feijoo, M.A. de Buergo, R. Fort, N. Aly, Experimental Study of Different Electrokinetic Configurations for Desalination of a Brick Wall, in: G.M. El-Qady, C. Margottini (Eds.), *Sustain. Conserv. UNESCO Other Herit. Sites Through Proactive Geosci.*, Springer International Publishing, Cham, 2023: pp. 89–104. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13810-2_6.
- [25] G. Skibsted, L.M. Ottosen, P.E. Jensen, J.M. Paz-Garcia, Electrochemical desalination of bricks – Experimental and modeling, *Electrochim. Acta.* 181 (2015) 24–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.03.041>.
- [26] M.S. Carracedo, *Estudio De Patologías, Técnicas De Diagnosis, Restauración Y Conservación De Materiales Pétreos*, (2013) 297.
- [27] D. Eric, Price Clifford A., *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, 2010. <http://hdl.handle.net/1811/4918>.
- [28] I. Garrido, M. Solla, S. Lagüela, N. Fernández, IRT and GPR Techniques for Moisture Detection and Characterisation in Buildings, *Sensors*. 20 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20226421>.
- [29] V. Bouteiller, Y. Tissier, E. Marie-Victoire, T. Chaussadent, S. Joiret, The application of

electrochemical chloride extraction to reinforced concrete – A review, *Constr. Build. Mater.* 351 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128931>.

- [30] P. Fernandes, Applied microbiology and biotechnology in the conservation of stone cultural heritage materials, *Appl Microbiol Biotechnol.* 73 (2006) 291–296. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0599-8>.
- [31] F. Cappitelli, P. Principi, R. Pedrazzani, L. Toniolo, C. Sorlini, Bacterial and fungal deterioration of the Milan Cathedral marble treated with protective synthetic resins, *Sci. Total Environ.* 385 (2007) 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.022>.
- [32] 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>.
- [33] N. Tsui, R.J. Flatt, G.W. Scherer, Crystallization damage by sodium sulfate, *J. Cult. Herit.* 4 (2003) 109–115. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00022-0).
- [34] R.J. Flatt, Salt damage in porous materials: How high supersaturations are generated, *J. Cryst. Growth.* (2002). [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)01429-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)01429-X).
- [35] 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>.
- [36] J. Feijoo, D. Ergenç, R. Fort, M.Á. de Buergo, Addition of ferrocyanide-based compounds to repairing joint lime mortars as a protective method for porous building materials against sodium chloride damage, *Mater. Struct. Constr.* 54 (2021). <https://doi.org/10.1617/S11527-020-01596-4>.
- [37] D. Ergenç, J. Feijoo, R. Fort, M. Alvarez de Buergo, Effects of potassium ferrocyanide used for desalination on lime composite performances in different curing regimes, *Constr. Build. Mater.* 259 (2020) 120409. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120409>.
- [38] 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>.
- [39] A. Zornoza-Indart, Técnicas de desalación, *La Conserv. Los Geomateriales Util. En El Patrim.* (2012) 143–154. <http://hdl.handle.net/10261/46809>.
- [40] J. Correia, F. Matero, Calcium tartrate tetrahydrate preconsolidation of salt-contaminated limestone at mission San José y San Miguel de Aguayo, *J. Am. Inst. Conserv.* (2008). <https://doi.org/10.1179/019713608806112160>.
- [41] J. Feijoo, I. de Rosario, T. Rivas, M.J. Mosquera, R. Benavides, Influence of a Pre-consolidation Treatment on the Desalination Effectiveness of a Highly Deteriorated Granite Façade of Medieval Age, *Int. J. Archit. Herit.* 17 (2023) 1965–1983. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2086506>.
- [42] L.M. Ottosen, C.M.D. Ferreira, I. V. Christensen, Electrokinetic desalination of glazed ceramic tiles, in: *J. Appl. Electrochem.*, 2010: pp. 1161–1171. <https://doi.org/10.1007/s10800-010-0086-x>.
- [43] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, L.M. Ottosen, Enhancing the efficiency of electrochemical desalination of stones: a proton pump approach, *Mater. Struct.* 51 (2018) 100. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1224-x>.
- [44] 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>.

- [45] J. Feijoo, L.S. Gomez-Villalba, R. Fort, M.E. Rabanal, Simultaneous desalination and consolidation treatment through the application of electrokinetic techniques, *Constr. Build. Mater.* 408 (2023) 133686. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133686>.
- [46] N. Eslami, J. Feijoo, J. Paz-García, E. Franzoni, L.M. Ottosen, Measuring electroosmotic permeability coefficient in single bricks, *J. Mater. Civ. Eng.* (2024).
- [47] N. Eslami, J. Feijoo, J.M. Paz-Garcia, E. Franzoni, L.M. Ottosen, Electroosmotic permeability in kaolinite and CaCO₃ poultice mixtures, *J. Cult. Herit.* 68 (2024) 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.05.015>.
- [48] J. Feijoo, L.M. Ottosen, X.R. Nóvoa, T. Rivas, I. de Rosario, An improved electrokinetic method to consolidate porous materials, *Mater. Struct.* 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1063-1>.
- [49] J. Feijoo, L.S. Gomez-Villalba, A. de los Ríos, R. Fort, Electroprecipitation of inorganic borates, with different solubility, within monumental stones to avoid fungal colonization, *Constr. Build. Mater.* 368 (2023) 130435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130435>.
- [50] 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>.
- [51] H. Vanhala, P. Lintinen, A. Ojala, Electrical resistivity study of permafrost on Ridnitšohkka fell in northwest Lapland, Finland, *Geophysica.* 45 (2009) 103–118.
- [52] L. Mol, H.A. Viles, The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone, *Earth Surf. Process. Landforms.* 37 (2012) 301–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.2252>.
- [53] Georys ingenieros S.A.C, Método De Tomografía Eléctrica, *Inf. Técnico.* (2017) 1–7. www.georys.com.
- [54] R. Fort, J. Feijoo, M.J. Varas-Muriel, M.A. Navacerrada, M.M. Barbero-Barrera, D. De la Prida, Appraisal of non-destructive in situ techniques to determine moisture- and salt crystallization-induced damage in dolostones, *J. Build. Eng.* 53 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104525>.
- [55] UNE-EN 1936:2007, Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity, (n.d.).
- [56] 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>.

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

Durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado, centrado en la determinación de la penetración del campo eléctrico en materiales de construcción, el estudio de estas tecnologías no queda únicamente en el laboratorio, sino que tiene aplicaciones de gran relevancia como la gestión de infraestructuras críticas ya que precisa de una responsabilidad ética orientada a velar por la integridad de activos públicos de gran valor estratégico. Optar por técnicas no destructivas representa una apuesta por la eficiencia, evitando soluciones superficiales que derivarían en un gasto innecesario de recursos y en el deterioro irreversible del patrimonio.

En el ámbito social y de seguridad, este trabajo tiene una repercusión directa en la operatividad de las instalaciones y en la protección de usuarios. La degradación debido a la acción de sales puede comprometer la estabilidad mecánica de muelles y edificaciones. La investigación realizada para determinar la profundidad efectiva del campo eléctrico sirve de base para determinar que los tratamientos de desalación sean efectivos en todo el espesor del material, asegurando así que las infraestructuras sigan siendo entornos de trabajo seguros.

Desde el punto de vista ambiental, el enfoque de este estudio se centra en la sostenibilidad al priorizar la conservación del material original. Al alargar la vida útil de las estructuras pétreas mediante electrocinética, se reduce drásticamente la necesidad de extraer materiales, reduciendo significativamente la huella de carbono que dichos procesos producen.

Respecto al aspecto económico e industrial, estos resultados permiten una gestión optimizada del mantenimiento. La validación de la profundidad de actuación del campo eléctrico permite ajustar tanto el consumo como los tiempos de intervención en elementos constructivos de gran espesor. De forma que justificaría la viabilidad industrial de estas técnicas permitiendo acometer planes de rehabilitación a mayor escala de forma que resultase más rentable y fuera técnicamente sólido.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Desde una perspectiva ética, existe la responsabilidad de garantizar la integridad, durabilidad y correcta conservación de los activos que forman parte del patrimonio público. En este contexto, el presente estudio constituye un compromiso con la gestión eficiente y responsable de los recursos disponibles. El empleo de métodos de conservación no destructivos y que hayan sido validados, evita que las intervenciones sean ineficaces lo que, en el largo plazo, implicaría un mayor coste económico y un deterioro irreversible de estructuras de gran valor tanto histórico como estratégico.

Al mismo tiempo, este trabajo presenta una gran dimensión social relacionada con la seguridad operativa del personal militar y civil que desarrolla sus funciones en instalaciones portuarias o edificios auxiliares. Desde el punto de vista ético resulta prioritario el desarrollo de herramientas que permitan el diagnóstico y la solución de dichos problemas de forma que puedan solventarse lo más rápidamente posible.

Por último, el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo bajo los mismos principios de rigor científico y honestidad intelectual. La validación de los modelos teóricos mediante simulaciones en distintos softwares, junto con la realización de distintos ensayos experimentales sobre muestras reales, es una respuesta a la necesidad ética de fundamentar las soluciones propuestas en datos objetivos. Esta integridad metodológica resulta esencial para asegurar que las decisiones derivadas, sean transparentes, responsables y orientadas a la conservación del patrimonio y al bienestar de la sociedad.

ANEXO III: CÓDIGO EMPLEADO EN MATLAB

A continuación, se muestra el código empleado para llevar a cabo la simulación mediante MATLAB, destacando en amarillo, las líneas de código donde fue necesario meter los datos de entrada en función del potencial aplicado, distancia entre electrodos y material empleado.

```
clc; clear; close all;

%% =====
%   DATOS DE ENTRADA
% =====

% Propiedades del material
epsilon0 = 8.854e-12;
épsilon = 8.31;          % Permitividad relativa
épsilon = epsilon0*epsilon_r;

sigma = 0.00161;         % Conductividad (S/m)

% Geometría del muro
Lx = 1.2;                % Ancho del muro (m)
Ly = 0.21;               % Espesor del muro (m)

% Mallado
Nx = 200;
Ny = 120;

% Electrodoes superiores
electrode_width = 0.06;
electrode_height = 0.005; % Altura hacia dentro del muro
gap = 0.2;               % Distancia entre electrodos

V1 = 10;                 % Potencial electrodo 1
V2 = 0;                  % Potencial electrodo 2

I_known = 0.00571;       % Corriente conocida (A)
```

```
% Electrodo inferior (cara opuesta)
V_bottom = 1;          % Caída de potencial conocida

%% =====
%   DISCRETIZACIÓN
% =====

dx = Lx/(Nx-1);
dy = Ly/(Ny-1);

x = linspace(0, Lx, Nx);
y = linspace(0, Ly, Ny);

V = zeros(Ny, Nx);

%% =====
%   DEFINICIÓN ELECTRODOS
% =====

center = Lx/2;

e1_start = center - gap/2 - electrode_width;
e1_end   = center - gap/2;

e2_start = center + gap/2;
e2_end   = center + gap/2 + electrode_width;

e1_idx = find(x >= e1_start & x <= e1_end);
e2_idx = find(x >= e2_start & x <= e2_end);

% Aplicar potencial en electrodos superiores
V(end, e1_idx) = V1;
V(end, e2_idx) = V2;

% Electrodo inferior centrado
```

```

bottom_width = electrode_width;
b_start = center - bottom_width/2;
b_end = center + bottom_width/2;
b_idx = find(x>=b_start & x<=b_end);

V(1,b_idx) = V_bottom;

%% =====
% SOLUCIÓN NUMÉRICA
% =====

tolerance = 1e-5;
error = 1;
max_iter = 15000;
iter = 0;

while error > tolerance && iter < max_iter
    V_old = V;

    for i = 2:Ny-1
        for j = 2:Nx-1

            if (i == Ny && (ismember(j,e1_idx)||ismember(j,e2_idx))) ...
                || (i == 1 && ismember(j,b_idx))
                continue
            end

            V(i,j) = 0.25*( V(i+1,j)+V(i-1,j)+ ...
                V(i,j+1)+V(i,j-1) );

        end
    end

    error = max(max(abs(V - V_old)));
    iter = iter + 1;
end

```

```
fprintf('Iteraciones: %d\n',iter);

%% =====
%   CAMPO Y CORRIENTE
% =====

[Ey, Ex] = gradient(-V,dy,dx);

Jx = sigma*Ex;
Jy = sigma*Ey;

Jmag = sqrt(Jx.^2 + Jy.^2);

% Cálculo de corriente total a través del electrodo 1
I_calc = sum(Jy(end,e1_idx))*dx;

fprintf('Corriente calculada: %.6f A\n',I_calc);
fprintf('Corriente conocida: %.6f A\n',I_known);

%% =====
%   GRÁFICAS
% =====

figure;
contourf(x,y,V,60,'LineColor','none');
colorbar;
title('Distribución de Potencial');
xlabel('x (m)'); ylabel('y (m)');
hold on
plot(x(e1_idx),Ly*ones(size(e1_idx)),'k','LineWidth',4)
plot(x(e2_idx),Ly*ones(size(e2_idx)),'k','LineWidth',4)
plot(x(b_idx),zeros(size(b_idx)),'k','LineWidth',4)

figure;
quiver(x,y,Jx,Jy);
```

```

title('Líneas de Densidad de Corriente');

figure;
contourf(x,y,Jmag,60,'LineColor','none');
colorbar;
title('Magnitud de Densidad de Corriente');

%% =====
% PROFUNDIDAD 50% CORRIENTE
% =====

% Tomamos el centro del electrodo 1
j_center = round(mean(e1_idx));

% Perfil vertical de densidad de corriente (magnitud)
J_profile = Jmag(:, j_center);

% Valor máximo (en superficie)
J_surface = J_profile(end);

% Valor al 50%
J_target = 0.5 * J_surface;

% Buscar dónde cruza ese valor
idx = find(J_profile <= J_target, 1, 'last');

if ~isempty(idx) && idx < Ny
% Interpolación lineal para mayor precisión
y1 = y(idx);
y2 = y(idx+1);
J1 = J_profile(idx);
J2 = J_profile(idx+1);

y_50 = y1 + (J_target - J1)*(y2 - y1)/(J2 - J1);

```

```
J_50 = J_target;
```

```
% Profundidad desde la superficie
```

```
profundidad = Ly - y_50;
```

```
fprintf('\n=== PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN (50%%) ===\n');
```

```
fprintf('Profundidad: %.6f m\n', profundidad);
```

```
fprintf('Densidad de corriente en ese punto: %.6f A/m^2\n', J_50);
```

```
% Visualización en el perfil
```

```
figure;
```

```
plot(J_profile, y, 'b', 'LineWidth', 2); hold on;
```

```
plot(J_50, y_50, 'ro', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2);
```

```
set(gca, 'YDir', 'reverse')
```

```
xlabel('J (A/m^2)');
```

```
ylabel('Profundidad (m)');
```

```
title('Perfil de penetración de corriente');
```

```
legend('Perfil J', 'Punto 50%');
```

```
else
```

```
warning('No se encontró el punto de 50%% de atenuación');
```

```
end
```

ANEXO IV: USO ÉTICO Y RESPONSABLE DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante el proceso de elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado se han utilizado diversas herramientas digitales basadas en inteligencia artificial con el objetivo de mejorar la calidad formal del documento y optimizar la claridad de algunos de sus elementos textuales y gráficos. El uso de estas herramientas se ha limitado exclusivamente a tareas de apoyo técnico, manteniéndose en todo momento la autoría intelectual del contenido, del análisis realizado y de las conclusiones obtenidas como responsabilidad exclusiva del autor del trabajo.

En primer lugar, se ha recurrido a sistemas de inteligencia artificial como herramienta de apoyo en la revisión ortográfica, gramatical y estilística de los textos. Estas herramientas han permitido mejorar la coherencia sintáctica, la precisión terminológica y la fluidez de la redacción, facilitando la corrección de errores tipográficos, el ajuste de la puntuación y la mejora de la claridad expositiva. Su utilización ha tenido un carácter estrictamente auxiliar, actuando como un recurso de revisión lingüística que contribuye a mejorar la presentación final del documento sin sustituir en ningún momento el proceso de elaboración intelectual del contenido.

Asimismo, en el desarrollo del trabajo se han elaborado diversas figuras, esquemas e imágenes de carácter ilustrativo, algunas de ellas generadas inicialmente por el propio autor con fines explicativos. Con el fin de garantizar una adecuada calidad visual y facilitar su correcta interpretación dentro del documento, en determinados casos se han empleado herramientas de inteligencia artificial para mejorar la resolución, la nitidez o el contraste de dichas imágenes, optimizando así su legibilidad y su integración en el formato final del trabajo.

Finalmente se ha utilizado la ayuda de chatgpt para la generación del código de Matlab.

En consecuencia, todas las ideas, interpretaciones, análisis y conclusiones presentadas en este trabajo son fruto del estudio y de la elaboración personal del autor, mientras que las herramientas de inteligencia artificial han desempeñado únicamente una función de apoyo en tareas de revisión lingüística y mejora visual de determinados recursos gráficos.