



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Determinación de la velocidad electro-osmótica en materiales de construcción.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ignacio Pedrós Martínez-Vares

DIRECTORES: Jorge Feijoo Conde

Jesús del Val García

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Determinación de la velocidad electro-osmótica en materiales de construcción.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La electro-ósmosis es un fenómeno que permite mover las moléculas del agua cuando se establece un campo eléctrico a través de un medio poroso. Este tipo de técnicas se han mostrado eficaces en la movilización de agua en suelos, sin embargo, su eficacia en materiales de construcción para controlar la humedad ascendente en muros todavía genera una gran controversia. Su uso actual por parte de empresas especialistas en humedades no está demostrado, ya que estas empresas aplican un conjunto de técnicas simultáneamente como son, la inyección de hidrofugantes, para generar una barrera frente al ascenso capilar, o el uso de morteros desecantes. El presente trabajo se centrará en determinar la existencia del fenómeno electro-osmótico a través de diferentes tipos de ladrillos, variando los parámetros eléctricos a aplicar. Los resultados alcanzados en este trabajo demuestran que es posible movilizar el agua en los materiales de construcción, existiendo una gran influencia de la densidad de corriente aplicada, de manera que a mayor densidad de corriente el tiempo necesario para movilizar el agua es menor. Además, se observó que la presencia de una elevada microporosidad en la estructura del material afecta negativamente a la velocidad de movilización del agua.

PALABRAS CLAVE

Agua, Electro-Ósmosis, Ladrillo, Porosidad, Construcción

AGRADECIMIENTOS

Han pasado cinco años y son muchas las historias, dificultades y alegrías vividas en la Escuela Naval militar y son muchas las personas que han estado a mi lado tanto cerca como lejos, queriendo hacer mención especial a las siguientes:

A mis padres por haberme apoyado y ayudado a conseguir ingresar en la Armada Española, objetivo que desde pequeño tuve en mente y del que tan orgulloso me siento.

A mi hermano Manuel por aguantarme con una paciencia inigualable y del que espero que pronto siga mis pasos a bordo de un avión de combate.

A todos mis abuelos por ser ejemplo y guía, en especial a mi abuela Chari, que sé que le hubiese encantado verme completar esta etapa.

A Doña Andrea por ser mi apoyo diario incondicional y por haber hecho cada día de estos cinco años mejor que el anterior.

A toda mi promoción que se ha convertido en mi segunda familia y, en especial, a la punta de lanza que tantos momentos buenos y llenos de risas me han permitido vivir.

Por último, me gustaría darles las gracias a mis tutores, en especial al profesor Feijoo por su absoluta dedicación a mi trabajo, el trato recibido por su parte y la cantidad de horas que ha pasado a mi lado en el laboratorio solventando todos los problemas que han ido surgiendo a lo largo del trabajo.

CONTENIDO

Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción y motivación.	6
1.2 Objetivos.	6
1.3 Estructura de la memoria.	7
2 Estado del arte	9
2.1 El agua como agente de alteración.....	9
2.2 Vías de entrada de agua.	9
2.3 Mecanismos de alteración directa.	13
2.3.1 Procesos de alteración físico-mecánicos.	13
2.3.2 Procesos de alteración químicos.	14
2.3.3 Otros procesos de alteración.	15
2.4 Mecanismos de alteración indirecta.	16
2.4.1 Problemática de las sales solubles.	16
2.4.2 Problemática de la alteración biológica.	19
2.5 Técnicas para la conservación de los materiales de construcción.....	20
2.6 Principio de Electro-Ósmosis.....	24
2.6.1 Fórmulas que rigen el principio de Electro-Ósmosis.	25
2.6.2 Aplicabilidad del principio de Electro-Ósmosis.....	26
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Materiales y métodos.	29
3.1.1 Materiales de construcción empleados.	29
3.1.2 Montajes realizados.	32
3.1.2.1 Montaje en serie.	33
3.1.2.2 Montaje en paralelo.	35
3.2 Proceso de medición del coeficiente electro-osmótico.	37
4 Resultados	39
4.1 Propiedades de los ladrillos.....	39
4.2 Flujo Electro-osmótico.....	42
5 Conclusiones y líneas futuras	47
5.1 Conclusiones y cumplimiento de objetivos.	47
5.2 Líneas Futuras.	48

6 Bibliografía.....	49
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	54
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Resumen gráfico TFG.....	8
Figura 2-1. Humedad por penetración directa en el CASI de la ENM.	10
Figura 2-2. Humedades por condensación en el aula 8 de la ENM.	10
Figura 2-3. Mancha de humedad asociada a la absorción de agua por parte de las sales solubles (compuestos higroscópicos) en iglesia de Cádiz.....	11
Figura 2-4. Experimento capilaridad.....	12
Figura 2-5. Comparación agua (izquierda) y mercurio (derecha).	12
Figura 2-6. Deterioro de fachada por expansión hídrica.	13
Figura 2-7. Daños causados por sales solubles en muro del centro de Cádiz.	16
Figura 2-8. Cristalización de sales solubles en pared cercana al puesto de correos de la ENM.	19
Figura 2-9. Proliferación de microorganismos en pared del patio de aulas.	20
Figura 2-10. Origen de humedades.	21
Figura 2-11. Capa drenante.	22
Figura 2-12. Creación de arcos en los edificios.	22
Figura 2-13. Inyección de barrera hidrofugante.....	23
Figura 2-14. Método Knapen. Higroconvector.	23
Figura 2-15. Principio de Electro-Ósmosis.	24
Figura 3-1. Determinación del coeficiente de absorción capilar.....	30
Figura 3-2. Zetasizer Nanoseries.....	32
Figura 3-3. Diseño en Autodesk Inventor del tubo capilar.	32
Figura 3-4. Corte montaje en serie.	33
Figura 3-5. Montaje real en serie.....	35
Figura 3-6. Corte montaje con puente salino.....	35
Figura 3-7. Montaje real puente salino.....	36
Figura 4-1. Volumen poroso acumulado respecto al diámetro de poro para ambos ladrillos.	40
Figura 4-2. Grado de saturación (%) respecto al tiempo ($s^{0.5}$).	41
Figura 4-3. Contenido de agua (kg/m^2) respecto al tiempo ($s^{0.5}$).	41
Figura 4-4. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo rojo.	42
Figura 4-5. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo amarillo.	42
Figura 4-6. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo rojo y amarillo comparando en altas intensidades.	44
Figura 4-7. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo rojo y amarillo comparando en bajas intensidades.	44
Figura 4-8. Flujo de agua ($kg/m^2 s$) respecto al gradiente de potencial (V/m).	45
Figura AII-1. Pared del pasillo del Departamento 4 de la ENM.	56

Figura AII-2. Monumento a D. Álvaro de Bazán en patio de aulas.	56
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Tipos de sales solubles más comunes	17
Tabla 2-2. Diferencia entre la Concentración de sales entre O. Atlántico y M. Mediterráneo	18
Tabla 4-1. Propiedades de los ladrillos.	39
Tabla 4-2. Volumen total de mercurio introducido para diferentes intervalos de tamaño de poro (en mL/g y %).	40
Tabla 4-3. Velocidad electro-osmótica en cm/s para ambos tipos de ladrillo para todas las intensidades de ensayo.	43
Tabla 4-4. Coeficiente electro-osmótico para ambos tipos de ladrillo en todas las alturas de ensayo.	45

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción y motivación.

En la actualidad, se observa una tendencia hacia la rehabilitación de edificios y estructuras en lugar de la realización de obras de nueva construcción. Esto se debe a una serie de factores, entre los que destacan la necesidad de conservar y proteger el patrimonio arquitectónico, la reducción de los costes y la disminución del impacto ambiental. Además, en muchos casos, la rehabilitación puede ser más rentable que la construcción de nuevas estructuras, ya que puede aprovechar los recursos y materiales ya existentes. Sin embargo, esto no significa que la construcción de nuevas edificaciones haya desaparecido por completo, ya que aún hay una gran demanda de nuevos espacios para vivienda en áreas en expansión o en desarrollo.

Las construcciones existentes, tanto antiguas como modernas, sufren procesos de alteración que se pueden entender como una sinergia o combinación de dos tipos de factores. Los factores intrínsecos, que incluyen la naturaleza, la composición y las propiedades del material de construcción, así como los factores extrínsecos, que incluyen el medio ambiente y los agentes externos. Estos factores determinan el mecanismo de alteración que afecta al material, ya sea físico, químico o biológico, lo que puede poner en riesgo tanto el valor de la construcción como su comportamiento mecánico. De hecho, los materiales porosos de naturaleza pétreo empleados en construcción, tales como rocas, morteros u hormigones, pueden deteriorarse tanto que la estabilidad estructural del edificio se vea comprometida llegando a declararse este en ruinas.

Entre los factores extrínsecos que provocan desperfectos en los materiales empleados en construcción destaca el agua. Este agente ha constituido, desde tiempos antiguos, un problema difícil de solucionar ya que los constructores no tenían acceso a los materiales y tecnologías que existen a día de hoy para prevenir el daño causado por el agua. A lo largo de la historia se han desarrollado diversas técnicas para proteger las estructuras contra el agua. Sin embargo, la exposición continua a este agente sigue siendo un desafío importante para su conservación, especialmente en las construcciones antiguas ya que en muchas de ellas la cimentación es superficial.

Surge así la idea de este trabajo de estudiar la problemática del agua y profundizar en el principio de la electro-ósmosis como método para la eliminación de humedades en materiales de construcción. La efectividad de este proceso está ampliamente evaluada y demostrada en suelos y arcillas, no así en materiales de construcción, suponiendo una técnica novedosa y muy poco estudiada en este ámbito.

1.2 Objetivos.

El principal objetivo de este trabajo será, ir un paso más allá, y conseguir demostrar la posibilidad de movilizar y eliminar el agua presente en materiales de construcción mediante procesos de electro-

ósmosis. A pesar de que hay empresas que venden el uso de esta técnica frente a la presencia de humedades ascendentes, su eficacia como tal, en materiales de construcción, todavía no está comprobada y sigue generando una gran controversia en la comunidad científica.

Surgen así diferentes objetivos que darán pie a la consecución de dicha demostración:

- Análisis en profundidad del estado del arte actual del agua como agente de alteración, haciendo referencia a los distintos medios de entrada de agua en las edificaciones y las técnicas para la conservación de los materiales de construcción. Dentro de estas técnicas se explicará en profundidad el principio electro-osmótico y su aplicabilidad a día de hoy.
- Caracterización de los tipos de ladrillo que se emplearán para llevar a cabo los distintos ensayos a realizar durante el estudio, atendiendo a propiedades como la porosidad accesible al agua y al mercurio, el coeficiente de absorción capilar y el potencial zeta, entre otros.
- Realización de distintos montajes con una serie de piezas que se tratarán de diseñar en Autodesk Inventor. El objetivo de este montaje no será otro que tratar de hacer circular el agua por los diferentes ladrillos mediante electro-ósmosis. También se diseñarán e imprimirán en 3D los tubos capilares por los que se espera que tenga lugar el ascenso del agua, que permitirá determinar el coeficiente de permeabilidad electro-osmótica de los ladrillos y la velocidad electro-osmótica.
- Análisis de los resultados obtenidos en los procesos de medición y comparación con los distintos parámetros obtenidos en la caracterización de los ladrillos.

1.3 Estructura de la memoria.

Para tratar de simplificar la comprensión del TFG y obtener una perspectiva general de los temas que en él se abordan, se ha organizado la memoria de la siguiente manera:

- **Introducción y objetivos:** el propósito de esta sección es resumir las razones que han dado lugar a este estudio, además de los objetivos que se pretenden lograr durante el desarrollo del mismo. Por último, se estructura la memoria para ayudar en su comprensión.
- **Estado del Arte:** en este apartado se trata de contextualizar el impacto negativo que supone el agua en las construcciones, las principales vías de entrada con sus respectivas consecuencias y los métodos para hacerle frente entre los que se incluye el principio que da sentido a este trabajo.
- **Desarrollo del TFG:** en este capítulo se explicará, en primer lugar, los pasos seguidos en los ensayos realizados a los diferentes tipos de ladrillo. Posteriormente se detallarán, de forma gráfica, los montajes realizados para realizar las mediciones y, finalmente, el proceso seguido para determinar el coeficiente electro-osmótico.
- **Resultados:** Sección que recoge los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y mediciones explicados en el apartado anterior. Se graficarán los resultados para facilitar la comprensión de los datos obtenidos.
- **Conclusiones y líneas futuras:** el objetivo de este capítulo es resumir y recopilar las principales ideas que se derivan del proyecto, además de analizar si finalmente el estudio cumple con los objetivos establecidos. También se exploran las distintas opciones para continuar esta línea de investigación.

A continuación (Figura 1-1), se presenta un resumen gráfico que permite abarcar el trabajo completo de manera sencilla y que aporta una vista de conjunto de los temas a tratar:

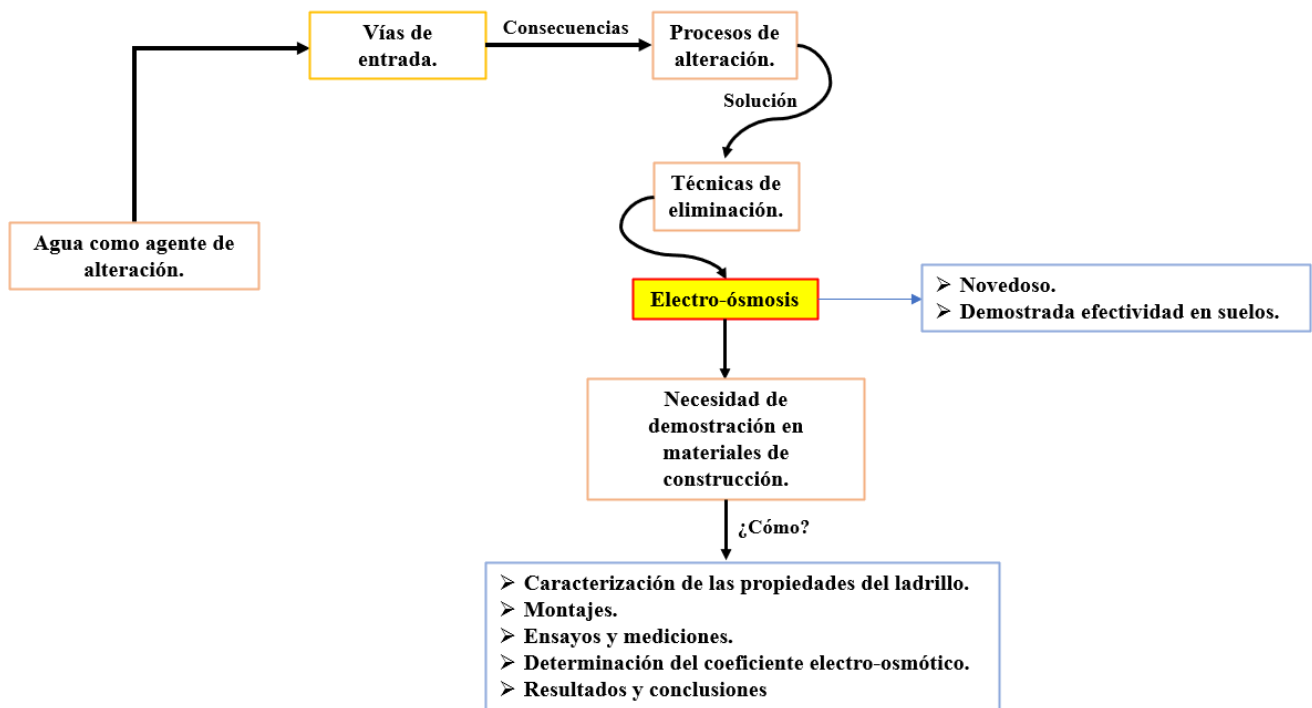


Figura 1-1. Resumen gráfico TFG (Fuente: propia).

2 ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo consistirá en abordar, desde un amplio punto de vista, aquellos factores que alteran los materiales de construcción. Se hará especial hincapié en la problemática del agua ya que, independientemente del estado en el que se manifieste, supone una de las principales causas de deterioro de dichos materiales, ya sea de manera indirecta como directa. Por otro lado, se explicarán las diferentes técnicas empleadas para contrarrestar los desperfectos causados por el agua, haciendo hincapié en la electro-ósmosis y su aplicabilidad en la actualidad.

2.1 El agua como agente de alteración.

El agua se posiciona como el agente de alteración más dañino para las edificaciones, tanto modernas como antiguas. Tal y como se expone en la sección 1.1, este agente puede deteriorar los materiales porosos de construcción tanto de manera directa, por medios físico-mecánicos (a través de presiones que se generan en el interior de los poros del material) [1], [2] o químicos (a través de diferentes tipos de procesos tales como disolución, hidratación o hidrólisis)[3], [4], como de manera indirecta, sirviendo como mecanismo de transporte para diferentes sustancias que pueden dar lugar a alteraciones en las estructuras como, por ejemplo, las sales solubles o actuando como promotor de la actividad biológica.

2.2 Vías de entrada de agua.

Las principales vías de entrada del agua en las edificaciones son las siguientes:

Penetración de agua en estado líquido mediante método directo. Este tipo de penetración se debe principalmente al agua de lluvia en el momento que impacta contra las construcciones. Otro modo de penetración de manera directa es la acumulación de agua de lluvia en el suelo o por salpicadura contra los muros del edificio (ver Figura 2-1) [5].



Figura 2-1. Humedad por penetración directa en el CASI de la ENM (Fuente: propia).

Condensación del vapor de agua. Este fenómeno se produce cuando el punto de rocío es superior a la temperatura de la superficie del material. La condensación produce malformaciones en muchos de los minerales que componen distintos tipos de rocas debido a que provoca hinchazones y expansiones no deseadas como las que se pueden apreciar en la Figura 2-2.



Figura 2-2. Humedades por condensación en el aula 8 de la ENM (Fuente: propia).

Absorción higroscópica. La superficie de la pared es la que lleva a cabo la absorción del agua presente en el aire. Esta absorción se produce debido al conjunto de cargas negativas que se encuentran en la pared [6]. Este tipo de humedad suele estar relacionada con la presencia de sales solubles, las cuales presentan una alta higroscopicidad. Un ejemplo de ello se puede observar en la Figura 2-3 donde se aprecian manchas producidas por sales solubles (compuestos higroscópicos).



Figura 2-3. Mancha de humedad asociada a la absorción de agua por parte de las sales solubles (compuestos higroscópicos) en iglesia de Cádiz (Fuente: propia).

Absorción capilar del agua a partir de la cimentación que se encuentra en contacto con el suelo. La absorción capilar se posiciona como la principal vía de entrada de humedad en edificaciones [7]. La entrada de agua se debe a una propiedad conocida como capilaridad que depende de valores como la tensión superficial del agua y el diámetro de los poros de la roca. Según A. Lozano [8]: “La capilaridad es el proceso por el que la tensión existente entre el agua y el interior de los conductos capilares provoca la ascensión del fluido hasta equilibrarse las presiones entre la superficie libre y la base de la columna.” En otras palabras, la ascensión capilar es un fenómeno que se produce cuando las fuerzas intermoleculares que mantienen unido el líquido son inferiores a las fuerzas que mantienen unidas las moléculas líquidas y las moléculas sólidas. Atendiendo al tamaño de los poros, este fenómeno tiene lugar en poros comprendidos entre diámetros de 0,1-100 μm [9], a medida que aumenta el volumen de poros cuyo diámetro sea menor dentro de dicho rango, la altura capilar será mayor.

Para poder entender de una manera más visual el fenómeno de la capilaridad se va a hacer uso del análisis de un experimento:

El experimento consiste en verter agua coloreada en un recipiente. Dentro de este recipiente se coloca un tubo de cristal largo y delgado que permitirá observar una subida capilar del agua coloreada hasta alcanzar una altura específica, la cual, es igual a aquella en la que el peso del líquido que permanece en el interior del tubo es igual a la tensión superficial del líquido.

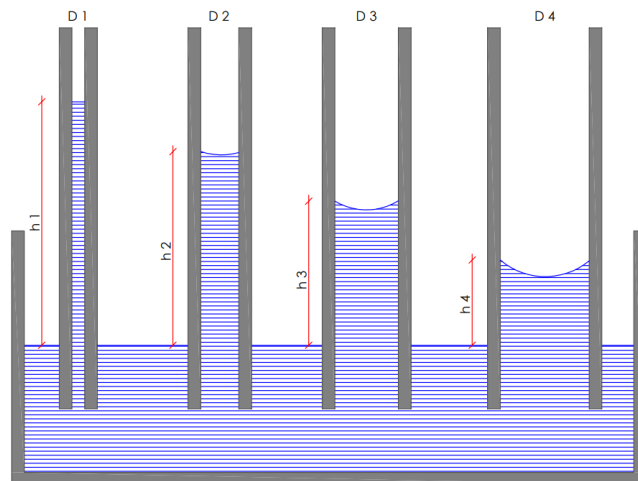


Figura 2-4. Experimento capilaridad (Fuente: propia).

Si tomamos un tubo con un diámetro mayor, la altura alcanzada por el agua que asciende por él será menor, sin embargo, el peso del líquido que permanece dentro del tubo seguirá siendo igual a la tensión superficial del líquido. Este fenómeno recibe el nombre de capilaridad líquida (ver Figura 2-4).

Si utilizamos un tubo de vidrio grueso conectado a uno delgado y vertemos agua dentro, se observará que el agua en el tubo grueso alcanza una altura menor que en el delgado, tal y como se muestra en la Figura 2-5.

Si realizamos el mismo experimento utilizando mercurio en lugar de agua, como se muestra también en la Figura 2-5, se comprobará que, en el tubo grueso, el mercurio alcanza una altura mayor que en el delgado. Asimismo, se podrá observar que, en el caso del mercurio, la adherencia con el tubo será de forma convexa, mientras que en el caso del agua será de forma cóncava.

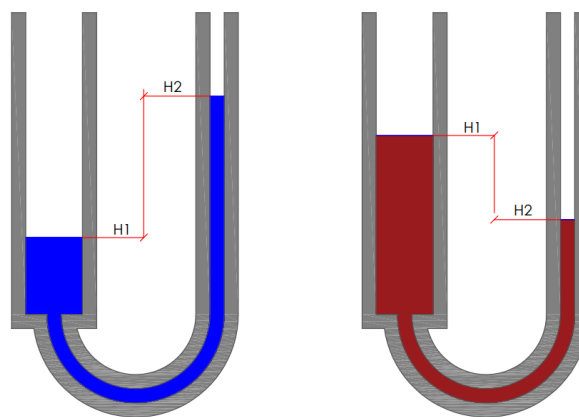


Figura 2-5. Comparación agua (izquierda) y mercurio (derecha) (Fuente: propia).

Cuando se produce el ascenso del líquido por el tubo capilar, se debe a que la fuerza de adhesión entre el tubo y el líquido es superior a la fuerza de cohesión de las moléculas de dicho líquido, en otras palabras, al introducir un tubo capilar en un recipiente lleno de líquido, este tratará de ascender por el tubo y alcanzar una altura superior hasta que la tensión superficial se vea compensada por el peso del líquido en el interior del tubo.

No obstante, en el momento en el que la interconexión entre las moléculas de un líquido es superior a la unión entre el líquido y la pared del tubo capilar, como es el caso del mercurio, el líquido alcanza una altura más reducida y la adhesión con el tubo tiene lugar de forma convexa [10].

2.3 Mecanismos de alteración directa.

2.3.1 Procesos de alteración físico-mecánicos.

Los principales procesos de alteración físico-mecánicos ocasionados por el agua están relacionados con procesos de expansión hídrica y procesos de gelifracción, debidos a la existencia de ciclos hielo-deshielo.

La **expansión hídrica** es un proceso mediante el cual una roca absorbe agua líquida aumentando su volumen. Las rocas que se ven afectadas en mayor medida por este fenómeno son aquellas que contienen minerales arcillosos, especialmente arcillas expansivas como las montmorillonitas sódicas [11], ya que estos minerales tienen facilidad para expandirse durante los procesos de absorción de agua y contraerse durante el secado [5], transmitiendo tensiones que deben ser absorbidas por el resto del paramento. En caso de que estas tensiones no sean absorbidas se producirá la fractura del paramento [12].



Figura 2-6. Deterioro de fachada por expansión hídrica [13].

Entre los daños que se producen debido a la expansión hídrica destacan las fisuras, tanto verticales como la que se muestra en la Figura 2-6, como horizontales, episodios de abombamiento de la fachada o dilatación térmica que puede dar lugar a posteriores grietas. Para evitar estos desperfectos es necesario respetar el tiempo de espera tras la cocción y llevar a cabo un proceso de humidificación del ladrillo previo al empleo en obra ya que de esta manera se evita la modificación de la relación existente entre el agua y el cemento debido a que el material cerámico no absorbe el agua presente en el mortero [14].

La **gelifracción** consiste en la fragmentación de los materiales porosos debido a las presiones generadas por la existencia de procesos cíclicos de hielo-deshielo del agua en el interior de los poros y fisuras [15].

Las congelaciones aisladas en los materiales no suponen un problema grave. Sin embargo, en el momento que estas heladas comienzan a producirse de forma cíclica se convierten en un proceso relevante al ocasionar un aumento en la porosidad del material afectado. En concreto, el ciclo de alteración podría resumirse en los siguientes pasos:

- En primer lugar, se produce un descenso brusco de temperatura provocando la congelación del agua y posterior fisuración del material debido a las presiones internas generadas contra las paredes de los poros.
- Seguidamente, se produce un aumento de temperatura dando lugar al deshielo del material y a la movilización del agua hacia las superficies de evaporación.
- Debido al incremento en la porosidad, el material será más susceptible de saturarse nuevamente con agua procedente de alguna de las vías de entrada mencionadas en la sección 2.2.
- Con el paso del tiempo y debido a la disminución de la temperatura puede volver a producirse la congelación del agua, fisurando de nuevo el material.

La transición del hielo al deshielo está acompañada por cambios dimensionales y cambios de la tensión interna de estos materiales, lo que puede causar la pérdida de la capacidad resistente del material pétreo [16]. A mayor número de ciclos de congelación y deshielo, mayor será el incremento de la porosidad del material y por tanto menor será su durabilidad en ambientes agresivos.

Para entender de qué manera se comporta un material como, por ejemplo, el hormigón, durante estos ciclos, es necesario estudiar su red capilar. La expansión del hielo causada por el aumento en el volumen del agua líquida al congelarse puede provocar daños en este material debido a la presencia de agua en la red. La congelación de esta disolución interna genera tensiones mecánicas y puede causar fisuras en él al superar su resistencia a tracción. Aunque el agua pura se congela a 0°C, el hormigón se congela a temperaturas más bajas, incluso menos de -5°C en caso de una saturación del 100% con agua [17].

El riesgo de fisuración en el hormigón debido a la congelación depende de la concentración de sales en la disolución y del tamaño de los poros de la red capilar. Cuanto más concentrada sea la disolución y más pequeños sean los poros, menor será la temperatura necesaria para congelar el agua y mayor será el riesgo de fisuración. A medida que la temperatura disminuye, se congelan primero los poros de mayor diámetro, y luego los de menor tamaño. Sin embargo, siempre existe una parte de agua en el hormigón que se mantiene en estado líquido y la fisuración se da principalmente en los poros más finos.

Para reducir la fisuración debido a las heladas, se utilizan los inclusores de aire. Estos introducen burbujas pequeñas de aire en la red capilar para interrumpir los capilares finos y permitir que el hielo se expanda hacia estas cavidades. Los efectos de los inclusores de aire incluyen un mejor comportamiento ante la expansión del hielo, lubricación durante el amasado y una reducción de la resistencia mecánica debido al aumento de la porosidad. Es importante tener en cuenta que el contenido óptimo de aire ocluido debe estar entre el 2% y el 6% [18].

2.3.2 Procesos de alteración químicos.

Los principales procesos de alteración químicos causados por el agua están relacionados con procesos de disolución que afectan a rocas calizas o al mármol, procesos de hidratación que afectan al hormigón, procesos de hidrólisis que afectan al granito y, por último, procesos de oxidación que afectan a las pizarras.

La **disolución** consiste en la adición a disolventes como, por ejemplo, el agua, de moléculas sólidas. Este proceso resulta ser el principal alterante químico de rocas carbonatadas como pueden ser las calizas, dolomías o mármol, sin embargo, en el caso de las rocas silicatadas, la disolución solo afecta a diferentes minerales como el apatito, en el caso de obtener pH muy ácidos. Haciendo hincapié en las rocas calizas, estas poseen elevados coeficientes de solubilidad cuando se encuentran en presencia de un medio ácido por lo que son fácilmente alterables por el proceso de disolución. El efecto que produce este fenómeno en las rocas consiste en la lenta desaparición de esta [5].

Una de las causas que provoca la acidificación del agua puede ser la lluvia en ambientes contaminados, que reacciona con el dióxido de carbono presente en la atmósfera o con el monóxido de carbono que se genera en combustiones de diferentes sustancias que no se completan [19].

La calcita, mineral que se encuentra en grandes cantidades en las rocas carbonatadas, reacciona con el ácido carbónico que se forma debido al contacto entre el dióxido de carbono y la humedad atmosférica dando lugar a bicarbonatos como producto final. Estas sustancias presentan una solubilidad muy superior a la del carbonato de calcio, por tanto, son solubilizadas sin mucho esfuerzo por el agua de lluvia formando acanaladuras y nuevos carbonatos de calcio [20].

En cuanto a zonas en presencia de contaminación, es común la formación de trióxido de azufre debido a la exposición del dióxido de azufre a los rayos del sol. También es importante destacar la reacción entre el dióxido de azufre y el agua presente en la humedad formando ácido sulfuroso, que se transforma en ácido sulfúrico al oxidarse. Por último, podría tener lugar la formación de ácido sulfúrico

por la permanencia en la atmósfera del trióxido de azufre dando lugar al fenómeno conocido como lluvia ácida [6].

La **hidratación** es un proceso mediante el cual una molécula de agua pasa a formar parte de la estructura cristalina de un mineral determinado, aumentando el volumen de este y provocando, como consecuencia, un crecimiento de la red cristalina de dicho mineral. Este fenómeno suele darse en materiales como el hormigón y en rocas sedimentarias [5].

El proceso de hidratación del hormigón es un proceso químico en el que los componentes principales del cemento, el agua y los agregados reaccionan para formar una masa sólida y resistente. Durante la hidratación, el cemento libera iones hidróxido y silicato que reaccionan con el agua para formar productos de hidratación, como el silicato de calcio hidratado y la etringita. Estos productos de hidratación llenan los poros del hormigón y proporcionan la resistencia necesaria para soportar cargas estructurales. La velocidad de hidratación depende de factores como la temperatura, la humedad, la composición del cemento y el tamaño de los agregados [21].

La **hidrólisis** es una reacción química entre los iones acuosos y los minerales de rocas con propiedades cristalinas. Se trata de una reacción lenta y afecta en mayor medida a los silicatos. El objetivo de este proceso es la eliminación de cationes Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y enriquecer en sílice, alúmina y óxidos al residuo [22].

En presencia de un medio acuoso ácido, la hidrólisis puede producir cambios en los minerales debido a la formación de minerales arcillosos como es el caso del caolín que se forma a partir de feldespato de potasio gracias a su hidrolización a illita [23].

En el caso del granito, este proceso afecta de varias maneras. El granito es una roca ígnea que se compone principalmente de cuarzo, feldespato y mica. Cuando el agua se filtra a través de la roca, puede disolver los minerales de feldespato y mica a través de la hidrólisis, lo que puede debilitar su estructura. La hidrólisis también puede causar la formación de productos de alteración como la caolinita y la sericita que son menos resistentes a los agentes atmosféricos y pueden dar lugar a una mayor erosión de la roca. Además, la hidrólisis puede causar la decoloración de la superficie del granito, especialmente en regiones con altos niveles de contaminación [24].

La **oxidación** es un proceso en el cual, un elemento pierde electrones aumentando su estado de oxidación. Los minerales férricos se oxidan cuando el oxígeno atmosférico es disuelto en agua y entra en contacto con rocas que poseen minerales ferromagnesianos en su estructura. El resultado final es un cambio de color de la roca a marrón-rojizo [5].

En construcciones, cabría destacar la alteración, mediante este proceso químico, de pizarras para techar. La pizarra es una roca sedimentaria que se compone principalmente de minerales de arcilla y mica. Cuando la pizarra se expone al oxígeno del aire y al agua, los minerales de sulfuro de hierro que se encuentran en la roca pueden oxidarse y formar ácido sulfúrico. Este ácido puede disolver los minerales de la pizarra y debilitar su estructura, lo que puede provocar su desmoronamiento y la formación de fisuras en la roca, lo que conllevaría la pérdida de su impermeabilidad como material para techar. La oxidación también puede causar la formación de depósitos de óxido de hierro en la superficie de la pizarra, lo que puede dar lugar a una decoloración y pérdida de su brillo natural [25]. Otro de los materiales de construcción que se ven alterados por este proceso es el hormigón, debido a la corrosión de las armaduras.

2.3.3 Otros procesos de alteración.

Además de los factores de alteración indicados anteriormente, se debe tener en cuenta que la presencia de humedad en el interior de edificaciones conlleva problemas asociados a la habitabilidad de este ya que:

- Reduce la eficiencia energética del edificio. Esto conlleva un mayor coste energético por parte de las instalaciones de refrigeración o calefacción para mantener unas determinadas condiciones.
- La presencia de humedad afecta a la salud de las personas ocasionando infecciones respiratorias.

2.4 Mecanismos de alteración indirecta.

2.4.1 Problemática de las sales solubles.

Otro de los agentes que supone un elevado riesgo para los muros y paredes en obras de construcción, como se adelanta en la sección 2.2, lo constituyen las sales solubles, concretamente, su cristalización, dando lugar a desperfectos como los que se aprecian en la Figura 2-7 y en la Figura 2-8. La gran mayoría de los estudios acerca de malformaciones en rocas de construcción detallan los efectos que provoca la cristalización de sales solubles [26]. Estos desperfectos abarcan desde alteraciones estéticas por la aparición de eflorescencias superficiales hasta daños internos relevantes en poros y capilares [27].

Pese a que existen varios autores que defienden que la presencia de sales solubles en materiales de construcción no siempre posee un carácter negativo [28], todos ellos acuerdan que la cristalización de sales solubles en materiales porosos es la causa de alteraciones que pueden llevar a causar daños de muy difícil reparación en edificaciones [29]. De este modo, procesos como la desagregación o las descamaciones presentan elevados niveles de nitratos, cloruros o sulfatos [30].



Figura 2-7. Daños causados por sales solubles en muro del centro de Cádiz (Fuente: propia).

Las consecuencias ocasionadas por la cristalización de sales en condiciones naturales dependen, en gran medida, de las características pétreas, además de tener en cuenta el tipo de sal del que se trate y el estado del ambiente [31]. A partir de la distribución, tamaño de los poros del material y la combinación de otros factores se hará posible determinar la resistencia de la piedra a las distintas presiones que se generan durante el proceso de cristalización.

Para llevar a cabo un diagnóstico completo que permita escoger el método más adecuado para tratar de paliar los efectos de la cristalización, se hace necesario detectar e identificar las distintas sales que se encuentran presentes en la superficie de los materiales. La degradación causada por la cristalización de

sales es un proceso muy complejo y aunque hay mucha información disponible que menciona y describe este tipo de deterioro, en gran medida, los estudios son principalmente cualitativos. En estos trabajos se mencionan algunos aspectos del fenómeno, como la presión de cristalización, sin embargo, no se profundiza en investigaciones cuantitativas [32].

Los tipos de sales más comunes en materiales pétreos son los sulfatos y cloruros, seguidos de los carbonatos, nitratos y, con menos frecuencia, los nitritos. Los iones más comunes suelen ser calcio, sodio, magnesio y potasio en orden decreciente de frecuencia. También pueden ser comunes entre los iones negativos, los oxalatos y entre los iones positivos, el amonio [33]. Dentro de estas sales, el mayor número de investigaciones relacionadas con estudios teóricos y experimentales se refieren al yeso, halita y sulfatos de sodio y magnesio, ya que son las sales más comunes y destructivas en materiales de construcción [34]. En la Tabla 2-1 se incluye un resumen con los tipos de sales solubles más comunes presentes en materiales de construcción.

Tabla 2-1. Tipos de sales solubles más comunes [32].

Tipos de Sales solubles más comunes	
Cloruros: - Halita. (NaCl) - Silvita. (KCl) - Antarticita. (CaCl₂·6H₂O) - Biscofita. (MgCl₂·6H₂O)	Carbonatos: - Termonatrita. (Na₂CO₃·H₂O) - Natrita. (Na₂CO₃·10H₂O) - Magnesita. (MgCO₃) - Nesqueonita. (MgCO₃·3H₂O)
Sulfatos: - Yeso. (CaSO₄·2H₂O) - Thenardita. (Na₂SO₄) - Mirabilita. Na₂SO₄·10H₂O) - Arcanita. (K₂SO₄) - Bloedita. (Na₂Mg(SO₄)₂·4H₂O) - Epsomita. (MgSO₄·7H₂O) - Kieserita. (MgSO₄·H₂O) - Hexahidrita. ((MgSO₄)₆·H₂O)	Nitratos: - Nitronatrita. (NaNO₃) - Nitranmita. (NH₄NO₃) - Nitrocalcita. (Ca(NO₃)₂·4H₂O) - Nitrokalita. (KNO₃)

Las sales que se encuentran en los edificios, y especialmente en los monumentos, generalmente provienen de varias fuentes, tales como:

- **Lixiviación de los materiales de construcción.** Entre las sales que presentan este origen destacan las sales sulfatadas, que suelen proceder de morteros de cemento alterados o de revestimientos realizados en yeso [35]. Los cloruros también pueden tener su origen en los morteros fabricados con arena de procedencia marina [36].
- **Absorción capilar de agua con sales solubles desde el suelo y subsuelo.** El agua que sube por las paredes de los edificios debido a la capilaridad suele ser una solución salina, que contiene iones de carbonato, sulfato, cloruro, nitrato, magnesio, calcio, sodio, potasio y amonio. Estas soluciones se ven enriquecidas en nitratos y cloruros en áreas urbanas debido a la acción de microorganismos en los desechos orgánicos y el consumo de cloruro sódico. Por otro lado, los sulfatos y nitratos son comunes en tierras agrícolas debido al uso de fertilizantes [33].
- **Deposición atmosférica de sales.** La deposición de productos atmosféricos puede proceder del ambiente marino o de ambientes expuestos a la contaminación.

La presencia de sales marinas en lugares alejados del océano puede ser causada por los movimientos atmosféricos, sin embargo, su cantidad disminuye con la distancia, a modo de ejemplo, en la Tabla 2-2, se presenta la concentración de distintas sales en el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo. En zonas áridas, estas sales pueden acumularse debido a la falta de dilución por la lluvia, lo que aumenta su concentración. En áreas más húmedas, estas sales pueden ser parcial o totalmente eliminadas dependiendo de su solubilidad [37].

Se han llevado a cabo estudios en la Antártida que manifiestan que la cantidad de iones presentes en la zona es directamente proporcional a la distancia al mar. Estos estudios han sido comprobados con iones como el cloruro que tiende a disminuir a medida que nos alejamos del mar debido a que es más común en agua salada [38].

En cuanto a los ambientes expuestos a contaminación, los contaminantes ambientales presentes en los depósitos pueden ser de origen gaseoso, líquido o sólido. Estos depósitos son la fuente principal de los sulfatos. La combustión de combustibles fósiles conduce a la presencia de dióxido de azufre en la atmósfera, que reacciona para formar ácido sulfúrico y sulfatos. Los nitratos también pueden ser producto de la contaminación atmosférica y ciertos procesos industriales pueden ser responsables de la presencia de cloruros. Los sulfatos pueden causar la formación de costras negras de yeso en los edificios, mientras que los nitratos y cloruros pueden atacar las paredes de los monumentos [39].

Tabla 2-2. Diferencia entre la Concentración de sales entre O. Atlántico y M. Mediterráneo [32].

Naturaleza de las sales	Océano Atlántico (g/l)	Mar mediterráneo (g/l)
NaCl	28,14	30,76
KCl	0,69	0,66
MgCl ₂	3,44	3,74
CaSO ₄	1,42	1,69
MgSO ₄	2,28	2,39

- **Debido al metabolismo de organismos.** La acción biológica de los seres vivos puede ser una fuente importante de iones, como los cloruros y nitratos presentes en las zonas habitadas por humanos y animales. Los microorganismos también pueden producir nitratos a partir de excrementos y residuos. Sin embargo, el origen de los cloruros no siempre es tan claro. Además, la presencia de sales fosfatadas también puede indicar acción biológica, como los fosfatos y ácidos úricos de fertilizantes naturales que pueden alterar los minerales y formar sales fosfatadas. Los oxalatos de calcio pueden derivar de la actividad metabólica de ciertas especies de líquenes o de tratamientos antiguos de protección de la piedra. Los sulfatos también pueden tener un origen microbiológico debido a la acción de ciertos microorganismos. En conclusión, es importante estudiar cada caso en particular y correlacionar la naturaleza de las sales detectadas con las características y agentes ambientales de las piedras y la edificación [33].

También pueden ser generadas por otras fuentes, como las sales utilizadas para deshielar carreteras durante el invierno (principalmente cloruros), que pueden ser transportadas al edificio por el agua o el viento [33].



Figura 2-8. Cristalización de sales solubles en pared cercana al puesto de correos de la ENM (Fuente: propia).

2.4.2 Problemática de la alteración biológica.

Este tipo de alteración se puede definir como la transformación de las características y propiedades de una roca debido a la presencia y desarrollo de la actividad vital de diferentes tipos de organismos [40], [41]. Como norma general a mayor rugosidad y porosidad de la roca, mayor presencia y proliferación de seres vivos tendrá lugar. El deterioro causado por estos organismos y el resto de seres vivos se puede clasificar en dos mecanismos diferentes, los mecanismos biogeoquímicos y los biogeofísicos [42].

Los **mecanismos biogeoquímicos** son aquellos que originan cambios de pH, formación de complejos o desestabilización mineral del material pétreo debido a la secreción metabólica de sustancias ácidas de los seres vivos. En este grupo se incluye la aparición de distintas sales solubles cuyo origen se detalla en la sección 2.4.1.

Los **mecanismos biogeofísicos** son aquellos provocados por el crecimiento de estructuras derivadas de ciertos microorganismos como puede ser el caso de raíces o ricinas.

El desarrollo de estos mecanismos tiene como consecuencia la aparición de desperfectos en edificios y esculturas originados por diferentes motivos:

- Cambios estéticos por acción de organismos como algas y hongos que se encargan de modificar los colores iniciales de esculturas y edificaciones (ver Figura 2-9).
- La actividad metabólica también puede provocar alteraciones físicas que pueden desarrollar grietas y fracturas debido al aumento volumétrico del material.
- Esta actividad vital también puede alterar químicamente las propiedades de una roca. Esta alteración química se debe en mayor medida a la secreción ácida que realizan los microorganismos, la cual, puede provocar descomposición de la roca en cuestión.

En las zonas donde predominan climas cálidos con buena presencia de luz, oxígeno, CO₂ y agua se suelen dar con mayor frecuencia este tipo de alteraciones debidas al metabolismo de organismos.

Por último, cabe destacar el impacto de la creación de ecosistemas por parte de microorganismos como hongos y protozoos. La proliferación de estos ecosistemas depende en gran medida de la intensidad y exposición a la luz solar y la temperatura media.



Figura 2-9. Proliferación de microorganismos en pared del patio de aulas (Fuente: propia).

2.5 Técnicas para la conservación de los materiales de construcción.

De lo mencionado hasta ahora, se puede apreciar que la mayoría de los daños a largo plazo en los edificios están relacionados con el agua.

El agua puede causar daños graves relacionados con la estabilidad estructural de un edificio al afectar a las propiedades portantes de los materiales de construcción (aspecto comentado en la sección 2.1), como a su habitabilidad, al reducir, por ejemplo, la capacidad aislante de los edificios o al afectar a la salubridad de las personas que viven en su interior debido a la presencia de humedades que fomenten la aparición de microorganismos (léase sección 2.3.3).

Las humedades deben tratarse como daños o causas de deterioro, por tanto, es importante controlar su presencia mediante una correcta planificación y construcción o mediante mantenimiento y reparaciones regulares. Los tipos más comunes de humedades que afectan a los edificios son (ver Figura 2-10):

- **Humedades por filtración:** El problema de las humedades en los edificios a menudo es causado por un mal sellado contra el agua. La lluvia es una fuente frecuente de filtración de agua del exterior al interior, especialmente durante las tormentas. Las humedades por filtración son comunes en techos, cubiertas, juntas de dilatación y muros en contacto con el suelo. Ocurren por roturas o desgaste de la impermeabilización o problemas en dispositivos de drenaje de agua. Repararlas es crucial, ya que pueden afectar cualquier parte de la edificación [5].
- **Humedades por condensación:** La humedad por condensación se forma cuando el vapor de aire se condensa en superficies frías (cristales de ventana, paredes, techos). Es más común en invierno debido a las bajas temperaturas. La aparición depende de la humedad del aire, la temperatura del aire interior y la temperatura de las superficies frías [5].
- **Humedades por capilaridad:** Se trata del tipo de humedades más difícil de solucionar y se origina en la estructura del edificio, generalmente en las zonas más bajas. Proviene del subsuelo y asciende por las paredes y tabiques. En función del material empleado en la fachada la altura del frente capilar puede alcanzar hasta 1,5 metros. En la mayoría de ocasiones surge después de una acumulación de agua excesiva por parte del terreno donde asienta la cimentación o una inundación o aporte excesivo de agua por rotura de alguna canalización [5].

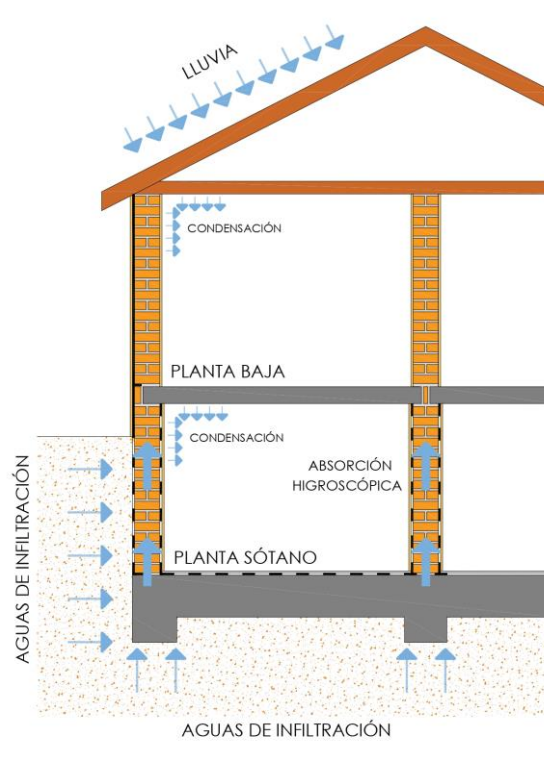


Figura 2-10. Origen de humedades (Fuente: propia).

Existen diversos métodos para la detección de los focos de los distintos tipos de humedades:

- **Detección visual:** La presencia de líquenes, hongos, plantas superiores o cambios en el color de la fachada (debidos a procesos de oxidación o de oscurecimiento por una mayor humedad de los materiales) son indicadores visuales que permiten analizar si existen problemas de humedad en el edificio [5].
- **Termohigrómetros:** El termohigrómetro mide la humedad y temperatura superficial y puede ser analógico o digital. Los analógicos son sencillos, pero solo muestran mediciones puntuales y tienen pocas funciones. Los digitales tienen la capacidad de registrar y comparar cambios de humedad y temperatura en el tiempo [43].
- **Termografía infrarroja:** La termografía infrarroja es una técnica no invasiva para medir la distribución de temperatura en la superficie del objeto a analizar. Se utiliza con otras técnicas para detectar problemas en la envolvente de edificios, como puentes térmicos y humedad. Es importante para evaluar el confort térmico y para estudiar sistemas de calefacción. La termografía también se utiliza en estudios del fenómeno de la isla de calor urbana y para determinar pérdidas térmicas. Con la modernización de la tecnología, se pueden realizar monitoreos transitorios para comprender procesos de transferencia de calor y propiedades térmicas de materiales [44].

Actualmente, las estrategias existentes para combatir el problema asociado al agua se pueden aglutinar en cuatro grupos:

- Minimizar la entrada de agua.
- Modificar la porosidad de los materiales para reducir la absorción de la estructura.
- Optimizar el proceso de evaporación de agua del edificio.
- Poner el agua en movimiento mediante métodos como la electroósmosis.

Uno de los métodos más empleados para minimizar la entrada de agua es **la construcción de suelos drenantes**. Esta técnica consiste en mejorar la capacidad de drenaje del suelo y evitar la acumulación

de agua en las cercanías de la estructura por medios como la lluvia comentados en la sección 2.2. La construcción de suelos drenantes puede ayudar a aumentar su durabilidad a largo plazo [45] y resulta esencial para mantener la estabilidad de las bases de los edificios y prevenir la erosión del suelo [46].



Figura 2-11. Capa drenante [47].

Para llevar a cabo el establecimiento de este tipo de suelos hay que cavar una zanja alrededor del edificio a tratar. Tras ello, se coloca una membrana cuyo cometido será mantener la impermeabilización del suelo. Sobre la membrana se colocan tubos de drenaje recubiertos de grava tal y como se aprecia en la Figura 2-11, con el fin de mejorar el movimiento de agua gracias a la elevada porosidad de este material, disminuyendo así la cantidad de agua en las cercanías del edificio. El agua drenada se hace circular por los tubos con el fin de que no sea absorbida por las paredes del edificio. Por último, cabe la posibilidad de recubrir el suelo con algún material de manera que se mantenga la estética [5].

Entre las posibles técnicas de modificación de la porosidad de los materiales para reducir la absorción de la estructura destaca **minimizar el área en contacto con la base del terreno mediante la creación de arcos de pequeñas dimensiones** (ver Figura 2-12). El objetivo de estos arcos es aumentar la superficie de evaporación y además reducir el nivel de absorción. Se trata de un método muy poco empleado ya que resulta caro y, en ocasiones, peligroso para ciertas estructuras.

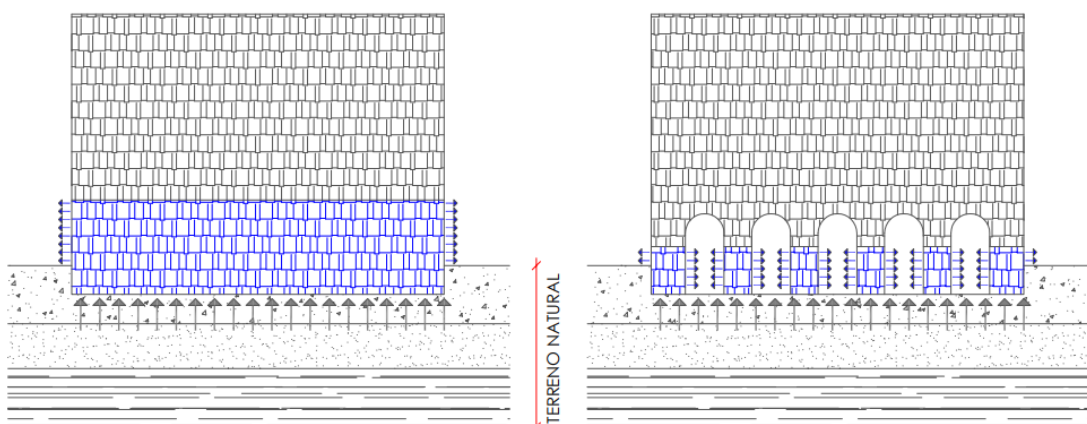


Figura 2-12. Creación de arcos en los edificios (Fuente: propia).

Otra técnica consiste en frenar el movimiento capilar ascendente mediante **barreras impermeables** que pueden ser colocadas durante la construcción del edificio o bien, una vez construido, mediante cortes

en los muros. Estas barreras están formadas por materiales no porosos que hacen frente al ascenso capilar del agua. Uno de los principales problemas de esta técnica es que resulta agresiva en los casos de aplicación post construcción ya que el corte a realizar puede causar importantes daños a la estructura. También pueden verse reducidas sus propiedades originales o volverse más sensibles a actividad sísmica [48].

Otra de las técnicas empleadas con el objetivo de reducir la capacidad de absorción es la **inyección de hidrofugantes** a presión o por difusión lenta para lograr una capa que limite el libre movimiento de la humedad por el muro. La inyección se realiza a través de unos agujeros practicados en la pared (ver Figura 2-13). La principal desventaja de este método es que la inyección no garantiza un reparto de hidrofugante a partes iguales por la superficie del muro quedando zonas descubiertas por la no formación de la barrera.



Figura 2-13. Inyección de barrera hidrofugante.

En cuanto a la optimización del proceso de evaporación de agua de un edificio se señala el método Knapen, Este método se basa en la colocación de higroconvectores, tubos con ángulo que se emplean para transformar una cantidad de aire húmedo en aire seco eliminando la humedad de la pared.

Este método es la opción más asequible y efectiva para erradicar humedades. No requiere ningún mantenimiento, su instalación es simple y rápida sin necesidad de expertos. Además, los higroconvectores pueden ser pintados para combinar con la pared. El proceso de instalación es el siguiente: se hace un pequeño orificio con un diámetro de 18mm y una profundidad de 2/3 del espesor de la pared, con una inclinación de 25°-30° hacia arriba y se inserta el higroconvector dentro del mismo (ver Figura 2-14) [49].

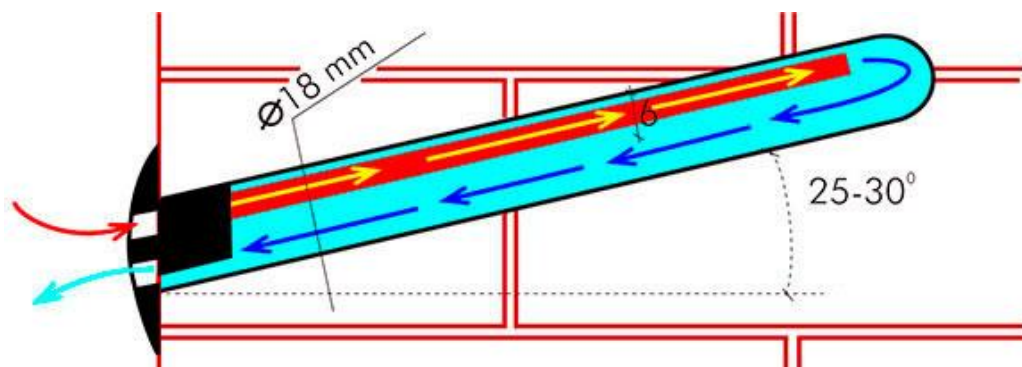


Figura 2-14. Método Knapen. Higroconvector [49].

Para finalizar con las técnicas de evaporación, se incluye el **método Termal**. Su funcionamiento es sencillo ya que consiste en aumentar la temperatura de la pared para acelerar la evaporación del agua

presente. Sin embargo, está demostrado que se trata de un método poco efectivo en materiales muy capilares como los ladrillos [50].

Concluyendo con los tratamientos para paliar el efecto de las humedades en edificios se hace necesario hablar del proceso electro-cinético que fundamenta la razón de ser de este trabajo. El principio de **electro-ósmosis** es un método utilizado en la eliminación de humedades capilares en edificios. Funciona mediante la aplicación de una corriente eléctrica a través de un material conductor en el muro o sustrato húmedo. La corriente eléctrica genera un campo eléctrico que atrae los aniones presentes en el agua hacia la superficie del material de construcción, cuya carga suele ser negativa, generándose una doble capa compuesta de una capa fija y de una capa móvil o difusa a través de la cual se movilizan las moléculas de agua hacia el cátodo. De esta manera, es posible movilizar el agua y arrastrarla desde la profundidad del muro hacia la superficie, donde puede evaporarse.

2.6 Principio de Electro-Ósmosis.

El principio de electro-ósmosis se basa en la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a materiales porosos con el fin de provocar el movimiento de líquidos contenidos en dichos materiales. Los iones que se encuentran próximos a superficies de partículas sólidas se ven forzados a migrar debido al principio electro-osmótico [51]. Estas superficies de partículas sólidas están cargadas eléctricamente de tal forma que se acumulan contraiones en la llamada doble capa eléctrica. Las fuerzas que consiguen el arrastre del fluido contenido en el poro se deben al movimiento de los contraiones hacia el electrodo que posee la carga opuesta, logrando así la completa advección del líquido. El movimiento básico del fluido se realiza de ánodo a cátodo (ver Figura 2-15) debido a que, por lo general, los materiales sólidos poseen cargas negativas en su superficie [52].

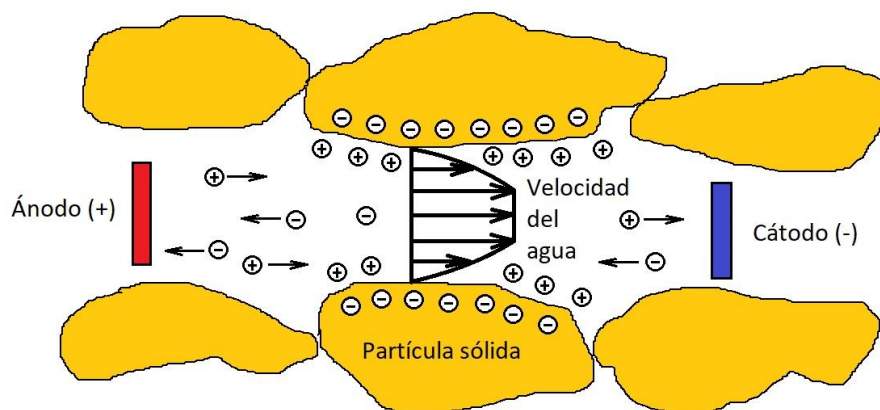


Figura 2-15. Principio de Electro-Ósmosis [53].

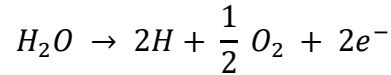
Para explicar el principio electro-osmótico es importante profundizar en los conceptos de doble capa eléctrica y potencial zeta.

- La doble capa eléctrica está compuesta por dos capas subyacentes, la capa de Stern y la capa difusa. En la capa de Stern los iones, generalmente los cationes, sufren una intensa atracción electrostática y poseen reducida libertad de movimiento, mientras que en la capa difusa los iones pueden moverse libremente. El movimiento del líquido, al aplicar la diferencia de potencial, tiene lugar en el plano de corte que se encuentra en la capa difusa muy próximo a la superficie del material sólido [54].
- El potencial Zeta es una medida del potencial electro-cinético en sistemas coloidales. Se refiere al potencial eléctrico en la intersección de capas, es decir, el punto donde se unen la capa difusa y la de Stern [55]. Es también la diferencia de potencial entre el medio de dispersión y la capa estacionaria en la partícula dispersada. Se puede medir de manera sencilla, a diferencia de la carga de superficie y su potencial en los fluidos, que no pueden medirse. El potencial zeta es una forma eficiente de regular el comportamiento de un coloide,

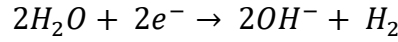
ya que muestra variaciones en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre coloides.

La existencia de iones en el material a tratar es muy relevante debido a que afecta tanto a la doble capa como al potencial Zeta, ya que el espesor de la doble capa es inversamente proporcional al volumen de concentración de iones presente en el material poroso. Otro factor a tener en cuenta es el pH, que afecta a la carga superficial pudiendo llegar a invertir el signo de esta [56].

El gradiente de potencial eléctrico necesario para que tenga lugar el proceso electro-osmótico se aplica mediante el uso de electrodos. La corriente eléctrica en el electrodo metálico es convertida en corriente iónica en el poro. La oxidación del proceso tiene lugar en el ánodo y la reducción en el cátodo. En general las reacciones químicas eléctricas que tienen lugar se fundamentan en la electrólisis del agua. La oxidación en el ánodo se realiza según la siguiente reacción:



La reducción, por su parte, sigue la siguiente reacción:



La formación de ácido y base varía en función de la corriente eléctrica aplicada y la duración de la misma. La colocación directa de los electrodos sobre el material puede ser causa de daños debido a los cambios bruscos de pH que pueden tener lugar. La neutralización de la acidificación se logra mediante el uso de una cataplasma rica en calcita entre los electrodos y el ladrillo [57], [58]. Esta técnica también ha sido empleada y probada en procesos de eliminación de sales mediante la aplicación de un campo eléctrico [59].

2.6.1 Fórmulas que rigen el principio de Electro-Ósmosis.

Existen diversos modelos matemáticos orientados a explicar el principio electro-osmótico y a evaluar sus características en arcillas y suelos.

Casagrande [60] demostró que el flujo electro-osmótico que tiene lugar a través de materiales porosos en los que se ha inducido un campo eléctrico tenía la misma forma que la ecuación de Darcy, siguiendo la siguiente expresión:

$$V_e = -K_e \frac{dV}{dx} \quad \text{Ec. 2- 1}$$

Donde V_e es el flujo electro-osmótico por unidad de sección transversal, K_e representa el coeficiente de permeabilidad electro-osmótica y V define el potencial eléctrico aplicado.

El modelo presentado por Helmholtz y Smoluchowski (modelo H-S), empleado para describir el proceso electro-osmótico en diversos ámbitos de la ingeniería, determina el coeficiente de permeabilidad electro-osmótica como se presenta a continuación:

$$K_{eo} = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta \tau^2} n \quad \text{Ec. 2- 2}$$

Donde ε es la constante dieléctrica del fluido, ζ es el potencial Zeta, η es la viscosidad del fluido, n es la porosidad y τ la tortuosidad de la red porosa.

De forma simplificada, este coeficiente se puede calcular del siguiente modo [61] :

$$K_{eo} = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta} n \quad \text{Ec. 2- 3}$$

En el caso de emplear la simplificación del modelo, el coeficiente de permeabilidad electro-osmótico depende en gran medida de potencial zeta [62].

A partir del cálculo de este coeficiente, el modelo H-S calcula el caudal volumétrico electro-osmótico mediante la siguiente expresión:

$$Q_{eo} = K_{eo} EA \quad \text{Ec. 2- 4}$$

Donde E representa el gradiente de potencial aplicado y A es la sección transversal total por la que circula la corriente.

Sin embargo, como se indica en [63], este modelo solo es óptimo para materiales porosos cuyo tamaño de poros es elevado y, además, no tiene en cuenta la influencia de la doble capa eléctrica.

Para el caso de materiales porosos, se suele expresar los flujos mediante funciones lineales de las fuerzas que impulsan el líquido, por tanto, el volumen de flujo electro-osmótico (J_v) y el flujo de densidad de corriente (J_q) pueden expresarse de la siguiente manera:

$$J_v = L_{11} \Delta(-p) + L_{12} \Delta(-\Psi) \quad \text{Ec. 2- 5}$$

$$J_q = L_{21} \Delta(-p) + L_{22} \Delta(-\Psi) \quad \text{Ec. 2- 6}$$

En estas fórmulas, p representa la presión a la que está sometida el líquido; ψ es el potencial eléctrico [62]. L_{11} y L_{22} son coeficientes en los que existe relación directa entre el flujo y la fuerza. L_{11} expresa la proporcionalidad entre el flujo de solución y el gradiente de presión en el caso de que no se haya aplicado campo eléctrico, de la misma manera, L_{22} se refiere a la relación de proporción entre la corriente eléctrica y el gradiente de presión aplicado. L_{21} define la relación entre la presión aplicada y el flujo de corriente que se genera debido a dicha presión, en el caso de que no haya aplicado un campo eléctrico. Por último, L_{12} representa el coeficiente electro-osmótico, es decir, la proporcionalidad entre el volumen de flujo y el campo eléctrico aplicado sin gradiente de presión.

Atendiendo a la reciprocidad de Onsager, podemos determinar que $L_{12} = L_{21}$. De esta forma en caso de que no exista gradiente de potencial aplicado:

$$L_{12} = \frac{J_v}{\Delta(-\Psi)} \quad \text{Ec. 2- 7}$$

$$L_{22} = \frac{J_q}{\Delta(-\Psi)} \quad \text{Ec. 2- 8}$$

De estas ecuaciones se deduce que el flujo electro-osmótico se puede calcular a partir del flujo volumétrico y el gradiente de potencial aplicado.

2.6.2 Aplicabilidad del principio de Electro-Ósmosis.

El principio de electro-ósmosis es uno de los fenómenos electro-cinéticos más empleados como técnica para la mejora de suelos. Concretamente, se suele emplear en suelos finos compuestos de arcillas y suelos granulares. El principio de funcionamiento en suelos se basa en la aplicación de una corriente

eléctrica mediante electrodos. Esta corriente provocará el movimiento del agua contenida en dicho suelo desde el polo positivo al negativo, todo ello debido al campo eléctrico que se genera y la reacción que dicho campo provoca entre los iones de agua y las partículas presentes en el suelo.

El objetivo es conseguir una acumulación de agua en el polo negativo que haga posible el drenaje de agua consolidando la superficie del suelo, aumentando su resistencia a esfuerzos cortantes y disminuyendo su capacidad de compresión.

En el caso de aplicación en suelos, se suele emplear la electro-ósmosis activa que consiste en la aplicación directa del campo eléctrico usando electrodos metálicos que pueden ser de cobre, hierro o aluminio y la corriente que circula puede ser tanto continua como intermitente. Durante el proceso los electrodos se oxidarán y se irá produciendo el drenaje del suelo a baja velocidad.

Uno de los primeros estudios sobre la electro-ósmosis en suelos fue realizado por el físico alemán Friedrich Paschen en el año 1887, quien demostró que la aplicación de un campo eléctrico puede inducir el flujo de agua a través de un medio poroso. Desde entonces, la electro-ósmosis ha sido ampliamente estudiada en el campo de la geotecnia y la ingeniería civil [64].

También se llevaron a cabo estudios en Europa y Japón durante los años 50 para investigar el uso de la electro-ósmosis en la consolidación de suelos blandos. En estos estudios, se utilizó la electro-ósmosis para inducir el flujo de agua a través de este tipo de suelos, con el fin de mejorar sus propiedades, en concreto, de densidad y estabilidad. Los resultados obtenidos en dichos estudios fueron satisfactorios y lograron mejorar las propiedades de los suelos blandos [65].

Durante los años 80, se llevaron a cabo estudios en los Estados Unidos para investigar el uso de la electro-ósmosis en la eliminación de contaminantes del suelo. En estos estudios, se utilizó este principio para inducir el flujo de agua a través de los suelos contaminados para lograr la extracción de estas partículas contaminantes. De nuevo se consiguieron resultados que evidencian la efectividad de este fenómeno en suelos [65].

Actualmente, la electro-ósmosis se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones geotécnicas, incluyendo las mencionadas en los párrafos anteriores. Además, la electro-ósmosis se ha utilizado en la construcción de túneles para reducir la cantidad de agua que penetra en estas estructuras [66].

Para finalizar, es importante resaltar que apenas existen estudios que evidencien el empleo del principio electro-osmótico en materiales de construcción, si bien, existen algunos estudios como el de Bertolini [52], que aportan información técnica a partir de medidas cuantitativas de los diferentes cambios que se producen en los niveles de humedad de los materiales de construcción y arrojan algo de luz en cuanto a la aplicación tecnológica real del principio para la rehabilitación de materiales empleados en construcción.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales y métodos.

3.1.1 Materiales de construcción empleados.

Para la realización de este trabajo se seleccionaron dos tipos de ladrillos diferentes, uno rojo y otro amarillo, ampliamente empleados en la construcción en el norte de Europa. Las muestras de ladrillo se dividieron en bloques de 6x6x3 cm (n=2) y de 4x4x4 cm (n=10). Las muestras cúbicas de 4 cm de lado se emplearon para determinar las principales propiedades que caracterizan la estructura porosa de ambos ladrillos, siguiendo para ello, los procedimientos establecidos en diferentes normas y estudios. En concreto se determinaron las siguientes propiedades:

Porosidad accesible al agua según la norma UNE-EN 1936: 2007 [67]: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.” El objetivo de este método es conocer el volumen de poros cuyo tamaño es superior a 0,1 μm , en contacto entre ellos y también en conexión con el exterior. De este parámetro podemos deducir que, cuanto mayor sea la porosidad accesible al agua de un material, mayor será la probabilidad de que el material se vea alterado por agentes externos.

Para este ensayo se han empleado las 10 muestras destinadas a medir las propiedades del ladrillo. Antes de comenzar el ensayo se procedió a secar las muestras en estufa a 75°C hasta alcanzar peso constante (M_0). A partir de este instante se procede con el ensayo siguiendo los siguientes pasos:

1. Se colocan las muestras ya pesadas en el interior de un desecador donde se procederá a saturarlas a vacío con agua (M_s).
2. Se determina el peso hidrostático de cada muestra bajo el agua (M_h).

A partir de estos pesos se procede a calcular los siguientes parámetros:

Densidad aparente siguiendo la ecuación:

$$D_{ap} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_0}{M_s - M_h} \times \rho_{agua} \quad \text{Ec. 3- 1}$$

Densidad real siguiendo la ecuación:

$$D_r \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_0}{M_0 - M_h} \times \rho_{agua} \quad \text{Ec. 3- 2}$$

La porosidad abierta ρ_0 (%), siguiendo la siguiente ecuación que sigue:

$$\rho_0 = \frac{M_s - M_0}{M_s - M_h} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3- 3}$$

Donde, M_s , M_0 y M_h corresponden con los pesos de la muestra saturada, muestra seca y muestra sumergida respectivamente.

Coefficiente de absorción capilar según la norma UNE-EN 1925:1999 [68]: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad”. El objetivo es comprobar que el volumen de poros en materiales, especialmente en aquellos empleados en construcción, es un factor clave para evaluar la capacidad de absorción ascendente de agua. Este fenómeno ocurre dentro de dichos materiales, como en los cimientos y fachadas de edificios.

La propiedad mencionada se atribuye principalmente a la fuerza de succión y es esencial en estos tipos de materiales y en las aplicaciones que se les dan, debido a que la infiltración de otros agentes dañinos puede ocurrir de manera similar y causar daños en las estructuras de dichos materiales. Cuando se hace referencia a la capilaridad (leer sección 2.2), se trata del aumento o disminución de líquido que sucede en los poros de un material que está parcialmente sumergido. Otra característica que afecta a este proceso es el tamaño de los poros, ya que la capilaridad se presenta en aquellos con un diámetro comprendido entre 0.1µm y 100µm [69].

Se concluye que cuanto mayor sea la cantidad de poros con diámetro pequeño, mayor será la fuerza de succión en el interior del material. Esto, a su vez, tendrá una influencia directa en la altura del frente capilar, ya que, a mayor fuerza de succión, mayor será la altura del frente.

Antes de comenzar el ensayo, se procedió a secar las muestras en estufa a 75°C hasta alcanzar peso constante (M_0). A partir de este instante se procede con el ensayo siguiendo los siguientes pasos:

1. Se sumergen parcialmente las muestras hasta cubrir aproximadamente un cuarto de su altura (Figura 3-1). Para garantizar que exista el máximo contacto posible entre las muestras y el agua, se procedió a colocar las muestras sobre un soporte metálico.
2. Se procede a registrar el peso de cada una de las muestras en los intervalos de tiempo fijados por la norma UNE.
3. Finalmente se procede a registrar con estos pesos la cinética de absorción como el contenido de agua absorbida en función del tiempo.
4. De la parte lineal de la curva de absorción se obtiene el coeficiente capilar.

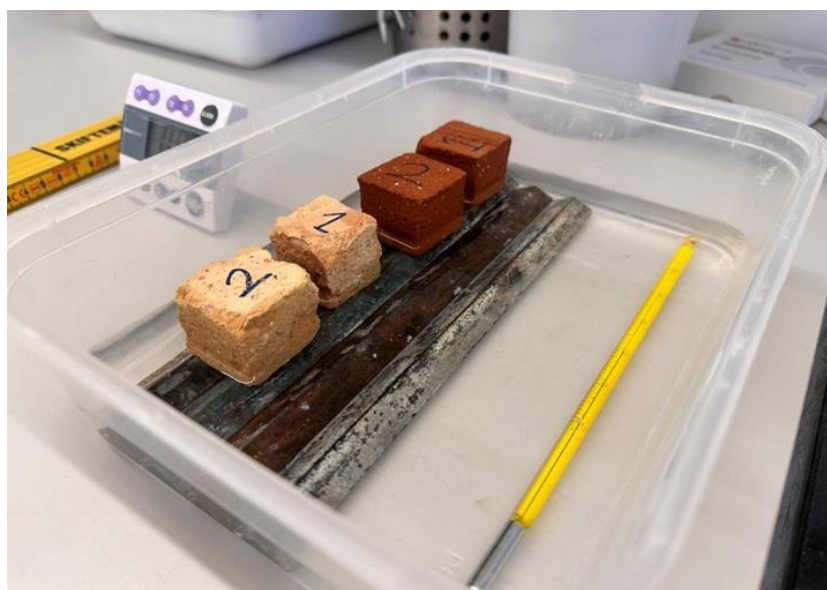


Figura 3-1. Determinación del coeficiente de absorción capilar.

La porosidad capilar se obtiene a partir de la siguiente expresión que viene recogida en [5] y tiene la siguiente forma:

$$P_{cap}(\%) = \frac{M_s}{V_p \cdot d} 100 \quad \text{Ec. 3- 4}$$

Donde M_s es la cantidad de agua total que la muestra absorbe por capilaridad en kg, V_p es el volumen de la muestra en m^3 y d la densidad del agua en kg/m^3 .

La medición de la **porosidad accesible al mercurio** se lleva a cabo utilizando la técnica conocida como porosimetría de intrusión de mercurio o MIP, la cual permite determinar la densidad, distribución y volumen de los poros presentes en la muestra analizada. Este método se fundamenta en la relación existente entre el tamaño de los poros y la presión ejercida durante la introducción de mercurio (Hg) en su interior.

El instrumento empleado para medir esta característica ha sido el porosímetro Micrometrics (Auto Pore IV 9500), cuyo volumen de muestras óptimo equivale a 1 cm^3 . Este dispositivo cuenta con dos rangos de presión: uno de baja presión que oscila entre 14 y 200 KPa, y otro de alta presión que varía de 0,20 a 225 MPa. De esta manera, se pueden medir poros con diámetros comprendidos entre $360\text{ }\mu\text{m}$ y $3,8\text{ nm}$ [70].

El procedimiento utilizado en este análisis implica incrementar gradualmente la presión desde el vacío. A medida que se aumenta la presión, el instrumento mide la cantidad de mercurio que es absorbido por la muestra. Con la ayuda de la ecuación de Washburn, se puede determinar el tamaño de los poros basándose en la cantidad de mercurio que ha sido absorbida a una determinada presión. En consecuencia, la presión requerida para que el mercurio penetre en los poros es inversamente proporcional al tamaño de los mismos [5], [71].

A partir de los valores del porosímetro es posible determinar índices de durabilidad que permiten estimar que material es más susceptible de sufrir procesos de alteración ocasionados por las presiones internas que puede ejercer el agua o las sales solubles en el interior de los poros explicados en profundidad en la sección 2.2 y sección 2.4.1. El estimador empleado en este trabajo es el estimador dimensional de durabilidad DDE definido por Ordóñez [72]. Este estimador, empleado en numerosos estudios [73]–[75] se calcula a través de la siguiente expresión:

$$DDE (\mu\text{m}^{-1}) = \sum \left[\left(\frac{D_v(r_i)}{r_i} \right) P_a \right] \quad \text{Ec. 3- 5}$$

Donde D_v representa la distribución del tamaño de poros para cada poro, r_i es el tamaño de poros expresado en μm y P_a la porosidad accesible al agua en tanto por uno.

El **Potencial zeta** (explicado con más detalle en la sección 2.6) fue medido empleando el Zetasizer Nanoseries, este equipo es capaz de medir el potencial zeta mediante la determinación de la movilidad electroforética y empleando la ecuación de Henry (ver Figura 3-2). El equipo aplica un experimento de electroforesis y, mediante velocimetría láser Doppler, mide la velocidad de las partículas que se desplazan hacia el electrodo de carga opuesta. La velocidad se expresa en unidades de intensidad de campo [76].

El equipo solo determina el potencial zeta de aquellos materiales que se ajustan a la aproximación de Smoluchowski, es decir, se calcula para partículas que sean mayores de $2\text{ }\mu\text{m}$ disueltas en electrolito con una cantidad de sal mayor a $0,001\text{ M}$ [77]. Para este experimento se analizó 1 gramo de polvo de cada muestra en 25 ml de agua destilada.



Figura 3-2. Zetasizer Nanoseries.

3.1.2 Montajes realizados.

El montaje de las celdas empleadas para llevar a cabo el estudio experimental que permitirá medir el coeficiente electro-osmótico de ambos ladrillos está basado en un trabajo previo desarrollado por Laursen [62] y que tenía como objetivo determinar este coeficiente en arcillas. En nuestro caso se emplearon celdas cilíndricas de 5 cm de diámetro interno fabricadas en policarbonato capaz de resistir altas temperaturas y de eliminar todos aquellos gradientes que no sean el de potencial. Gracias a la aplicación de dicho gradiente se podrá observar el movimiento del agua en un tubo capilar diseñado exclusivamente para este TFG en el software Autodesk Inventor e impreso en 3D empleando la impresora de resina de la marca “Elegoo” modelo “Creality”.

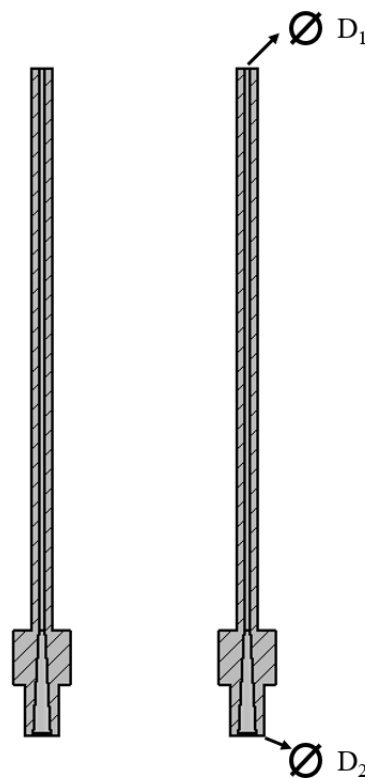


Figura 3-3. Diseño en Autodesk Inventor del tubo capilar (Diseño propio).

Cabe destacar que para lograr el diseño que mejor se adaptara a las necesidades del montaje se realizaron varios bocetos variando la longitud total del tubo capilar entre 130 mm y 180 mm (Para la impresión del tubo de 180 mm se empleó la impresora de la marca “Elegoo“ modelo “Saturn“) y los diámetros que se observan en la Figura 3-3 , donde D_1 corresponde al diámetro interior del tubo capilar donde tendrá lugar el movimiento de agua y D_2 se refiere al diámetro exterior del tapón cuya función será sellar una de las celdas del montaje. La razón por la que se diseñó el hueco inferior de menor tamaño no es otra que la de facilitar el llenado del tubo capilar desde el interior de la celda. Para D_1 se emplearon valores de 1 y 1,4 mm y para D_2 , valores de 8 y 8,2 mm. Tras realizar la impresión de los diferentes modelos se observó que con los diseños de longitud igual a 180 mm no se obtuvieron buenos resultados de impresión, mientras que, con los diseños de 130 mm, $D_1 = 8$ mm y $D_2 = 1,4$ mm los resultados fueron satisfactorios en impresión y en el desarrollo del experimento. También se realizaron unas marcas en cada tubo a cada cm que se usarán para determinar la altura alcanzada por el agua y el tiempo empleado en alcanzarla.

A continuación, se explicarán los dos montajes realizados para la realización de los ensayos. El primero de ellos, se trata de un montaje en el que las celdas fueron colocadas en serie. En el segundo que se llevó a cabo, se realizó un montaje de las celdas en paralelo siendo necesaria la fabricación de dos puentes salinos cuyo fin será detallado más adelante.

3.1.2.1 Montaje en serie.

Para facilitar la comprensión, se han diseñado las piezas del montaje y se han ensamblado usando Autodesk Inventor (ver Figura 3-4), además se ha realizado un corte para poder observar el montaje en su interior y se ha dado nombre a cada una de las celdas para explicar el contenido y sellado de cada una de ellas.

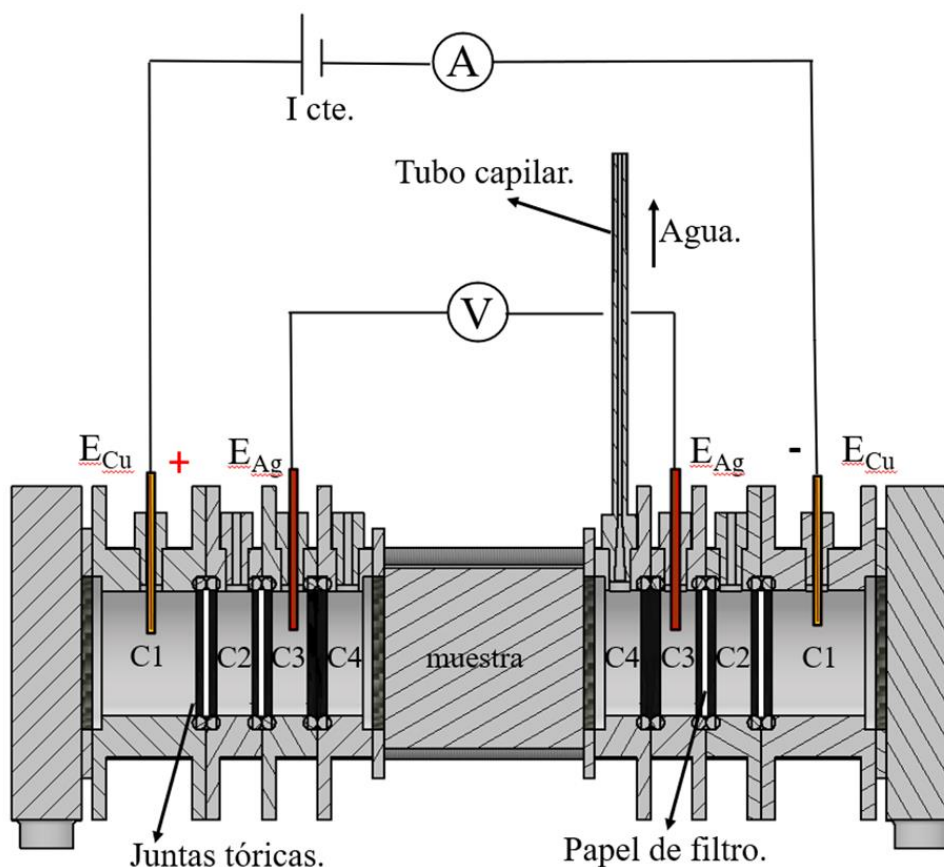
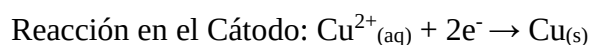
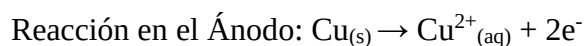


Figura 3-4. Corte montaje en serie (Diseño propio).

Cada montaje consta de dos compartimentos, uno anódico y otro catódico, compuesto cada uno de ellos por el mismo número de celdas (4).

- En las celdas C1 se colocaron los electrodos de cobre (E_{Cu}), que se crearon empleando tapones diseñados en Autodesk Inventor y en los que se insertó cable de cobre de 1 mm de diámetro. Ambas celdas se llenaron, durante las primeras mediciones, de una disolución 1,0 M de $CuSO_4$ y, tras la recepción de $CuCl_2$, se comenzó a rellenar las celdas con una disolución 1,0 M de este compuesto, apreciándose una notable mejora en el rendimiento del experimento y en la velocidad de subida del agua por el tubo capilar. En los electrodos, el proceso químico que tiene lugar es el siguiente:



- Las celdas C2 están selladas con un tapón, el cual, fue envuelto con parafilm para eliminar la entrada de aire a través del agujero superior. Estas celdas se rellenaron con agua del grifo y en cada extremo de la celda, tras la junta tórica, se colocaron 3 trozos de papel de filtro cuyo objetivo es aislar la disolución y evitar que se mezcle con el agua del grifo ya que esta mezcla disminuiría el rendimiento del experimento.
- Las celdas C3 se emplearon para colocar los electrodos de referencia plata (E_{Ag}). Estos electrodos se emplean para medir la diferencia de potencial a ambos lados de la muestra de ladrillo y asegurar que durante el proceso no tenga lugar la hidrólisis de agua con la consecuente generación de gases. Los electrodos se fabricaron empleando alambre de plata de 1 mm de diámetro y se cubrieron con una resina, de tal forma que solo quedara 1 cm de la punta de plata al aire. Por último, el alambre fue colocado durante 30 minutos en una disolución de $NaOCl$ con el fin de obtener una capa de cloruro de plata. Las celdas se llenaron también con agua del grifo.
- Las celdas C4 son las encargadas de acoger el tubo capilar empleado para mostrar con claridad el movimiento del agua y realizar la medición del flujo electro-osmótico. En los primeros ensayos, se empleó un tubo por cada compartimento, aunque en las últimas pruebas, únicamente se colocó uno de los tubos capilares en el compartimento catódico, al ser hacia éste hacia donde se ve forzada a moverse el agua. En lugar del otro tubo, se colocó un tapón para lograr mejorar el sellado del montaje. La punta del tubo está abierta al aire para permitir la libre circulación del líquido y evitar presiones alterantes. También cabe destacar que se colocaron dos refuerzos de sellado de neopreno en los extremos de ambas celdas para evitar pérdidas de agua y garantizar el vacío en el interior del montaje. Las celdas C4 también fueron rellenadas de agua del grifo.

Previamente a la realización de los ensayos, las muestras de ladrillo fueron recubiertas de una resina epoxy, de tal forma que, el flujo de agua hacia la piedra, solo tuvo lugar en la zona que se dejó sin cubrir, que coincide con el diámetro de los huecos de las celdas. Tras realizar esta cobertura, se dejó reposar las piedras una semana, para posteriormente saturarlas a vacío con agua. Para cada ensayo, se colocó la muestra a ensayar completamente saturada en agua entre las celdas C4, haciendo presión con los refuerzos de sellado de neopreno a fin de evitar la entrada de aire [62]. En la Figura 3-5 se muestra el montaje real con el que se llevaron a cabo las mediciones.

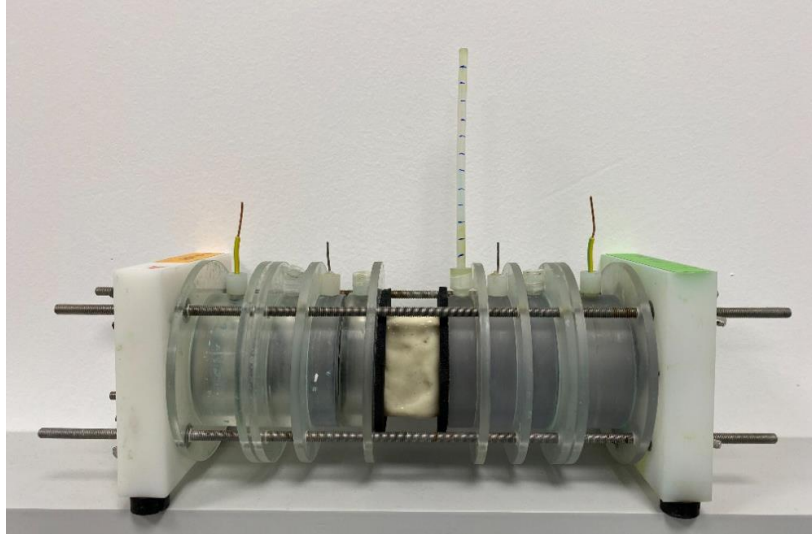


Figura 3-5. Montaje real en serie.

3.1.2.2 Montaje en paralelo.

Este montaje (ver Figura 3-6) está realizado en dos alturas para tratar de limitar en mayor medida la posible migración del cloruro desde los compartimentos en contacto con los electrodos de cobre al ladrillo. La conexión entre las celdas superiores e inferiores se realizó mediante el uso de dos puentes salinos. Al igual que en el montaje anterior, se ha llevado a cabo un ensamblaje y corte con todas las piezas empleadas para llevar a cabo la explicación del contenido de cada una de las celdas.

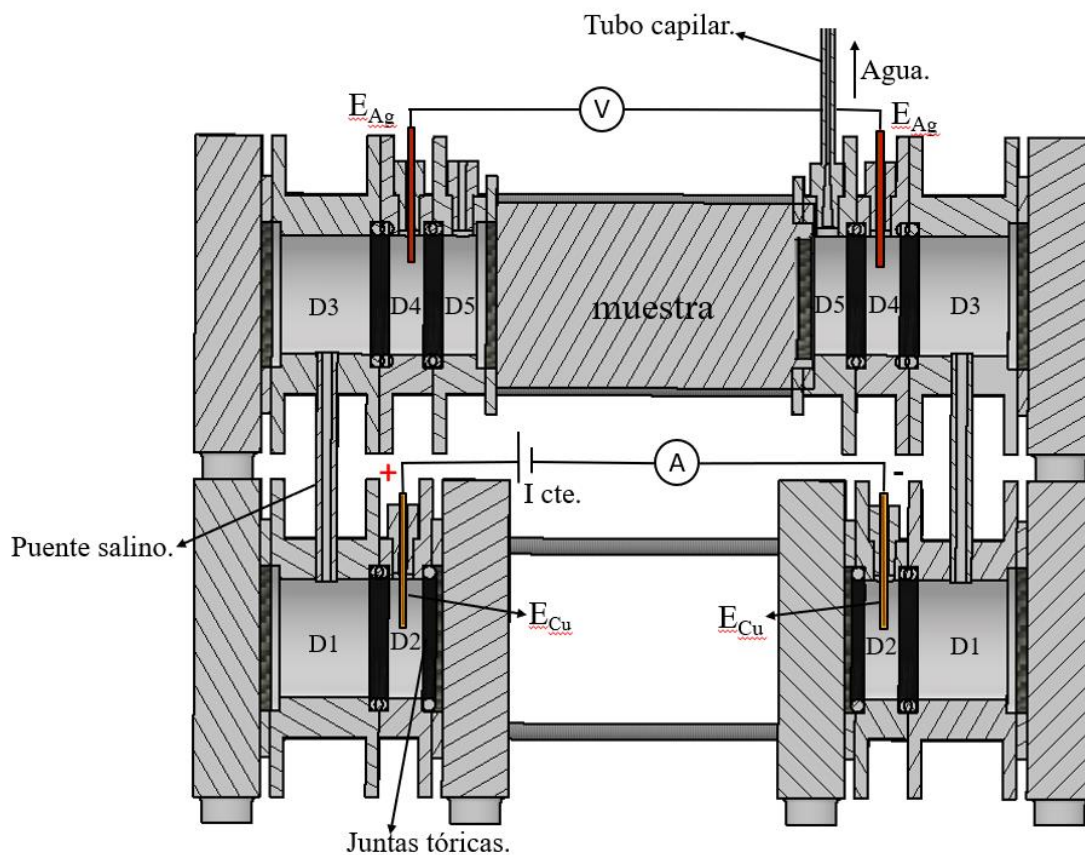


Figura 3-6. Corte montaje con puente salino (Diseño propio).

- Las celdas D1 se rellenaron, primeramente, con la disolución 1,0 M de CuSO_4 , y finalmente con la disolución 1,0 M de CuCl_2 . Para conseguir hacer llegar la disolución al montaje superior, se fabricaron dos puentes salinos empleando tubo de plástico. Los puentes se rellenaron con algodón que adsorbía las disoluciones haciendo más fácil el ascenso a la celda superior.
- Las celdas D2 se emplearon para colocar los electrodos de cobre (E_{Cu}) que conectan con la fuente de alimentación a través de la cual se suministra corriente de valor constante. Para la fabricación de estos electrodos se siguió el mismo proceso que en el montaje en serie. Ambas celdas se rellenaron con las disoluciones y tuvo lugar la misma reacción que en el montaje anterior.
- Las celdas D3 se rellenaron con agua del grifo y sirven de conexión con las celdas D1 situadas en la parte inferior a través del puente salino, por tanto, una de las ventajas de este montaje es que, gracias a los puentes salinos, se asegura la separación entre el agua del grifo y la disolución, no siendo necesario el empleo del papel de filtro empleado en el montaje anterior.
- Los electrodos de plata para medir la caída de potencial se colocaron en las celdas D4 y se rellenaron con agua del grifo. Para su fabricación se empleó el mismo procedimiento que en el montaje anterior.
- Las celdas D5 se emplearon para colocar la muestra de ladrillo entre ambas empleando el refuerzo de sellado de neopreno en cada extremo. Las celdas se rellenaron con agua del grifo y fueron selladas con el tubo capilar y con uno de los tapones diseñados en Autodesk Inventor.

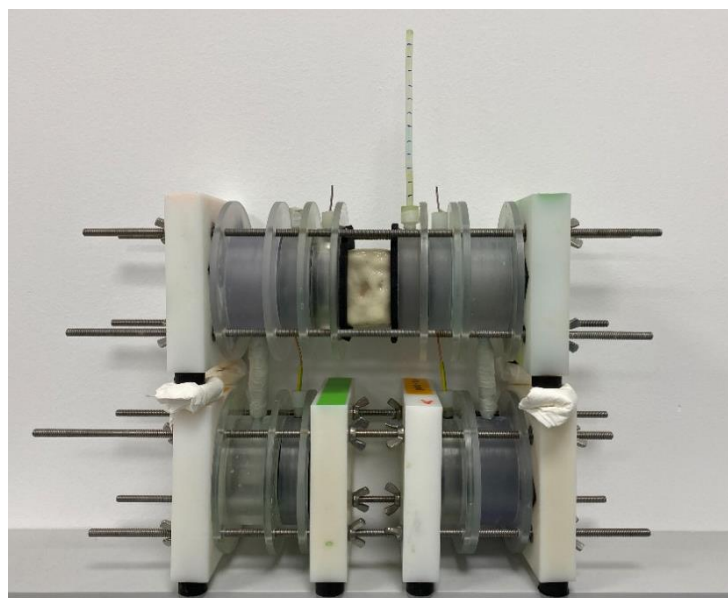


Figura 3-7. Montaje real puente salino.

En la Figura 3-7 se muestra el montaje real con el que se realizó la toma de medidas y donde se pueden apreciar los puentes salinos fabricados.

3.2 Proceso de medición del coeficiente electro-osmótico.

Tras realizar el montaje de las celdas, se procedió a rellenarlas con las respectivas disoluciones para medir el coeficiente electro-osmótico. Es importante destacar que se trató de rellenar las celdas de disolución y agua del grifo a la misma vez, con el objetivo de igualar las presiones en el interior de las celdas y evitar que ambos líquidos se mezclen, lo cual, como se ha explicado en la sección anterior, deteriora la calidad del experimento, si bien, no fue posible lograr la completa separación en todas las mediciones. Tras realizar los llenados, se sellaron las celdas con los electrodos de plata y cobre, los tapones y el tubo capilar. Cualquier punto del montaje que pudiese ser susceptible de quedar abierto se cubrió con atención para posibilitar que el flujo de agua se produzca únicamente en el interior de las muestras de los ladrillos.

Antes de aplicar la corriente eléctrica, se dejó reposar el montaje completo durante 15 minutos para lograr un equilibrio de presiones entre la muestra a medir y las disoluciones de las celdas y para evitar presiones de advección. Una vez establecida la corriente eléctrica entre los electrodos de cobre, se midió el tiempo que tarda el agua en ascender por el tubo capilar 2, 4, 6 y 8 cm. Tras lograr un ciclo completo de ascenso capilar, se invertía la polaridad para registrar el tiempo que emplea el agua en descender esas mismas distancias y para verificar que el flujo de agua se debe exclusivamente a la corriente eléctrica.

Se llevó a cabo un total de 12 cambios de polaridad para cada muestra (una de ladrillo rojo y otra de ladrillo amarillo) y para terminar de garantizar que el flujo de agua se debía al principio electro-osmótico se descartó el primer cambio de polaridad en ambas muestras.

Para cada uno de los ensayos se trató de realizar un barrido de densidades de corriente para poder determinar de una forma más precisa el flujo electro-osmótico. El valor de las densidades de corriente empleadas osciló en un rango entre $3,6 \text{ A/m}^2$ y $21,4 \text{ A/m}^2$. Para lograr dichas densidades de corriente se varió el voltaje de la fuente de alimentación en un rango que oscilaba entre los 60 V hasta alcanzar los 10 V, disminuyendo dicho voltaje de 10 V en 10 V sucesivamente.

Además de medir el tiempo que tardó el agua en ascender por el tubo capilar, se empleó un multímetro conectado a los electrodos de plata para determinar la caída de potencial a ambos lados de las muestras de cada ladrillo para calcular, posteriormente, el gradiente de voltaje expresado en V/m y la resistividad de las muestras al paso de la corriente. A partir de la determinación del flujo de agua y del gradiente de potencial se determina el coeficiente electro-osmótico según la Ec. 2- 7.

Por último, cabe destacar que el montaje en serie (ver figura Figura 3-5) funcionó de manera satisfactoria con ambas piedras y permitió tomar medidas que han permitido caracterizar las gráficas que se presentarán en el apartado de resultados, mientras que, el montaje con el puente salino (ver Figura 3-7), no funcionó como se esperaba y no se consiguió que circulase corriente suficiente para lograr el ascenso capilar del agua y la toma de datos posterior.

4 RESULTADOS

4.1 Propiedades de los ladrillos.

Tabla 4-1. Propiedades de los ladrillos.

Parámetros	Rojo	Amarillo
Porosidad accesible al agua (% v/v)	23,4	30,58
Porosidad accesible al mercurio (% v/v)	30,9	37,9
Porosidad Capilar (% v/v)	6,5	8,3
Coeficiente de Capilaridad ($\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$)	0,60	0,51
Coeficiente de absorción del agua (bajo vacío) (% w/w)	16,06	19,93
Coeficiente de absorción del agua (por capilaridad) (% w/w)	10,40	15,74
Densidad aparente (kg/m^3)	1628	1551
Densidad real (kg/m^3)	2125	2234
DDE (μm^{-1})	0,42	0,58
Potencial zeta (mV)	-36	-32.36
Keo ($\text{m}^2 / \text{s V}$) siguiendo la ecuación del modelo H-S (Ec.2-3)	6.60E-07	7.75E-07

La Tabla 4-1 muestra los parámetros obtenidos para las propiedades físicas relacionadas con el transporte de fluido en materiales porosos. Tal y como se aprecia en los resultados, se puede determinar que el ladrillo amarillo posee mayor porosidad que el ladrillo rojo, en términos de porosidad accesible al agua y porosidad accesible al mercurio (en ambos casos el resultado en el ladrillo amarillo es superior a un 7 %). También se puede apreciar que la porosidad capilar del ladrillo amarillo es superior a la del ladrillo rojo en un 2%.

Atendiendo a los coeficientes de absorción del agua, tanto en vacío, como por capilaridad, se deduce que la conectividad porosa del ladrillo amarillo es superior a la del ladrillo rojo.

A partir de la distribución del tamaño de poros en ambos ladrillos (Tabla 4-2 y Figura 4-1), se aprecia que el ladrillo rojo presenta menor volumen poroso que el ladrillo amarillo para todos los rangos de tamaño de poro que se detectaron en el ensayo mediante la inyección de mercurio, excepto para el rango de poros cuyo tamaño se encuentre por debajo de $0,1 \mu\text{m}$ (poros no accesibles al agua por su tamaño) y

en el rango entre 10-100 μm , que supone el 35% del total de poros presentes en el ladrillo rojo posicionándose como la segunda familia de poros de este ladrillo.

El ladrillo amarillo, posee un volumen de poros mayor dentro del rango de poros con un tamaño de acceso capilar entre 0,1-100 μm (229 mL/g para el ladrillo Amarillo y 170 mL/g para el ladrillo Rojo), mostrando gran cantidad de poros comprendidos entre 0,1-100 μm en su estructura correspondientes a poros con tamaño de acceso capilar. Del total de poros del ladrillo amarillo, el 95,15 % se encuentran dentro del rango 0,1-100 μm , mientras que el ladrillo rojo posee un 63 % de poros de este tamaño.

A partir de los resultados obtenidos con el porosímetro y la aplicación del estimador de durabilidad de Ordóñez (Ec. 3- 5) se ha obtenido el índice de durabilidad. Este índice DDE es superior en el ladrillo amarillo que en el rojo (Tabla 4-1) lo que indica que el ladrillo amarillo es más susceptible a sufrir procesos de alteración ocasionados por agentes como el agua o las sales solubles.

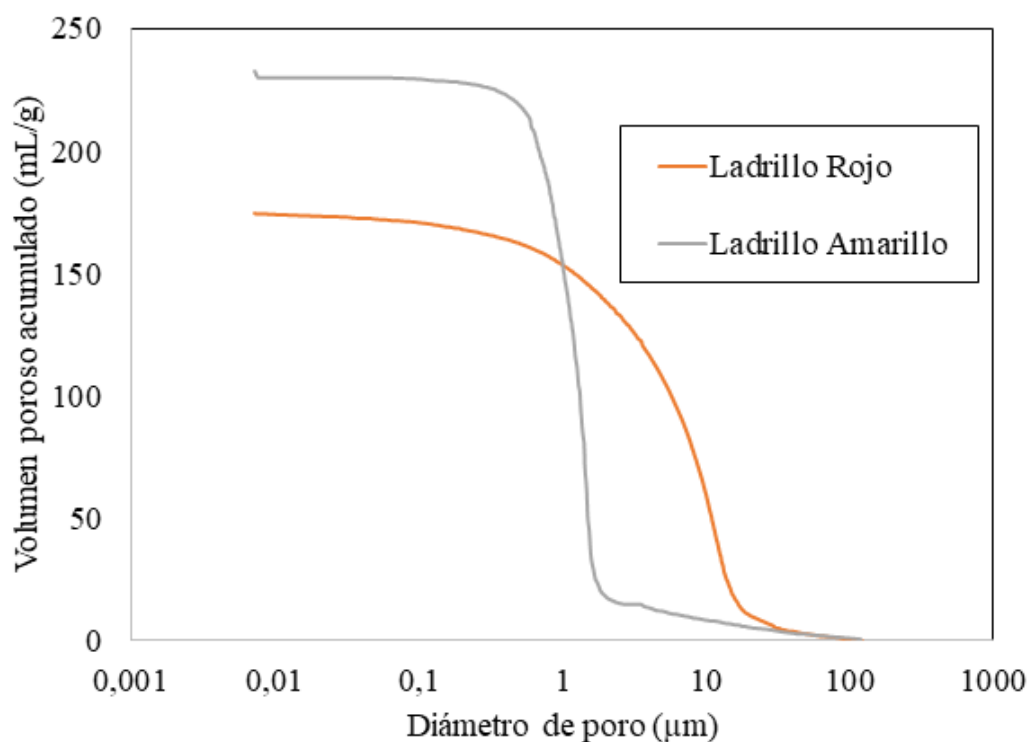


Figura 4-1. Volumen poroso acumulado respecto al diámetro de poro para ambos ladrillos.

Tabla 4-2. Volumen total de mercurio introducido para diferentes intervalos de tamaño de poro (en mL/g y %).

Ladrillo	Volumen total introducido (mL/g)	Tamaño de poros (μm)				
		<0,1	0,1-1	1-10	10-100	>100
Rojo	174.42	3.80	17.25	93.19	59.70	0.48
Amarillo	232.82	3.21	74.51	146.98	7.35	0.77
Ladrillo	Volumen total introducido (%)	<0,1	0,1-1	1-10	10-100	>100
Rojo	100.00	2.18	9.89	53.43	34.23	0.28
Amarillo	100.00	1.38	32.00	63.13	3.16	0.33

En cuanto al coeficiente capilar, se puede observar que es superior en el ladrillo rojo. Esto se debe a que el ladrillo rojo absorbe agua más rápido que el amarillo, sin embargo, debido a que presenta menor porosidad, alcanza estabilidad antes que el ladrillo amarillo (esta fase se corresponde con el llenado de los poros más pequeños). Además, la saturación final en las mismas condiciones, será mayor en el ladrillo amarillo debido a que posee mejor conectividad porosa tal y como muestran los resultados (ver Figura 4-2 y Figura 4-3). Por último, los resultados de la porosidad capilar también evidencian que la porosidad del ladrillo amarillo es más elevada que la del ladrillo rojo.

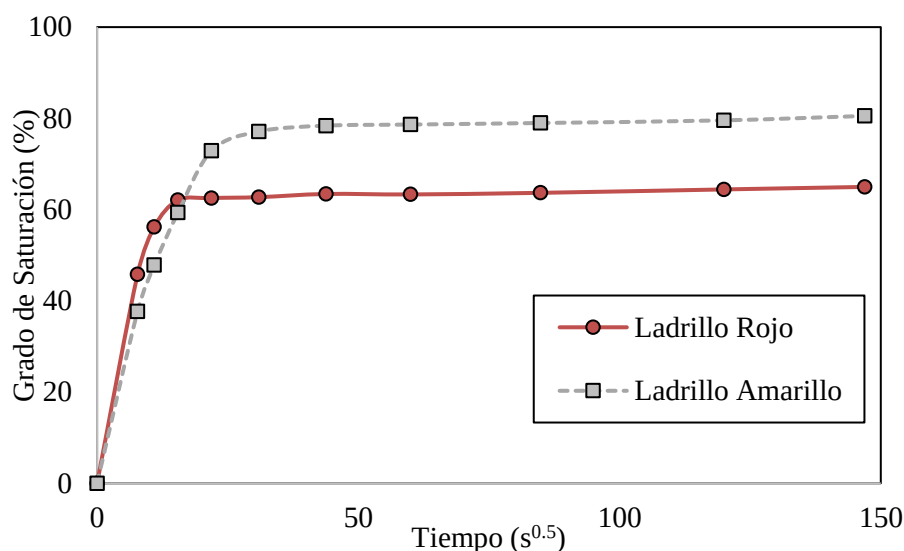


Figura 4-2. Grado de saturación (%) respecto al tiempo ($s^{0.5}$).

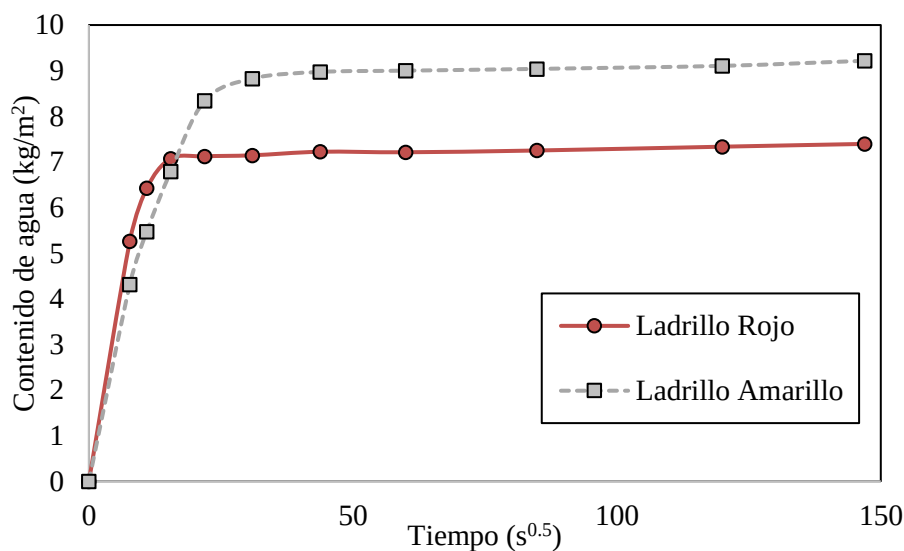


Figura 4-3. Contenido de agua (kg/m^2) respecto al tiempo ($s^{0.5}$).

Para ambos ladrillos, el potencial zeta resultó negativo (-36 mV y -32,36 mV para ladrillo amarillo y rojo respectivamente) lo cual significa que el flujo electro-osmótico tendrá lugar en ambos casos desde el ánodo hacia el cátodo.

Como se puede observar en los resultados, el potencial zeta del ladrillo amarillo es superior al ladrillo rojo, de lo que se puede deducir que la anchura de la doble capa eléctrica (explicada en la sección 2.6) en el ladrillo amarillo será superior a la del rojo.

Mediante estos datos y con el modelo de Helmholtz y Smoluchowski (Ec. 2- 3), el cual no tiene en cuenta la distribución del tamaño de poros en materiales de construcción, se deduce que la permeabilidad

electro-osmótica que se debería obtener, si el material se comportase igual que un suelo, sería superior en el ladrillo amarillo ($6,60\text{E-}07 \text{ m}^2 / \text{s V}$ para el ladrillo rojo y $7,75\text{E-}07 \text{ m}^2 / \text{s V}$ para el ladrillo amarillo).

4.2 Flujo Electro-osmótico.

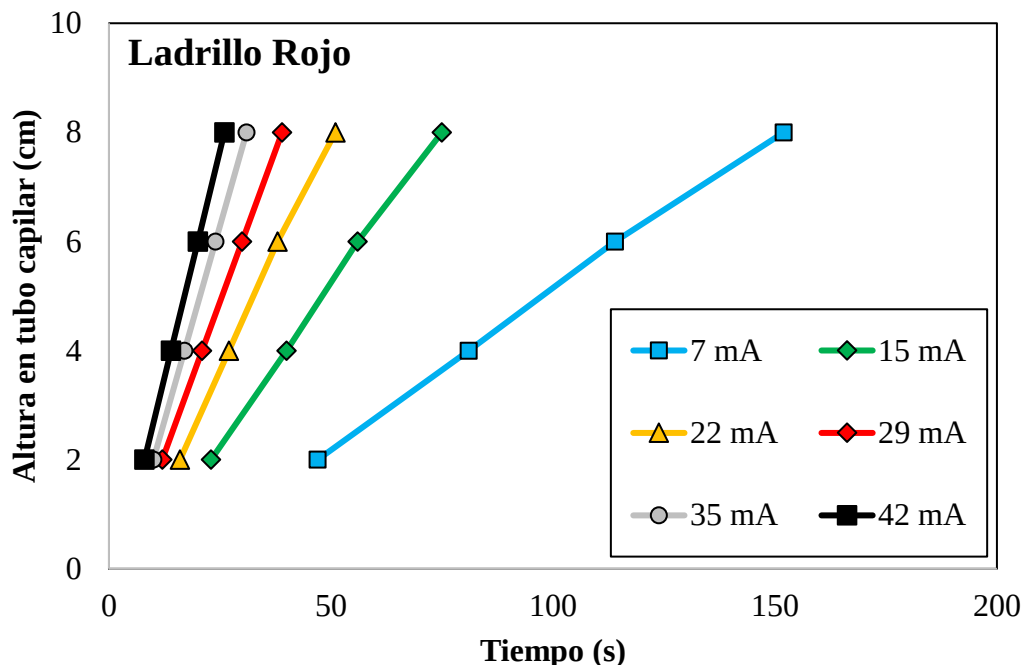


Figura 4-4. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo rojo.

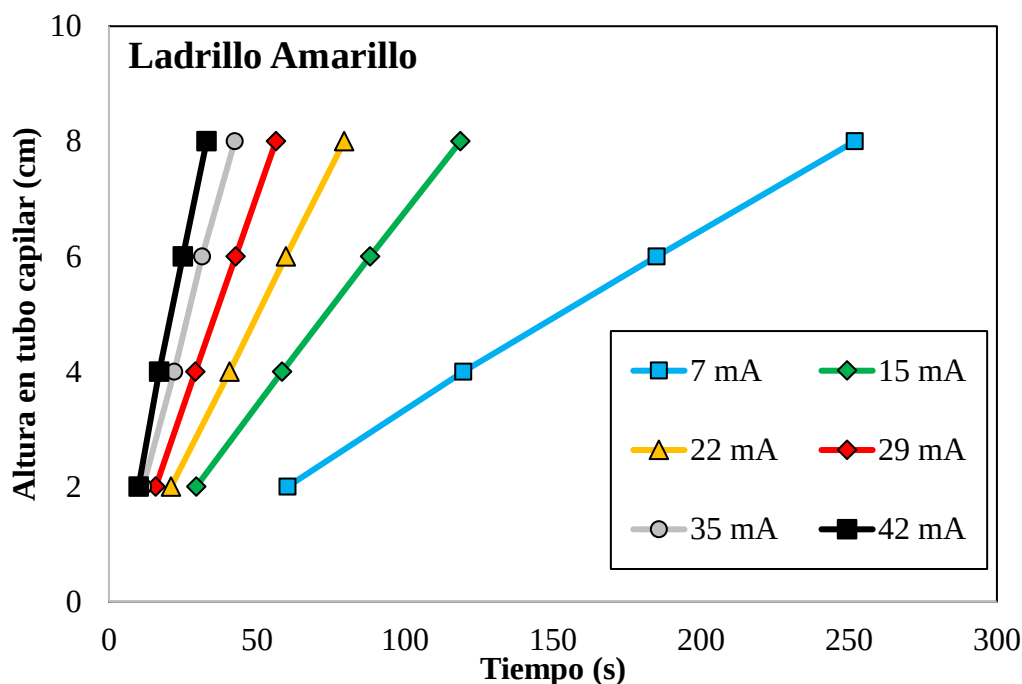


Figura 4-5. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo amarillo.

En la Figura 4-4 y en la Figura 4-5 se muestra el tiempo necesario para provocar que el flujo de agua ascienda por el tubo capilar hasta 2, 4, 6 y 8 cm para diferentes valores de corriente aplicada (7, 15, 22, 29, 35 y 42 mA). De los resultados obtenidos en las mediciones de ambos ladrillos se puede afirmar que

el ascenso capilar del agua se debe a la electro-ósmosis, partiendo del ánodo hasta el tubo capilar del cátodo.

También se puede observar que a mayor corriente eléctrica aplicada (o densidad de corriente, teniendo en cuenta la geometría de las muestras: 3,6, 7,6, 11,1, 14,6, 17,8 y 21,4 A/m² respectivamente) se obtiene mayor rapidez en el movimiento del agua independientemente del tipo de ladrillo ensayado (Tabla 4-3). Estos resultados obtenidos coinciden con los que se encuentran recogidos en el estudio de Bertolini [52].

Tabla 4-3. Velocidad electro-osmótica en cm/s para ambos tipos de ladrillo para todas las intensidades de ensayo.

Intensidad (mA)	Densidad de corriente (A/m ²)	V _{eo} (cm/s) en Rojo	V _{eo} (cm/s) en Amarillo
42	21,4	0,333	0,259
35	17,8	0,285	0,195
29	14,6	0,222	0,147
22	11,1	0,172	0,102
15	7,6	0,116	0,067
7	3,6	0,057	0,031
	Promedio	0,197	0,133

Ambos tipos de ladrillos han sido comparados para las intensidades altas (29,35 y 42 mA) y para las bajas (7, 15 22 mA) (ver Figura 4-6 y Figura 4-7) observando que, para la misma intensidad de corriente, el flujo de agua se mueve más rápido en el ladrillo rojo que en el ladrillo amarillo (ver Tabla 4-3). A partir de estos resultados, se puede deducir que la distribución del tamaño de poros influye en gran medida en el movimiento del agua, ya que este es más rápido en el ladrillo rojo, el cual presenta una menor microporosidad, mientras que la conectividad entre poros supone un factor menos determinante a la hora de evaluar la rapidez del flujo de agua en su ascenso por el tubo capilar, ya que el amarillo presentaba una mayor conectividad en sus poros.

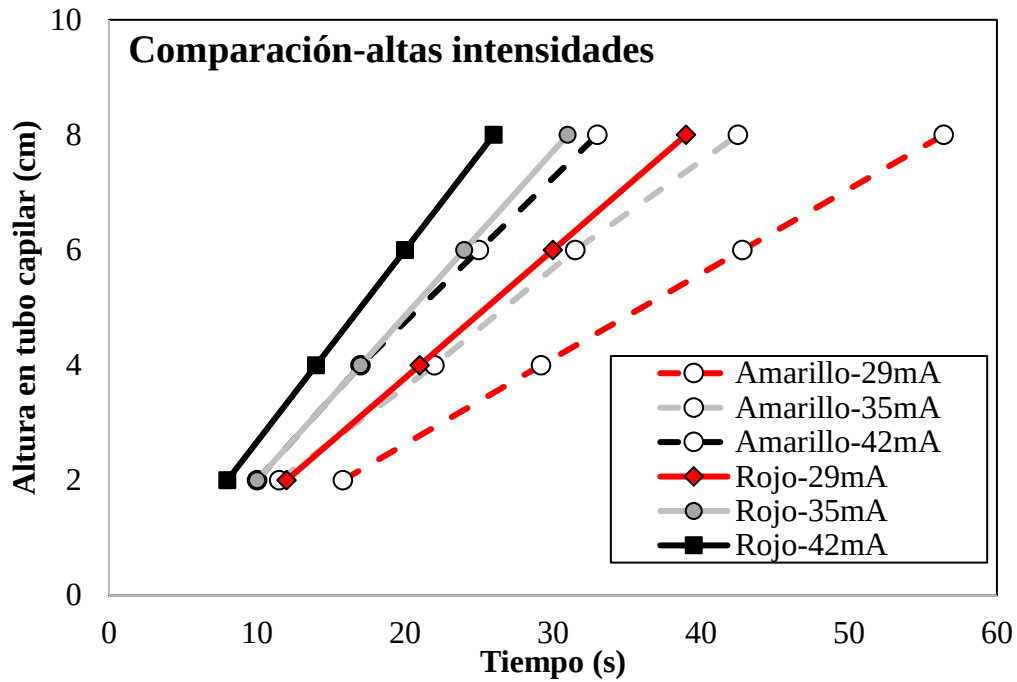


Figura 4-6. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo rojo y amarillo comparando en altas intensidades.

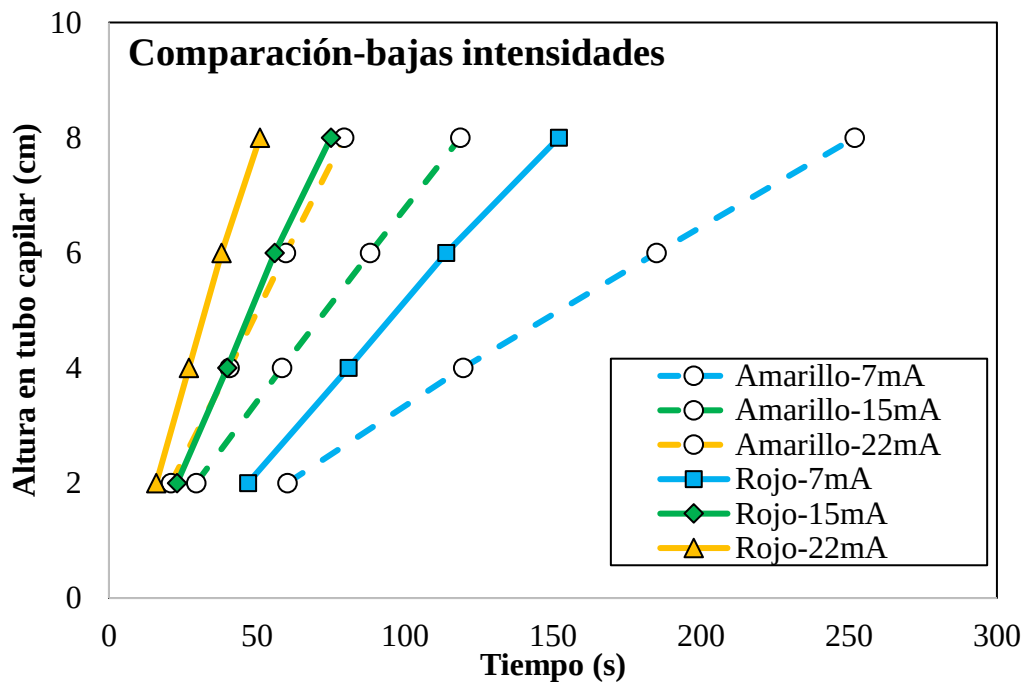


Figura 4-7. Altura del tubo capilar (cm) respecto al tiempo (s) para ladrillo rojo y amarillo comparando en bajas intensidades.

Tal y como se detalla en la sección 2.6.1, al trazar el volumen de flujo electro-osmótico en función del gradiente de potencial (Ec. 2- 7), se puede obtener una relación lineal entre ambas variables cuya pendiente definirá el verdadero coeficiente de permeabilidad electro-osmótica del material teniendo en cuenta todos aquellos factores que determinan la verdadera estructura porosa de la piedra.

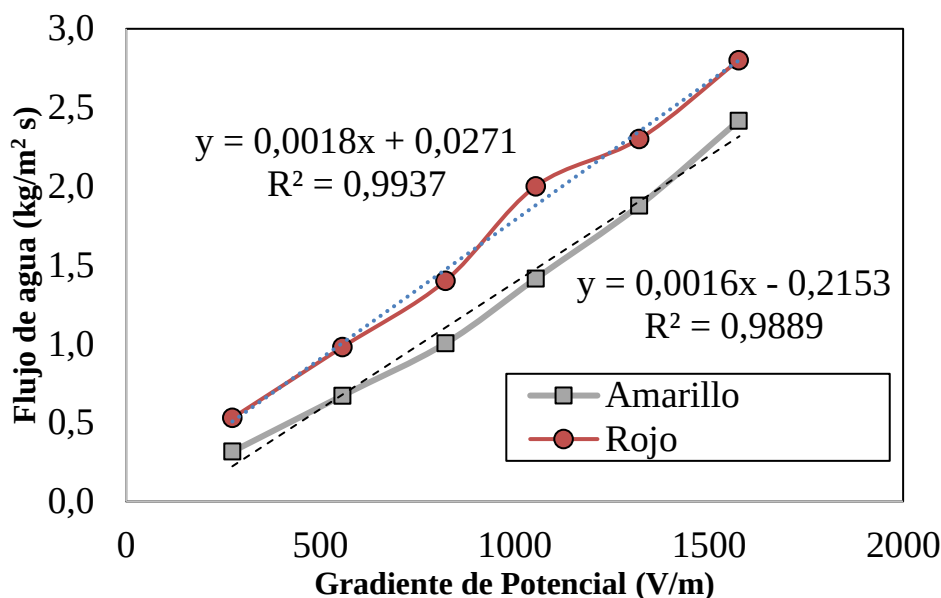


Figura 4-8. Flujo de agua (kg/m² s) respecto al gradiente de potencial (V/m).

La Figura 4-8 muestra que, efectivamente existe dicha relación entre parámetros para ambos tipos de ladrillo y los valores correspondientes de permeabilidad electro-osmótica se muestran en la Tabla 4-4. Estos resultados muestran que, a diferencia de lo que propone el modelo H-S, el cual no tiene en cuenta la influencia del tamaño de poro en la doble capa eléctrica, el coeficiente electro-osmótico del ladrillo rojo es superior al del amarillo. Esto se debe, como muestran estudios anteriores [63], a la influencia que ejerce la distribución del tamaño de poros sobre el flujo electro-osmótico. La notable presencia de microporos en el ladrillo amarillo provoca que el espesor de la doble capa sea mayor en esta zona. En el interior de estos microporos, la doble capa choca a ambos lados del poro dificultando el movimiento del agua. Los resultados evidencian que el espesor de la doble capa eléctrica no puede ser despreciado en relación con el tamaño de poros de las muestras de ladrillo si se desea obtener resultados fiables de permeabilidad electro-osmótica en materiales de construcción. Solo se podrá considerar que la permeabilidad electro-osmótica coincide con la del modelo H-S cuando el espesor de la doble capa eléctrica sea lo suficientemente pequeño.

Tabla 4-4. Coeficiente electro-osmótico para ambos tipos de ladrillo en todas las alturas de ensayo.

Alturas (cm)	K _{eo} (Kg / m s V)	
	Ladrillo Rojo	Ladrillo amarillo
2	0,0016	0,0013
4	0,0018	0,0015
6	0,0019	0,0016
8	0,0019	0,0016
Promedio	0,0018	0,0015

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En esta sección se presentan las ideas clave que derivan del desarrollo de este estudio, a la misma vez que se evalúa el cumplimiento de los objetivos fijados (ver sección 1.2). Además, se establecen las distintas líneas de investigación futuras que ayuden a enriquecer este estudio.

5.1 Conclusiones y cumplimiento de objetivos.

En cuanto a los objetivos expuestos, se considera que todos han sido cumplidos durante la consecución del trabajo.

1. Se ha analizado en profundidad el estado del arte actual del agua como agente de alteración y se ha profundizado en las técnicas de conservación de los materiales de construcción, haciendo hincapié en la electro-ósmosis y su aplicabilidad hasta el día de hoy, todo ello expuesto en la sección 2.
2. Se han llevado a cabo todos los ensayos que se propusieron al inicio del trabajo, obteniendo resultados que han sido de gran ayuda a la hora del análisis posterior del coeficiente y la velocidad electro-osmótica en ambos tipos de ladrillo.
3. La realización de los montajes ha sido satisfactoria, habiendo sido posible llevar a cabo dos montajes distintos para comprobar cuál de ellos es más apto para este estudio, lo cual se comenta al final de la sección 3.2.
4. Se ha logrado modelar todas las piezas empleadas en ambos montajes (ver sección 3.1.2), resultando muy útil a la hora de explicar la disposición de todas ellas incluyendo su contenido y sellado. Por último, pese a que la impresión 3D de los tubos capilares dio fallos en los primeros intentos, se ha logrado obtener un diseño que ha permitido evaluar el ascenso capilar del agua en su interior y determinar la velocidad electro-osmótica a partir de este ascenso.

Además, y como principales conclusiones de este estudio:

1. Ha quedado demostrado que, pese a la desconfianza de diversos científicos, es posible movilizar el agua a través de materiales de construcción, al menos a través de ladrillos, mediante procesos electro-osmóticos.
2. El modelo H-S ampliamente utilizado en suelos no proporciona resultados satisfactorios para materiales de construcción. Esto se debe a que este modelo no tiene en cuenta el tamaño de poros, ni la doble capa eléctrica, parámetros cuya importancia es innegable a la hora de analizar la velocidad electro-osmótica en materiales de construcción. A mayor tamaño de poros y mayor grosor de la doble capa eléctrica, se obtendrá un coeficiente electro-osmótico

de menor valor. También cabe destacar que una presencia elevada de microporos en la estructura interna del material supone un decremento de la velocidad del flujo de agua.

5.2 Líneas Futuras.

Durante la realización del TFG han ido apareciendo distintas opciones de mejora de este trabajo de las que pueden surgir diferentes líneas de investigación para trabajos futuros:

- Emplear distintos tipos de materiales, no solo ladrillo, ya que algunas de las propiedades obtenidas como el potencial zeta resultaron ser bastante similares. La aplicación del principio electro-osmótico a materiales con propiedades muy dispares y su posterior comparación puede ser de gran interés.
- Aplicar el principio a un muro de construcción real para estudiar si el principio es válido a la hora de atravesar los distintos materiales que componen el muro.
- Llevar a cabo más ensayos que caractericen más propiedades de las distintas piedras empleadas para investigar cuáles de ellos pueden tener relación con el principio de electro-ósmosis.
- En cuanto a su aplicación en la Armada, este principio podría ser útil ya que durante el desarrollo del trabajo se ha evidenciado que existen zonas de la ENM, tanto en interiores como exteriores, alteradas por el agua pudiendo poner en peligro la integridad de algunos edificios.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Gutiérrez de López, “El concreto y otros materiales para la construcción,” *Departamento de Ingeniería Civil*, 2003.
- [2] M. Alcalde Moreno and A. Martín Pérez, “Indicadores de alteración de los materiales pétreos. Propuesta de una terminología,” *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, Año 4 (15), 68-74., 1996.
- [3] M. Galán Caballero, “Alteraciones específicas de la escultura en piedra,” 2018.
- [4] F. J. Alonso, R. M. Esbert, J. Ordaz, and P. Vázquez, “Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación= Analysis of Stone Material Damages in Buildings,” *Revista Electrónica RECOPAR*, no. 3, pp. 23–32, 2006.
- [5] I. De Rosario and J. Feijoo, “Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos,” *Técnicas de Conservación., Monogr. Da University of Vigo. Tecnoloxía*, vol. 294, 2016.
- [6] X. MAS I BARBERÀ, “Conservación y restauración de materiales pétreos,” *Diagnóstico y tratamiento. Valencia. Ediciones Universidad Politécnica de Valencia*, 2010.
- [7] R. Beltrán Martínez, “Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva,” *Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México*, 2009.
- [8] A. Lozano, G. Lozano, and J. J. del Coz, “Curso: Síndrome, patología y terapéutica de las humedades,” *Gijón: Autoeditor*, 2006.
- [9] E. M. Winkler, *Stone: properties, durability in man’s environment*, vol. 4. Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] Alfredo Llorente Álvarez, “Influencia de las juntas de argamasa de cal en el ascenso de humedad capilar que afecta a las fábricas de ladrillo de tejar antiguo.,” *Universidad de Valladolid*, 2018.
- [11] S. Karaborni, B. Smit, W. Heidug, J. Urai, and E. Van Oort, “The swelling of clays: molecular simulations of the hydration of montmorillonite,” *Science (1979)*, vol. 271, no. 5252, pp. 1102–1104, 1996.
- [12] J. D. Rodrigues, “Swelling behaviour of stones and its interest in conservation. An appraisal,” *Materiales de construccion*, vol. 51, no. 263–264, pp. 183–195, 2001.
- [13] “Deterioro de fachadas por expansión hídrica - Hume Ingeniería.” <https://humeingenieria.es/blog/deterioro-de-fachadas-por-expansion-hidrica/> (accessed Mar. 23, 2023).

- [14] W. Garat, N. le Moigne, S. Corn, J. Beaugrand, and A. Bergeret, "Swelling of natural fibre bundles under hygro-and hydrothermal conditions: Determination of hydric expansion coefficients by automated laser scanning," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 131, p. 105803, 2020.
- [15] J. Graham and V. C. S. Au, "Effects of freeze–thaw and softening on a natural clay at low stresses," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 69–78, 1985.
- [16] J. García-Talegón, A. C. Iñigo, R. Sepúlveda, and E. Azofra, "Effect of Artificial Freeze/Thaw and Thermal Shock Ageing, Combined or Not with Salt Crystallisation on the Colour of Zamora Building Stones (Spain)," *ChemEngineering*, vol. 6, no. 4, p. 61, 2022.
- [17] M. Olgun, "The effects and optimization of additives for expansive clays under freeze–thaw conditions," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 93, pp. 36–46, 2013.
- [18] J. Luis Campello, "BOLETÍN TÉCNICO 10007 Hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo."
- [19] B. Harris, "The weathering of limestone and the effect of airborne pollution," 2001.
- [20] J. B. Johnson, M. Montgomery, G. E. Thompson, G. C. Wood, P. W. Sage, and M. J. Cooke, "The influence of combustion-derived pollutants on limestone deterioration: 1. The dry deposition of pollutant gases," *Corros Sci*, vol. 38, no. 1, pp. 105–131, 1996.
- [21] American Concrete Institute, "ACI 318-19: Building Code Requirements for structural concrete and Commentary," 2019.
- [22] J. V. Navarro Gascón, "Diagnosis, alteraciones y evaluación de tratamientos en calizas y areniscas," 2012.
- [23] M. C. Vilanova, "Los procesos de formación de arcillas y su importancia en la utilización industrial," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 20, no. 2, pp. 89–92, 1981.
- [24] D. L. Anderson, "Petrology: The Study of Igneous, Sedimentary, and Metamorphic Rocks," *Am Sci*, vol. 84, no. 4, pp. 398–400, 1996.
- [25] F. Basolo and R. G. Pearson, "Mechanisms of inorganic reactions; a study of metal complexes in solution," 1967.
- [26] C. H. B. Sperling and R. U. Cooke, "Salt weathering in arid environments. I. Theoretical considerations," *Papers in Geography*, vol. 8, p. 45, 1980.
- [27] F. J. Alonso Rodríguez, J. Ordaz Gargallo, L. Valdeón Menéndez, and R. M. Esbert Alemany, "Revisión crítica del ensayo de cristalización de sales," *Materiales de construcción*, 1987.
- [28] A. Arnold and A. Kueng, "Crystallization and habits of salt efflorescences on walls 1. Methods of investigation and habits," in *Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*. 5, 1985, pp. 255–267.
- [29] K. Zehnder and A. Arnold, "Crystal growth in salt efflorescence," *J Cryst Growth*, vol. 97, no. 2, pp. 513–521, 1989.
- [30] G. G. Amoroso and V. Fassina, "Stone decay and conservation: Material Science Monograph 11." New York, Elsevier, 1983.
- [31] C. M. Grossi Sampedro, "Cristalización de sales en rocas monumentales porosas y su auscultación mediante emisión acústica," 1992.
- [32] C. M. Grossi and R. M. Esbert, "Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica," *Materiales de construcción*, vol. 44, no. 235, pp. 15–30, 1994.

- [33] A. Arnold, "Salt weathering on monuments," *The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, pp. 31–58, 1990.
- [34] S. Z. Lewin, "The mechanism of masonry decay through crystallization," in *Conservation of historic stone buildings and monuments. Proceedings of the conference held in washington, dc, february 2-4, 1981*, 1982, pp. 120–144.
- [35] C. Alegre Sacristán, "Evaluación del comportamiento de un mortero acumulador de energía mediante la aditivación con parafina.," *TFG Centro Universitario de la Defensa*, 2022.
- [36] A. Andreas, *Nature and Reactions of Saline Minerals in Walls*. Centro Conservazione Sculture all'Aperto, 1981.
- [37] Auger F., "world limestone decay under marine spray conditions ," 1989.
- [38] J. R. H. Keys and K. Williams, "Origin of crystalline, cold desert salts in the McMurdo region, Antarctica," *Geochim Cosmochim Acta*, vol. 45, no. 12, pp. 2299–2309, 1981.
- [39] J. M. Teutonico, *A laboratory manual for architectural conservators*, vol. 168. ICCROM Rome, 1988.
- [40] H. J. Hueck, "The biodeterioration of materials—an appraisal," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 48, no. 1–4, pp. 5–11, 2001.
- [41] H. J. Hueck, "The biodeterioration of materials as part of hylobiology," *Material und Organismen*, vol. 1, no. 1, pp. 5–34, 1965.
- [42] T. Rivas, "Mecanismos de alteración de las rocas graníticas utilizadas en la construcción de edificios antiguos en galicia. Tesis doctoral," Universidad de Santiago, 1996.
- [43] "Termohigrómetro: características, funciones, partes, usos." <https://www.lifeder.com/termohigrometro/> (accessed Mar. 20, 2023).
- [44] S. Flores Larsen and M. Hongn, "Impreso en la Argentina," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, 2012.
- [45] B. Jamali, R. Löwe, P. M. Bach, C. Urich, K. Arnbjerg-Nielsen, and A. Deletic, "A rapid urban flood inundation and damage assessment model," *J Hydrol (Amst)*, vol. 564, pp. 1085–1098, 2018.
- [46] L. Cheng, M. A. Shahin, and D. Mujah, "Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 143, no. 1, p. 04016083, 2017.
- [47] "Capas drenantes | Uniotransmovil S.L." <https://uniotransmovil.com/capas-drenantes/> (accessed Mar. 23, 2023).
- [48] S. J. I'Anson and W. D. Hoff, "Chemical injection remedial treatments for rising damp—I. The interaction of damp-proofing fluids with porous building materials," *Build Environ*, vol. 23, no. 3, pp. 171–178, 1988.
- [49] "MÉTODO KNAPEN: INSTALACIÓN DE LOS HIGROCONVECTORES." <http://www.knapen.es/p/metodo-knapen-instalacion-de-los.html> (accessed Feb. 02, 2023).
- [50] J. Dreyer, *Thermal treatment of moisture damaged construction*, vol. 83. WIT press, 2005.
- [51] S. Datta, A. T. Conlisk, H. F. Li, and M. Yoda, "Effect of divalent ions on electroosmotic flow in microchannels," *Mech Res Commun*, vol. 36, no. 1, pp. 65–74, 2009.

- [52] L. Bertolini, L. Coppola, M. Gastaldi, and E. Redaelli, “Electroosmotic transport in porous construction materials and dehumidification of masonry,” *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 1, pp. 254–263, 2009.
- [53] V. Yepes, “Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención,” *Colección Manual de referencia*, vol. 2ª edición, p. 480, 2020, Accessed: Mar. 23, 2023. [Online]. Available: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/149852/TOC_0328_09_02.pdf?seque
- [54] J. K. Mitchell, “Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice,” *Geotechnique*, vol. 41, no. 3, pp. 299–340, 1991.
- [55] D. T. Luong and S. Rudolf, “Zeta Potential Measurement Using Electroosmosis in Porous Media,” *VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology*, vol. 31, no. 4, 2015.
- [56] M. Builes, M. L. Hincapie, and J. Arboleda, “Mejoramiento de suelos residuales mediante el uso de Electro-osmosis,” in *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, IOS Press, 2019, pp. 2173–2180.
- [57] J. Feijoo, O. Matyščík, L. M. Ottosen, T. Rivas, and X. R. Nóvoa, “Electrokinetic desalination of protruded areas of stone avoiding the direct contact with electrodes,” *Mater Struct*, vol. 50, pp. 1–15, 2017.
- [58] J. Feijoo *et al.*, “Granite desalination using electromigration. Influence of type of granite and saline contaminant,” *J Cult Herit*, vol. 14, no. 5, pp. 365–376, 2013.
- [59] F. Liu, H. Fu, J. Wang, W. Mi, Y. Cai, and X. Geng, “Influence of soluble salt on electro-osmotic consolidation of soft clay,” *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 54, pp. 49–55, 2017.
- [60] I. L. Casagrande, “Electro-osmosis in soils,” *Geotechnique*, vol. 1, no. 3, pp. 159–177, 1949.
- [61] M. Mirzadeh, T. Zhou, M. A. Amooie, D. Fraggdakis, T. R. Ferguson, and M. Z. Bazant, “Vortices of electro-osmotic flow in heterogeneous porous media,” *Phys Rev Fluids*, vol. 5, no. 10, p. 103701, 2020.
- [62] S. Laursen, “Laboratory investigation of electroosmosis in bentonites and natural clays,” *Canadian geotechnical journal*, vol. 34, no. 5, pp. 664–671, 1997.
- [63] H. Zhou, Y. Fang, M. Chen, R. Gu, and W. Li, “Experimental and analytical study on electro-osmosis in low-permeability soil considering the pore size effect,” *Geotechnique*, vol. 71, no. 2, pp. 141–152, 2021.
- [64] B. G. Look, *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. Taylor & Francis, 2007.
- [65] K. R. Reddy and C. Cameselle, *Electrochemical remediation technologies for polluted soils, sediments and groundwater*. John Wiley & Sons, 2009.
- [66] G. Spagnoli *et al.*, “Application of electro-osmosis to reduce the adhesion of clay during mechanical tunnel driving,” *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. 17, no. 4, pp. 417–426, 2011.
- [67] UNE-EN 1936:2007, “‘‘Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.’’ 2007.
- [68] UNE-EN 1925:1999, “‘‘Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad’.’ 1999.
- [69] M. J. Mosquera, T. Rivas, B. Prieto, and B. Silva, “Capillary rise in granitic rocks: interpretation of kinetics on the basis of pore structure,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 222, no. 1, pp. 41–45, 2000.

- [70] J. Feijoo, R. Fort, L. S. Gomez-Villalba, M. E. Rabanal, and L. M. Ottosen, “Electroprecipitation of magnesium and calcium compounds for weathering protection of ornamental rocks,” *Cryst Growth Des*, vol. 20, no. 4, pp. 2337–2355, 2020.
- [71] J. Feijoo, L. M. Ottosen, and J. S. Pozo-Antonio, “Influence of the properties of granite and sandstone in the desalination process by electrokinetic technique,” *Electrochim Acta*, vol. 181, pp. 280–287, 2015.
- [72] S. Ordóñez, R. Fort, and M. A. García del Cura, “Pore size distribution and the durability of a porous limestone,” *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 30, no. 3, pp. 221–230, 1997.
- [73] D. Benavente, *Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales*. 2003.
- [74] J. Feijoo, L. M. Ottosen, X. R. Nóvoa, T. Rivas, and I. de Rosario, “An improved electrokinetic method to consolidate porous materials,” *Mater Struct*, vol. 50, pp. 1–16, 2017.
- [75] J. Feijoo, M. A. Alvarez-Feijoo, R. Fort, E. Arce, and D. Ergenç, “Effects of paraffin additives, as phase change materials, on the behavior of a traditional lime mortar,” *Constr Build Mater*, vol. 361, p. 129734, 2022.
- [76] Y. Elakneswaran, T. Nawa, and K. Kurumisawa, “Zeta potential study of paste blends with slag,” *Cem Concr Compos*, vol. 31, no. 1, pp. 72–76, 2009.
- [77] Malvern, “Manual de empleo del Zetasizer Nanoseries.,” 2013.

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

• Implicaciones Ambientales.

La electro-ósmosis se posiciona como una técnica versátil y adaptable a diferentes ámbitos como suelos, túneles o materiales de construcción, tal y como ha sido demostrado en el desarrollo de este trabajo. En cuanto a las implicaciones ambientales que se desprenden del trabajo destacan las siguientes:

- La electro-ósmosis es una técnica no invasiva que permite la eliminación de humedades sin necesidad de obras de demolición y reconstrucción, lo que reduce la generación de residuos y minimiza el impacto ambiental.
- Al no requerir la utilización de productos químicos tóxicos y contaminantes, la electro-ósmosis es una técnica respetuosa con el medio ambiente y reduce el riesgo de contaminación del suelo y las aguas subterráneas.
- Es una técnica que se puede aplicar de manera localizada, lo que reduce la cantidad de energía necesaria para llevarla a cabo y disminuye su huella de carbono.

• Implicaciones Sociales.

A lo largo de la realización del estudio y la profundización en el método electro-osmótico se han vislumbrado distintas implicaciones sociales importantes entre las que destacan:

- La electro-ósmosis puede mejorar la calidad de vida de las personas que habitan en edificios o viviendas afectados por humedades. Su eliminación puede evitar serios problemas a personas que sufran enfermedades respiratorias ya que estas se pueden ver agravadas por la presencia de mohos y hongos.
- Tal y como se expone en las implicaciones ambientales, gracias al empleo de este método no se requiere de grandes obras ni demoliciones. Esto hace que se reduzcan las molestias y el impacto sobre la vida cotidiana de las distintas personas que habitan en la comunidad afectada por las humedades.
- La electro-ósmosis es una técnica silenciosa y poco intrusiva, lo que reduce la afectación a la convivencia de las personas que habitan en edificios o viviendas donde se realiza la técnica.

• Implicaciones Económicas.

Las principales implicaciones económicas relacionadas con el empleo efectivo de la electro-ósmosis como técnica de eliminación de humedades son:

- La electro-ósmosis puede evitar el deterioro y la degradación de los materiales de construcción afectados por humedades, lo que puede prolongar la vida útil de las estructuras y evitar gastos innecesarios en reparaciones y mantenimiento.
- La electro-ósmosis puede reducir los costos asociados al consumo de energía en edificios y viviendas, al evitar la aparición de moho y hongos que pueden afectar al rendimiento energético de los sistemas de climatización y ventilación.
- La electro-ósmosis puede ayudar a evitar gastos innecesarios en reparaciones y obras de construcción, al detectar y eliminar humedades de forma temprana y evitar que se conviertan en problemas mayores y más costosos de resolver.

Para demostrar que esta técnica resulta más económica que muchos otros procesos de eliminación de humedades, se han realizado una serie de cálculos a partir de los resultados obtenidos en este estudio.

Se ha comparado el precio actual del Kw/h con la potencia necesaria para hacer circular el agua a través de los ladrillos para diferentes densidades de corriente. Para la máxima densidad de corriente aplicada en los ensayos ($21,4 \text{ A/m}^2$), se ha calculado la potencia necesaria para tener el montaje en funcionamiento durante una hora obteniendo un resultado de $1012,22 \text{ W/m}^2 \text{ h}$. A día de hoy, el precio del Kw/h es de 0,245 €, por tanto, el precio por m^2 de muro es de 0,25 €.

A la vista del resultado del precio obtenido se puede concluir que la electro-ósmosis es una técnica barata además de tener la ventaja de necesitar reducidos tiempos de funcionamiento para obtener resultados significativos lo cual reduce aún más el coste de empleo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El presente anexo pretende reflexionar sobre aquellos aspectos que, gracias al desarrollo de este estudio, son susceptibles de aplicación real y que pueden llevar a la mejora de la calidad de vida de las personas y a la prevención temprana de diferentes procesos que pueden ser perjudiciales para los seres humanos.

La Escuela Naval Militar, además de ser el único centro de formación de oficiales de la Armada Española, es el hogar de cientos de alumnos y miembros de dotación. Es innegable que, pese al continuo intento de mejora de las instalaciones por parte de la dirección, existen numerosos edificios, clases y zonas de convivencia expuestas a los efectos que provocan las humedades.

Esta proliferación de humedades supone un impacto negativo en la salubridad de estos espacios de convivencia. En muchas ocasiones, profesores y alumnos pasan un gran número de horas en clases en las que los efectos de la humedad y la aparición de hongos son visibles pudiendo provocar infecciones debido a la proliferación de bacterias y virus en el aire, problemas de piel o dolores de cabeza.

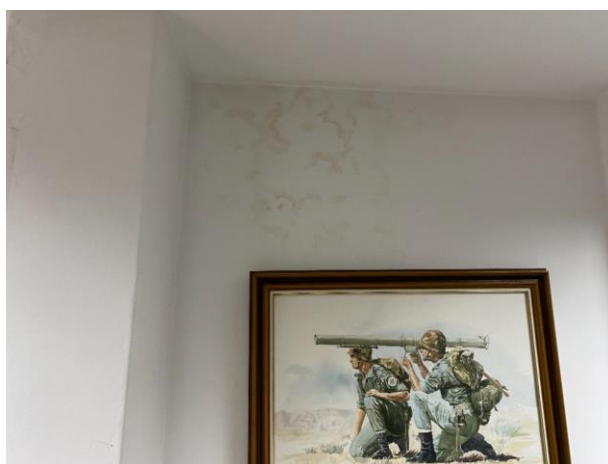


Figura AII-1. Pared del pasillo del Departamento 4 de la ENM (Fuente: propia).

También es importante destacar que la Escuela Naval Militar de Marín lleva en servicio 80 años y posee en su interior un importante patrimonio arquitectónico formado por edificios longevos y diferentes monumentos. Para conseguir preservar este patrimonio y el buen estado de las instalaciones es necesario tomar conciencia de que estos procesos provocados por la entrada de agua pueden llegar a causar grandes problemas a corto plazo.



Figura AII-2. Monumento a D. Álvaro de Bazán en patio de aulas (Fuente: propia).

La realización de este TFG permite un acercamiento a esta problemática y ayuda a tomar conciencia de la necesidad de aportar soluciones a este problema. Mediante la aplicación del principio de electro-ósmosis sería posible solventar parte de estos problemas contribuyendo a la prevención de enfermedades y a la conservación del patrimonio de la Escuela Naval Militar para que los futuros alumnos que ingresen puedan disfrutar de unas instalaciones adecuadas que les permita desarrollarse de la forma más óptima posible.