



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Influencia de la presencia de sales en la respuesta  
térmica de materiales de construcción*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Jose María Cordero de la Puente

**DIRECTORES:** Jorge Feijoo Conde  
Iván Garrido González

**CURSO ACADÉMICO:** 2023-2024

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Influencia de la presencia de sales en la respuesta  
térmica de materiales de construcción*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

UniversidadeVigo



# RESUMEN

El estudio del deterioro de los materiales de construcción y las prácticas de mantenimiento es una prioridad en la investigación en ingeniería civil para asegurar la fiabilidad de los edificios. Las sales solubles son uno de los principales agentes de alteración, particularmente problemática en áreas costeras donde su presencia es común. En la Armada Española, esto compromete la integridad estructural de sus instalaciones, aumentando los costos de mantenimiento y representando un riesgo para la preservación del patrimonio naval. Por tanto, es de interés estudiar la posibilidad de detectar su presencia temprana a través de técnicas no destructivas como la termografía infrarroja. En este estudio se evalúa la presencia de tres tipos de sales comunes en diferentes materiales de construcción (granitos y mortero de cal), empleando la termografía infrarroja y empleando un modelo de *Deep Learning* para tratar de identificarlas. Los resultados indican que la presencia de sales afecta al comportamiento térmico del material, ya sea amortiguando su enfriamiento como favoreciendo su calentamiento hasta alcanzar temperatura ambiente. Sin embargo, el modelo de *Deep Learning* no es capaz de acertar en la totalidad de los casos analizados por falta de datos de entrada, aunque es un buen inicio con un futuro prometedor.

## PALABRAS CLAVE

Sales solubles, termografía infrarroja, granito, mortero de cal, *Deep learning*



# AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos años de formación profesional, militar y personal en la Escuela Naval Militar, han sido numerosas personas las que me han aconsejado y acompañado, con especial agradecimiento a las siguientes:

A mis padres, por ser un ejemplo en todos los aspectos de la vida, tanto el militar como el familiar. Siempre han estado a mi lado apoyándome y sobre todo guiándome por el camino correcto, aguantando y haciendo propias tanto mis derrotas como victorias.

A mis hermanos, mis cuñados y a Rocío, por todo el apoyo, recomendaciones y lecciones que me han dado todos estos años, así como, por ser un ejemplo para mí como familia y como oficiales de la Armada.

A mis tutores, por su dedicación en este trabajo, el trato recibido por su parte y por solventar todas aquellas dudas que me han ido surgiendo.

Por último, agradecer a mis amigos y compañeros de la promoción 424-154, por las experiencias compartidas hasta el momento y por ser un ejemplo de compañerismo en el día a día.



## Contenido

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Índice de figuras .....                                                               | 3  |
| Índice de tablas .....                                                                | 7  |
| 1 Introducción y objetivos .....                                                      | 8  |
| 1.1 Introducción y motivación .....                                                   | 8  |
| 1.2 Objetivos .....                                                                   | 9  |
| 1.3 Estructura de la memoria .....                                                    | 9  |
| 2 Estado del arte .....                                                               | 11 |
| 2.1 Las sales solubles como agente de alteración .....                                | 11 |
| 2.1.1 Generalidades .....                                                             | 11 |
| 2.1.2 Principales focos de origen de las sales solubles .....                         | 12 |
| 2.1.2.1 Lixiviación de los materiales de construcción empleados en un monumento ..... | 13 |
| 2.1.2.2 Absorción de agua con sales procedentes del suelo .....                       | 13 |
| 2.1.2.3 Deposición atmosférica de sales solubles .....                                | 13 |
| 2.1.2.4 Metabolismos de organismos y microorganismos .....                            | 15 |
| 2.1.2.5 Origen antrópico .....                                                        | 15 |
| 2.1.3 Comportamiento de la solubilidad frente a cambios externos .....                | 17 |
| 2.1.4 Sales como material con diferente respuesta térmica .....                       | 18 |
| 2.2 Técnicas de detección de sales solubles en materiales de construcción .....       | 19 |
| 2.2.1 Técnicas destructivas .....                                                     | 20 |
| 2.2.2 Técnicas no destructivas .....                                                  | 20 |
| 2.3 Termografía infrarroja .....                                                      | 21 |
| 2.3.1 Teoría de la termografía infrarroja .....                                       | 21 |
| 2.3.2 Enfoques de la termografía infrarroja .....                                     | 23 |
| 2.3.3 Aplicaciones de la termografía infrarroja en materiales de construcción .....   | 24 |
| 2.3.3.1 Termografía aplicada a la identificación de sales .....                       | 25 |
| 2.4 Inteligencia artificial .....                                                     | 26 |
| 2.4.1 Modelo de Deep Learning empleado .....                                          | 27 |
| 3 Desarrollo del TFG .....                                                            | 29 |
| 3.1 Materiales empleados .....                                                        | 29 |
| 3.1.1 Granitos .....                                                                  | 29 |
| 3.1.2 Mortero de cal .....                                                            | 30 |
| 3.1.3 Sales solubles seleccionadas .....                                              | 30 |
| 3.2 Caracterización físico-mecánica de los materiales empleados .....                 | 32 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1 Porosidad accesible al agua .....                                                 | 32 |
| 3.2.2 Porosidad accesible al mercurio y distribución porosimétrica .....                | 33 |
| 3.2.3 Capilaridad.....                                                                  | 33 |
| 3.2.4 Velocidad de transmisión de los ultrasonidos .....                                | 34 |
| 3.2.5 Propiedades mecánicas: dureza superficial y resistencia a compresión simple ..... | 35 |
| 3.3 Análisis termográfico .....                                                         | 36 |
| 3.3.1 Comportamiento de térmico de las sales empleadas frente a enfriamiento.....       | 36 |
| 3.3.2 Comportamiento térmico de las muestras de granito .....                           | 37 |
| 3.4 Análisis de calorimetría diferencial de barrido .....                               | 38 |
| 3.5 Modelado de la repuesta térmica mediante <i>Deep Learning</i> .....                 | 40 |
| 4 Resultados .....                                                                      | 46 |
| 4.1 Caracterización de las muestras .....                                               | 46 |
| 4.1.1 Propiedades iniciales antes de contaminar con sales .....                         | 46 |
| 4.1.2 Propiedades después de contaminar con sales.....                                  | 48 |
| 4.2 Análisis termográfico .....                                                         | 49 |
| 4.3 Análisis calorimetría diferencial de barrido .....                                  | 62 |
| 4.4 Análisis del modelo <i>Deep Learning</i> .....                                      | 65 |
| 4.4.1 Ensayo de enfriamiento .....                                                      | 66 |
| 4.4.2 Ensayo de calentamiento .....                                                     | 68 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                                                   | 71 |
| 5.1 Conclusiones .....                                                                  | 71 |
| 5.2 Líneas futuras .....                                                                | 72 |
| 6 Bibliografía.....                                                                     | 73 |
| Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales .....                  | 78 |
| Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....                                           | 79 |
| Anexo III: Especificaciones FLIR E85 .....                                              | 80 |
| Anexo IV: Procedimiento para el uso de FLIR E85.....                                    | 81 |
| Anexo V: Secuencia de funcionamiento equipo Labsys Evo.....                             | 83 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1. Eflorescencias (en azul) y desplazación (cuadro rojo) presentes en el granito de la fachada del edificio del CUD, Escuela Naval Militar (elaboración propia) .....                                                                                                                      | 12 |
| Figura 2-2. Método de absorción por capilaridad [6] .....                                                                                                                                                                                                                                           | 13 |
| Figura 2-3. Fotografía del colapso sufrido por un edificio en Florida. Entre las causas del derrumbe los expertos indican que se encuentra la exposición prolongada a la sal marina y al aporte continuo de sales que favorecieron los procesos de corrosión de las armaduras. Imagen AFP [8] ..... | 14 |
| Figura 2-4. Gárgola dañada por la lluvia ácida [10] .....                                                                                                                                                                                                                                           | 14 |
| Figura 2-5. Deyecciones de aves en la estatua de Álvaro de Bazán localizada en la Plaza de Álvaro de Bazán en la Escuela Naval Militar (elaboración propia) .....                                                                                                                                   | 15 |
| Figura 2-6. Solubilidad frente a temperatura de diferentes compuestos químicos [11] .....                                                                                                                                                                                                           | 17 |
| Figura 2-7. Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa de la mirabilita y la thenardita [13]                                                                                                                                                                                              | 18 |
| Figura 2-8. Energía almacenada durante el cambio de fase de sólido a líquido de una sal hidratada (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                        | 19 |
| Figura 2-9. Espectro electromagnético magnético completo. La banda roja hace referencia al rango de medición de infrarrojos en $\mu\text{m}$ [28] .....                                                                                                                                             | 21 |
| Figura 2-10. Termografía cuantitativa de fachadas. Izquierda sin reformar, derecha reformada [30]                                                                                                                                                                                                   | 24 |
| Figura 2-11. Suelo radiante visto a través de una cámara infrarroja [31] .....                                                                                                                                                                                                                      | 25 |
| Figura 2-12. Aplicaciones del <i>Deep Learning</i> (elaboración propia basada en [37]) .....                                                                                                                                                                                                        | 27 |
| Figura 2-13. Célula tipo de un modelo GRU. Para más información de las nomenclaturas ver fuente [38]                                                                                                                                                                                                | 28 |
| Figura 3-1. En la imagen de la izquierda se puede observar la localización de extracción de las diferentes muestras de granito utilizadas en el proyecto (elaboración propia) .....                                                                                                                 | 29 |
| Figura 3-2. Distribución del tamaño de grano de la arena de sílice empleada en este estudio [40].                                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Figura 3-3. Muestras de granito siendo sometidas al ensayo de capilaridad (elaboración propia)                                                                                                                                                                                                      | 34 |
| Figura 3-4. Instrumento ultrasónico de Pundit Lab+ mientras se realiza un ensayo con una muestra de granito Mondim. La imagen de la derecha muestra los 3 ejes (x, y, z) empleados (elaboración propia)                                                                                             | 34 |
| Figura 3-5. Medidor de dureza PCE-2500 (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                                                   | 35 |
| Figura 3-6. Cámara termográfica FLIR E85 [57] .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 36 |
| Figura 3-7. Disposición de las muestras de mortero, cámara termográfica y aplicación FLIRTools+ en el laboratorio de mecánica de la escuela Naval Militar, durante el registro de temperatura realizado en uno de los ensayos (elaboración propia) .....                                            | 38 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-8. Muestras de granito Roriz durante el inicio de un ensayo de enfriamiento observado desde la aplicación FLIRTools+. Los rectángulos con contorno negro indica las regiones seleccionadas manualmente para el cálculo de la temperatura media en cada instante temporal, cálculo realizado por la propia aplicación (elaboración propia) ..... | 38 |
| Figura 3-9. Ciclo de calentamiento y enfriamiento establecido para los ensayos (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                                                                | 39 |
| Figura 3-10. Representación gráfica de uno de los tres ciclos de calentamiento-enfriamiento a los que se someten las muestras (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                 | 39 |
| Figura 3-11. El crisol de la izquierda de la imagen corresponde al de referencia y el de la derecha al de alúmina 203 (elaboración propia).....                                                                                                                                                                                                          | 40 |
| Figura 3-12. Script para la carga de las librerías necesarias para utilizar el modelo DL (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                                                      | 40 |
| Figura 3-13. Script para la carga de las secuencias de datos de entrada al modelo DL. En este caso las secuencias de enfriamiento (“AltaT”) (elaboración propia).....                                                                                                                                                                                    | 41 |
| Figura 3-14. Script para la separar las secuencias de entrada al modelo DL en entrenamiento, validación y testeo (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                              | 41 |
| Figura 3-15. Script para separar conjunto de entrenamiento y validación según <i>cross validation</i> , recorte y obtención diferencia de temperaturas frente intervalo de tiempo asignado por el usuario en cada secuencia, y escalado de los ratios entre 0 y 1 (elaboración propia) .....                                                             | 42 |
| Figura 3-16. Script para recorte y obtención diferencia de temperaturas frente intervalo de tiempo asignado por el usuario en cada secuencia, y escalado de los ratios entre 0 y 1, para el conjunto de testeo (elaboración propia) .....                                                                                                                | 43 |
| Figura 3-17. Script que definen valores numéricos a diferentes variables usadas en el código, valores definidos por el usuario (elaboración propia).....                                                                                                                                                                                                 | 43 |
| Figura 3-18. Script que define el modelo DL (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 44 |
| Figura 3-19. Script para ejecutar el aprendizaje del modelo DL (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 45 |
| Figura 3-20. Script para aplicar el modelo DL aprendido al conjunto de datos de testeo (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                                                        | 45 |
| Figura 4-1. a) Cinética de absorción capilar de los materiales evaluados. b) A la derecha se muestra en detalle la cinética de absorción de los tres granitos (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                 | 47 |
| Figura 4-2. a) Distribución del tamaño de poros accesible al mercurio para el mortero de cal, y, b), los granitos analizados (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                                  | 47 |
| Figura 4-3. La imagen superior muestra una toma termográfica de las sales los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....                           | 49 |
| Figura 4-4. a) Curva de enfriamiento de las sales durante todo el proceso. b) Se muestra en detalle el enfriamiento durante los primeros segundos y, c), también durante los últimos (elaboración propia) .....                                                                                                                                          | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-5. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Mondim los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....             | 51 |
| Figura 4-6. Ciclo de enfriamiento del granito Mondim según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                     | 51 |
| Figura 4-7. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Azul Alpendorada los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....   | 52 |
| Figura 4-8. Ciclo de enfriamiento del granito Azul Alpendorada según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                           | 52 |
| Figura 4-9. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Roriz los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....              | 53 |
| Figura 4-10. Ciclo de enfriamiento del granito Roriz según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                     | 53 |
| Figura 4-11. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 1 los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....          | 54 |
| Figura 4-12. Ciclo de enfriamiento del mortero de cal 1 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                  | 54 |
| Figura 4-13. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 2 los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....          | 55 |
| Figura 4-14. Ciclo de enfriamiento del mortero de cal 2 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                  | 55 |
| Figura 4-15. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Mondim los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....           | 57 |
| Figura 4-16. Ciclo de calentamiento del granito Mondim según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                                   | 57 |
| Figura 4-17. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Azul Alpendorada los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) ..... | 58 |
| Figura 4-18. Ciclo de calentamiento del granito Azul Alpendorada según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....                                                                                                                                                                         | 58 |

- Figura 4-19. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Roriz los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....59
- Figura 4-20. Ciclo de calentamiento del granito Roriz según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia).....59
- Figura 4-21. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 1 los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....60
- Figura 4-22. Ciclo de calentamiento del mortero de cal 1 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....60
- Figura 4-23. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 2 los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia) .....61
- Figura 4-24. Ciclo de calentamiento del mortero de cal 2 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia) .....61
- Figura 4-25. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de sales (elaboración propia) .....62
- Figura 4-26. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de granito Mondim (elaboración propia) .....63
- Figura 4-27. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de granito Azul Alpendorada (elaboración propia) .....64
- Figura 4-28. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de granito Roriz (elaboración propia) .....64
- Figura 4-29. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de mortero de cal 1 (elaboración propia) .....65
- Figura 4-30. La imagen de la izquierda muestra la gráfica de pérdidas de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia) 67
- Figura 4-31. La imagen de la izquierda muestra la gráfica de precisión de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia) 67
- Figura 4-32. La imagen de la izquierda muestra la gráfica de pérdidas de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia) 69
- Figura 4-33. La imagen de la izquierda muestra la gráfica de precisión de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia) 69
- Figura A3-1. Especificaciones cámaras termográficas FLIR Exx-Series. Las especificaciones sobre la cámara utilizada en este proyecto (FLIR E85) se encuentran en la columna central [61] .....80

## ÍNDICE DE TABLAS

|                              |                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tabla 2-1.<br>[3]            | Principal foco de origen de los cationes y aniones presentes en los materiales porosos<br>16                                                                                                                                          |
| Tabla 2-2.<br>°C) [12]       | Humedades de equilibrio (en %) de soluciones saturadas a temperatura ambiente (25<br>18                                                                                                                                               |
| Tabla 3-1.                   | Propiedades de las sales solubles escogidas para el ensayo .....31                                                                                                                                                                    |
| Tabla 3-2.<br>8 y 9          | Números de cada piedra según la sal, correspondiendo aquellas con el número 1 y 5<br>al NaCl, número 2 y 6 para el Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , número 3 y 7 para el NaNO <sub>3</sub> y aquellas sin sal con el número 4,<br>31 |
| Tabla 3-3.                   | Especificaciones cámara FLIR E85 [58] .....37                                                                                                                                                                                         |
| Tabla 4-1.                   | Principales propiedades físico-mecánicas de los materiales analizados.....46                                                                                                                                                          |
| Tabla 4-2.                   | Diferencia de pesos antes y después de ser contaminados por su respectiva sal.....48                                                                                                                                                  |
| Tabla 4-3.                   | Diferencia de velocidad de transmisión de ultrasonidos antes y después de ser<br>contaminados por sales .....48                                                                                                                       |
| Tabla 4-4.                   | Resumen comportamiento de las temperaturas de las muestras según el tipo de sal con<br>el que han sido contaminadas para el ensayo de enfriamiento .....56                                                                            |
| Tabla 4-5.                   | Resumen del comportamiento de las temperaturas de las muestras según el tipo de sal<br>con el que han sido contaminado para el ensayo de calentamiento .....62                                                                        |
| Tabla 4-6.<br>la muestra     | Número de referencia utilizado por el modelo <i>Deep Learning</i> según la sal presente en<br>66                                                                                                                                      |
| Tabla 4-7.<br>enfriamiento   | Resultados para intervalos temporales cada 500 segundos en el ensayo de<br>66                                                                                                                                                         |
| Tabla 4-8.                   | Resultados para intervalos temporales cada 50 segundos en el ensayo de enfriamiento<br>67                                                                                                                                             |
| Tabla 4-9.<br>enfriamiento   | Resultados para intervalos temporales cada 800 segundos en el ensayo de<br>68                                                                                                                                                         |
| Tabla 4-10.<br>calentamiento | Resultados para intervalos temporales cada 250 segundos en el ensayo de<br>68                                                                                                                                                         |
| Tabla 4-11.<br>calentamiento | Resultados para intervalos temporales cada 50 segundos en el ensayo de<br>69                                                                                                                                                          |
| Tabla 4-12.<br>calentamiento | Resultados para intervalos temporales cada 500 segundos en el ensayo de<br>70                                                                                                                                                         |

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción y motivación

La alteración de los materiales de construcción de edificios es un tema relevante y de continua investigación, así como, las prácticas de mantenimiento adecuadas para mantener la integridad de las estructuras. Son numerosos los estudios que se realizan para garantizar la fiabilidad de un edificio, y es por ello, que un análisis previo de las características de los materiales de construcción es una de las prioridades, conociendo de esta forma algunas como la durabilidad y la resistencia mecánica, entre otras.

La alteración se conoce como la modificación o cambio en el estado de un material, independientemente de que este mejore o empeore sus propiedades. En el proceso de deterioro de un material de construcción hay que analizar la influencia conjunta que tienen dos tipos de factores como son los factores intrínsecos, dependen de la naturaleza, composición y propiedades de los materiales, y los factores extrínsecos, que se refieren al medio ambiente y a agentes externos que rodean al material. La conjunción de ambos factores determina que mecanismo de alteración se va a producir (químico, físico o biológico) [1].

Dentro de los factores extrínsecos destacan como principales agentes de alteración, el agua y las sales solubles. El agua, además de actuar como agente de alteración químico (mediante reacciones de hidrólisis, hidratación u oxidación), físico (mediante procesos de gelificación) o promover la acción biológica, sirve como vehículo de transporte de las sales solubles y de otros contaminantes hacia el interior de los materiales de construcción. Las sales solubles, constituyen uno de los mayores problemas a los que se enfrentan los materiales de construcción una vez puestos en servicio, ya que su presencia en el interior de los poros del material genera daños físico-mecánicos que llevan aparejada la pérdida de material y por consiguiente la reducción en la resistencia operativa del material [1].

Este es un problema muy presente en la Armada Española, ya que, la mayor parte de sus instalaciones y bases se encuentran en zonas costeras, donde la presencia de sales es abundante. Este hecho, compromete la integridad estructural de instalaciones como son los propios edificios de la base en cuestión, muelles y diques, aumentando los costos de mantenimiento a largo plazo y representando un riesgo para la seguridad de las operaciones navales. La preservación del patrimonio naval también se ve afectada, ya que la mayor parte de las instalaciones de la Armada fueron construidas hace más de cuarenta años y se puede observar a simple vista la corrosión presente en estas estructuras.

De esta forma, nace la curiosidad de estudiar la influencia de la presencia de sales en los materiales de construcción, centrándonos en estudiar la huella térmica que dejan las principales sales que se encuentran en el medio natural. Este estudio es muy novedoso ya que se utilizará un modelo de *Deep Learning*, que, junto a una cámara termográfica, tratará de identificar la naturaleza de las sales solubles presentes en los materiales pétreos contaminados.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es tratar de definir como varía el comportamiento térmico de un material de naturaleza pétreo (en este caso granito y mortero de cal) cuando tiene presente en sus poros diferentes tipos de sales solubles, mediante el uso de una técnica no destructiva como es la termografía infrarroja. Su definición permitirá, a través del empleo de un modelo de aprendizaje automático y de la inspección manual, identificar la sal en cuestión sin necesidad de tomar muestras en profundidad mediante el uso de técnicas destructivas como la perforación mediante taladro.

Con el fin de alcanzar la meta principal de este proyecto, se establecieron diversos objetivos parciales:

- Análisis en profundidad del estado del arte actual de las sales solubles como agente de alteración. Se hará referencia a cómo influye la temperatura en las sales solubles y a estas sales como material de cambio de fase (PCM).
- Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de los diferentes materiales de construcción escogidos, tales como estructura porosa, transmisión de ultrasonidos, etc.
- Cuantificación del contenido de aniones salinos presentes en los materiales mediante cromatografía iónica (IC).
- Análisis termográficos por termografía infrarroja y de calorimetría de barrido diferencial (TGA) para estudiar la respuesta dada por el material ante fluctuaciones en la temperatura.
- Desarrollo de un modelo de aprendizaje automático (*Deep Learning*), capaz de analizar la respuesta termográfica de los materiales y detectar las características que adquieren o pierden estos materiales cuando presentan sales de distinta naturaleza en su interior.

## 1.3 Estructura de la memoria

Para obtener una visión general del Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado la memoria de la siguiente forma:

- *Introducción y objetivos*: al inicio de este trabajo se van a resumir los motivos del estudio de este, los objetivos que se pretenden cumplir durante su desarrollo y la estructura que tendrá la memoria.
- *Estado del Arte*: en este apartado se hará referencia a la relación que tienen la solubilidad y la temperatura, y como estos factores afectan en la respuesta termográfica de los materiales de construcción. Por ello, se estudiará la importancia de detectar sales y las técnicas para hacerlo, destacando la infrarroja.
- *Desarrollo del TFG*: en este capítulo se expondrán los pasos a seguir en la realización de los ensayos, así como, las sales y materiales utilizados en los mismos. Además, se explicarán los diferentes análisis a los que son sometidas las muestras y la metodología empleada.
- *Resultados*: en esta sección se analizarán y compararán los diferentes resultados obtenidos según cada método aplicado. A su vez, estos resultados se compararán con los ofrecidos por el *Deep Learning*.

– *Conclusiones y líneas futuras:* por último, se hará un resumen general del trabajo y se estudiará si se ha cumplido con los objetivos establecidos. Asimismo, se explorarán líneas futuras y la aplicación de esta investigación.

## 2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abordarán diferentes temas relacionados con la alteración de los materiales de construcción, centrándose especialmente en la acción ocasionada por las sales solubles. Se tratarán los daños que ocasionan y su relación con la temperatura. Asimismo, se explicarán las técnicas de detección que se emplean actualmente, profundizando en la termografía infrarroja como técnica no destructiva, de aplicación rápida y de bajo coste.

### 2.1 Las sales solubles como agente de alteración

#### 2.1.1 Generalidades

Las sales solubles son, junto con el agua, uno de los principales agentes de alteración de los materiales de construcción y uno de los más difíciles de tratar. En obra se pueden encontrar diferentes grupos de sales solubles como pueden ser carbonatos, fosfatos, cloruros, nitratos y sulfatos entre otros, siendo estos tres últimos los grupos más importantes tanto por su frecuencia como por su poder alterante.

Los efectos destructivos que las sales solubles ejercen sobre los materiales de construcción dependen de factores intrínsecos inherentes al material que se ve afectado, tales como sistema poroso del material pétreo en cuestión (forma, tamaño y conectividad de sus poros), resistencia mecánica y mineralogía, como de factores extrínsecos relacionados con naturaleza de la sal, las condiciones de humedad, temperatura, y demás condiciones que afectan a la solubilidad de la sal en cuestión [2].

La principal acción alterante causada por las sales solubles está relacionada con la pérdida de material [3]. Este tipo de daño se ve favorecido por la aparición de ciclos periódicos de cristalización-disolución de las propias sales que quedan en el interior de los poros provocando, en función de factores como la humedad y la temperatura, continuas presiones internas de tracción que acaban agrandando los poros y fisuras presentes. Este hecho da como resultado una reducción de la sección mecánicamente útil del material y en consecuencia una reducción de la resistencia mecánica del material, dando lugar a una mayor degradación de este y a una mayor pérdida de material, que en el peor de los casos puede poner en riesgo la estabilidad estructural del edificio o infraestructura afectada [1].

Entre las formas de alteración con pérdida de material asociada a las sales cabe señalar las siguientes:

- La alveolización se encuentra dentro de los tipos de pérdidas de material por formación de huecos, y se da lugar en rocas porosas donde se generan pequeñas cavidades esféricas (alveolos) con aspecto de panal de abeja.

– La arenización se produce por la pérdida de cohesión entre los granos minerales debido a la acción de las sales solubles y se caracteriza por la caída de los componentes de la piedra en forma de arena.

– Las desplazaciones superficiales, también conocidas como descamaciones, se caracterizan por una separación de las capas superficiales de forma paralela a su superficie. Dependiendo del tamaño de las placas, estas se clasifican de menor a mayor en escamas, plaquetas o placas [3].

Otro de los efectos negativos ocasionado por la presencia de sales en materiales de construcción está relacionado con un daño meramente estético asociado a la formación de capas blanquecinas en sus superficies, debido a la cristalización de sales en estas zonas. Estos depósitos superficiales se conocen como eflorescencias salinas o costras, en función de la dureza de la capa formada y de cómo influye en la transpirabilidad del material afectado [1]. Estas eflorescencias ocasionan una alteración en la humedad relativa del material, dificultando que tenga lugar el proceso alterante ocasionado por los cambios periódicos de estado (Figura 2-1).

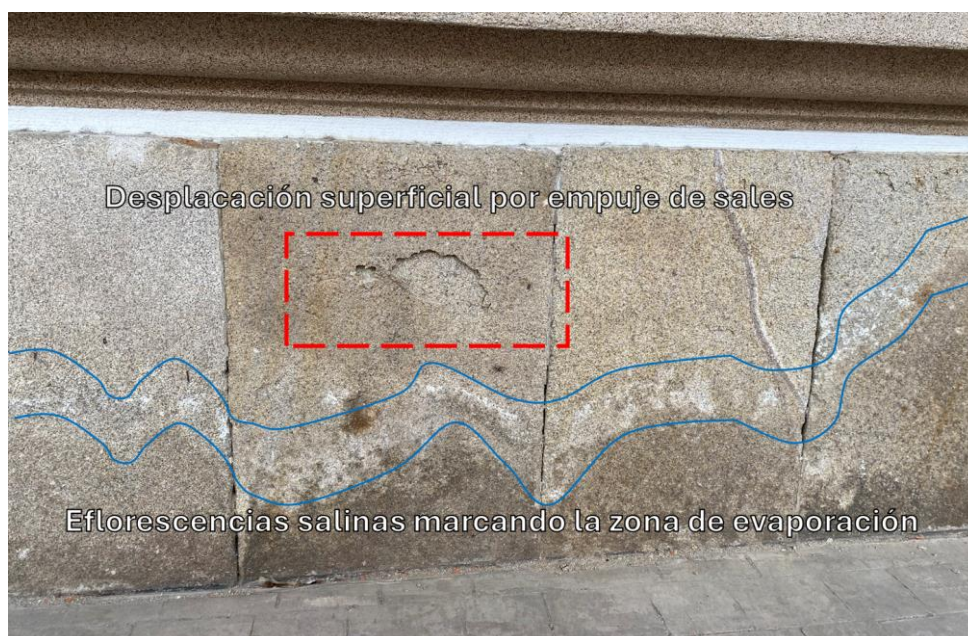


**Figura 2-1. Eflorescencias (en azul) y desplazación (cuadro rojo) presentes en el granito de la fachada del edificio del CUD, Escuela Naval Militar (elaboración propia)**

### *2.1.2 Principales focos de origen de las sales solubles*

Para limitar el daño ocasionado por las sales solubles es imprescindible determinar el foco de origen de estas, con el objeto de:

- Tratar de entender qué sales son las que están afectando en mayor medida al material afectado.
- Buscar acciones que limiten la entrada de nuevas sales.
- Establecer las estrategias de intervención, generalmente de extracción de estas, que mejor se adecuen a cada caso en concreto.

### 2.1.2.1 Lixiviación de los materiales de construcción empleados en un monumento

La lixiviación sucede cuando un material no protegido se pone en contacto con disoluciones acuosas y éstas al disolverse extraen los compuestos del material afectado. Este proceso se distingue en tres fases: el lavado, la difusión y la disolución-erosión [4].

Los materiales de construcción tienen en su composición determinados compuestos, que al ser liberados actúan como sales solubles. En este sentido, las principales sales que se atribuyen a este origen son las sales sulfatadas procedentes de la alteración de los morteros de cemento o de revestimientos a base de yeso, en los cuales tras un proceso de disolución se produce la entrada en la roca de los iones sulfato y calcio. Estos compuestos pueden ser liberados por diferentes razones, como pueden ser un cambio en la humedad relativa, o la exposición frente a condiciones ácidas de pH motivadas por la acción de otros compuestos químicos.

Entre otros, se deben mencionar el yeso, que es un sulfato de calcio, y el cemento Portland, el cual se relaciona con sales como la mirabilita, la epsomita, la ettringita y la thawmasita. El Calcio y el Magnesio suelen reaccionar con pH ácidos, como por ejemplo la dolomita, que, junto con sulfatos, forman carbonato de calcio y sulfato de magnesio. Otra fuente importante de iones son los silicatos, debido en su mayor parte a la hidrólisis [1].

### 2.1.2.2 Absorción de agua con sales procedentes del suelo

Esto se produce principalmente debido a la absorción capilar de agua por parte de los cimientos del material pétreo debido a la acumulación de agua que se puede producir en sus inmediaciones. Esta absorción por capilaridad tiene un gran alcance teórico, pudiendo alcanzar alturas de hasta 15 metros. Este efecto también recibe el nombre de humedad ascendente (Figura 2-2) [5].

El tipo de iones que contiene el agua que es absorbida depende en gran parte del lugar donde se encuentre el edificio. Si nos encontramos en suelos urbanos, el agua contendrá sulfatos, nitratos y cloruros, mientras que, aquellos edificios que se encuentren en suelo agrícola o rural tendrán abundancia de sulfatos y nitratos, debido a su presencia en fertilizantes [1].

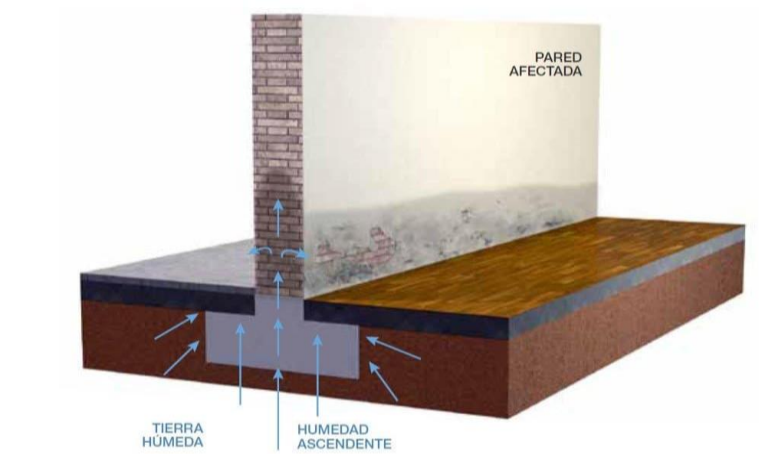


Figura 2-2. Método de absorción por capilaridad [6]

### 2.1.2.3 Deposición atmosférica de sales solubles

Podemos distinguir dos fuentes principales:

– **Medio marino:** Se considera la fuente principal de iones de cloruro, aunque también es fuente, en menor medida, de aniones como los nitratos o sulfatos (Figura 2-3).

La influencia de este foco disminuye en climas húmedos, donde se eliminan parte de las sales debido a procesos de disolución. Además, según aumenta la distancia al mar, a partir de los 20 kilómetros, se aprecia un descenso importante en la cantidad de cloruro procedente de este foco [7].



**Figura 2-3. Fotografía del colapso sufrido por un edificio en Florida. Entre las causas del derrumbe los expertos indican que se encuentra la exposición prolongada a la sal marina y al aporte continuo de sales que favorecieron los procesos de corrosión de las armaduras. Imagen AFP [8]**

– **Focos de contaminación causados por la actividad humana:** Son grandes fuentes de sulfatos propiciados por la combustión de combustibles fósiles, así como, la actividad industrial (principalmente de explotaciones mineras y cementeras). Su aparición puede ser por deposición seca o húmeda. En el caso de la deposición seca, las partículas son transportadas por la atmósfera con la ayuda del viento y se suele dar en zonas con grandes cantidades de contaminación como las ciudades. Por otro lado, la deposición húmeda, por la lluvia o el rocío, donde los óxidos de azufre sufren un proceso de oxidación que tiene como resultado la formación de ácido sulfúrico y por tanto la formación de lluvia ácida que tiene un alcance de miles de kilómetros [1,9]. Los óxidos de azufre depositados sobre la superficie del material por vía seca, también puede llegar a formar ácidos en presencia de agua y otros agentes oxidantes (Figura 2-4).



**Figura 2-4. Gárgola dañada por la lluvia ácida [10]**

#### 2.1.2.4 Metabolismos de organismos y microorganismos

Los seres vivos son una de las fuentes principales de las sales fosfatadas de calcio y magnesio, así como de nitratos y cloruros. Estas sales se generan con las deposiciones de los animales disueltas con el agua. Otra fuente de fosfatos proveniente de los animales es generada por sus restos óseos [1,7].

Además del origen biológico, podemos encontrar que algunas sales tienen origen microbiológico. Este es el caso de los sulfatos, el cual se consigue de la metabolización del azufre por parte de estos microorganismos y su posterior oxidación, pudiendo conseguir en algunos casos sulfuros (Figura 2-5). Otro ejemplo son los nitratos, los cuales proceden de la acción de descomposición de bacterias nitrificantes sobre materia orgánica [1,7].



**Figura 2-5. Deyecciones de aves en la estatua de Álvaro de Bazán localizada en la Plaza de Álvaro de Bazán en la Escuela Naval Militar (elaboración propia)**

#### 2.1.2.5 Origen antrópico

Este origen se refiere a las acciones que realiza el propio ser humano y provocan la presencia de sales. Puede suceder por varios motivos entre los que destacan, presentación de cloruros al utilizar sales para descongelar las carreteras, aparición de sulfatos debido a las emisiones del tráfico rodado y de la actividad industrial, presencia de diversas sales debido a antiguos tratamientos, con lejías o pinturas, y, por último, aparición de sales fosfatadas debido a las cenizas de las chimeneas y de los hornos de fundición [1].

En la Tabla 2-1 se hace un resumen de cuáles son los principales focos de origen de los aniones y cationes que conforman las sales solubles y que se encuentran en edificaciones.

| <b>Iones</b>     | <b>Principal foco de origen</b>                                                                                                                                                             |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cationes:</b> |                                                                                                                                                                                             |
| Calcio           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteración de rocas calcáreas (mármoles, calizas y dolomías) ***</li> </ul>                                                                        |
| Sodio            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteración de materiales alcalinos utilizados en edificios***</li> <li>• Alteración de feldspatos*</li> <li>• Origen marino***</li> </ul>          |
| Magnesio         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteración de minerales máficos***</li> <li>• Alteración de feldspatos**</li> <li>• Alteración de dolomita**</li> <li>• Origen marino**</li> </ul> |
| Potasio          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteración materiales alcalinos empleados en edificios***</li> <li>• Alteración de feldspatos**</li> <li>• Origen marino*</li> </ul>               |
| <b>Aniones:</b>  |                                                                                                                                                                                             |
| Sulfato          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atmósferas contaminantes***</li> <li>• Origen marino*</li> </ul>                                                                                   |
| Cloruro          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Origen marino***</li> <li>• Atmósferas contaminantes*</li> <li>• Origen biológico*</li> </ul>                                                      |
| Carbonato        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteración de rocas carbonatadas (mármoles, calizas y dolomías) ***</li> <li>• Atmósferas contaminantes*</li> </ul>                                |
| Nitrato          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atmosferas contaminadas**</li> <li>• Origen marino*</li> <li>• Origen biológico***</li> </ul>                                                      |
| Fosfato          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Origen biológico***</li> </ul>                                                                                                                     |
| Oxalato          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Origen biológico***</li> <li>• Origen antrópico*</li> </ul>                                                                                        |

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

\*\* Origen frecuentemente citado en estudios realizados sobre el tema

\* Posible origen según diversos estudios realizados sobre el tema

**Tabla 2-1. Principal foco de origen de los cationes y aniones presentes en los materiales porosos [3]**

### 2.1.3 Comportamiento de la solubilidad frente a cambios externos

Como ya se mencionó anteriormente, la acción alterante ocasionada por las sales solubles se debe a ciclos periódicos de disolución-cristalización promovidos por los cambios en el contenido de humedad del material, temperatura a la cual se produce la cristalización y humedad relativa del ambiente que rodea al material afectado.

En lo que respecta a la temperatura (Figura 2-6) se aprecia como la solubilidad, normalmente, aumenta de manera directamente proporcional a ésta, aunque este efecto es difícil de predecir y es diferente en cada soluto. Como se puede apreciar, en algunos compuestos como el cloruro de sodio y el sulfato de potasio la solubilidad apenas varía con el aumento de temperatura. Sin embargo, en otros como el nitrato de potasio y el de sodio se aprecia un gran aumento de su solubilidad [11].

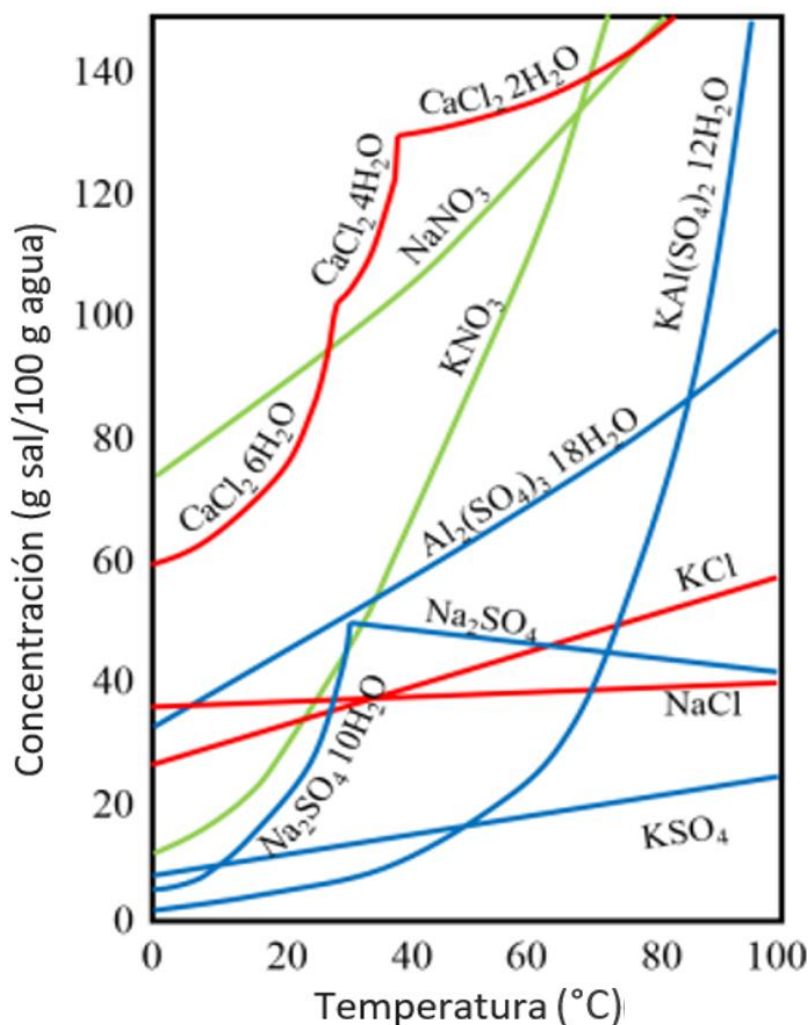


Figura 2-6. Solubilidad frente a temperatura de diferentes compuestos químicos [11]

Con respecto a la influencia de la humedad relativa se muestra en la Tabla 2-2 la humedad a partir de la cual se produce la transición entre fase sólida y líquida.

| Sal             |                                                      | Temperatura |
|-----------------|------------------------------------------------------|-------------|
| Halita          | NaCl                                                 | 75,3        |
| Silvita         | KCl                                                  | 84,3        |
| Thenardita      | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                      | 82,2        |
| Miralbita       | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O  | 91,4        |
| Nitro (salitre) | KNO <sub>3</sub>                                     | 93,6        |
| Nitratita       | NaNO <sub>3</sub>                                    | 74,3        |
| Nitro amónico   | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                      | 61,8        |
| Nitromagnesita  | Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | 52,9        |
| Nitrocalcita    | Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O | 50,5        |
| Natrón          | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O  | 88,2        |
| Antarcticita    | CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                 | 28,6        |
| Bischofita      | MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                 | 32,8        |
| Epsomita        | MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 88,3        |

Tabla 2-2. Humedades de equilibrio (en %) de soluciones saturadas a temperatura ambiente (25 °C) [12]

Estos cambios en las condiciones ambientales afectan no solo a la transición entre fase soluble y fase cristalizada, sino que, además, dependiendo de la sal presente, ocasiona que la fase precipitada sea distinta. De esta manera tal y como se muestra en la Figura 2-7, el sulfato de sodio puede encontrarse como thenardita (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o mirabilita (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O), con el consiguiente aumento de volumen del cristal (aumenta hasta un 300%) y por tanto con un aumento en la presión que esta sal ejerce contra las paredes de los poros.

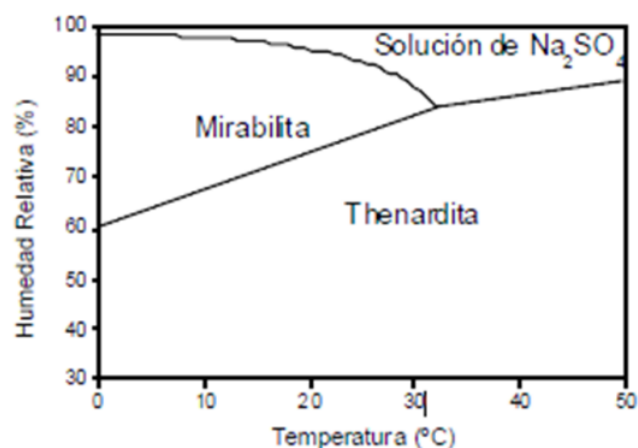


Figura 2-7. Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa de la mirabilita y la thenardita [13]

#### 2.1.4 Sales como material con diferente respuesta térmica

La presencia de las sales solubles en un material de construcción puede ocasionar que la respuesta térmica de este se vea afectada. Esta hipótesis, que es de partida para este trabajo, se basa en que:

1. Las sales solubles se caracterizan por ser muy higroscópicas, por lo que atraen el agua del ambiente consiguiendo absorber altas cantidades de agua. Debido a este proceso de absorción, es común que el material afectado presente una apariencia superficial húmeda.
2. Las sales solubles presentan coeficientes de expansión térmica superiores a los del material a tratar, por lo que, a altas temperaturas, el factor de empaquetamiento de estas en el interior de los poros del material será mayor. Tal y como se establece en otros estudios [14], el coeficiente de expansión térmica del NaCl desde los 20°C hasta los 100°C es de 0,933%, mientras que el de una caliza es de 0,064% (15 veces más bajo).
3. Las sales solubles, especialmente aquellas que están hidratadas (es decir con un cierto número de moléculas de agua en su composición), se comportan como materiales de cambio de fase (PCM) [15]. Estos materiales son sustancias capaces de almacenar y liberar grandes cantidades de energía para utilizarlas de diferentes formas en los sistemas de almacenamiento de energía térmica (*Thermal Energy Storage*, TES). Estas sustancias tienen un calor de fusión elevado, el cual es absorbido o liberado cuando cambia de fase sólida a líquida o viceversa [16]. Las sales solubles se encuadran en el grupo de los PCM inorgánicos. El uso de sales destaca por tener un coste inferior y por almacenar mayor cantidad de calor por unidad de volumen que los materiales de cambio de fase orgánico. Además, tienen una alta conductividad térmica, así como una temperatura de cambio de fase bien definida. Sin embargo, presentan como principales inconvenientes, la posibilidad de que sufran subenfriamientos y ocasionen una gran corrosión a algunos metales (véase Figura 2-8) [17]

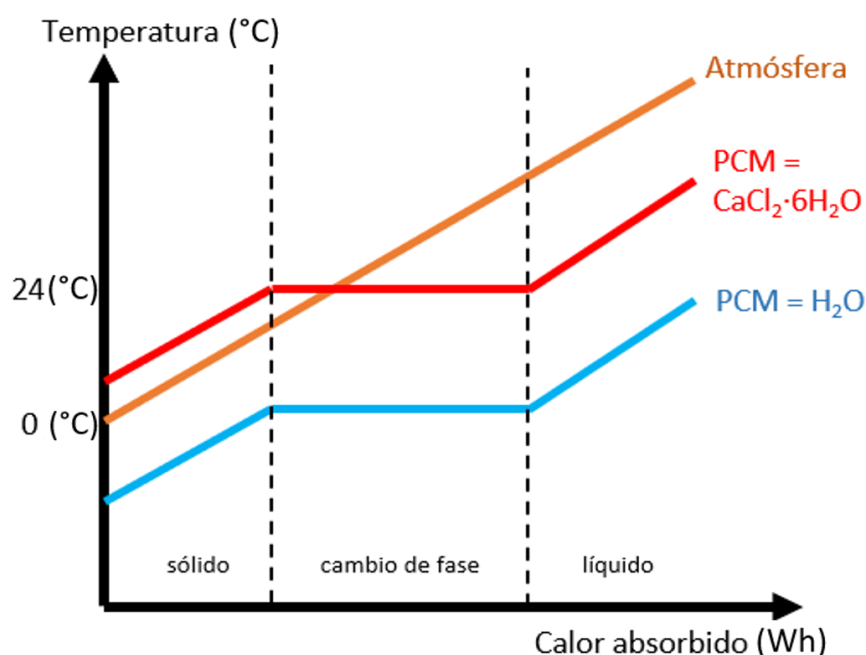


Figura 2-8. Energía almacenada durante el cambio de fase de sólido a líquido de una sal hidratada (elaboración propia)

## 2.2 Técnicas de detección de sales solubles en materiales de construcción

A la hora de analizar la integridad de una construcción es imprescindible identificar correctamente cuales son los factores de alteración que están involucrados en el proceso. Cuando se trata de alteración ocasionada por sales solubles se pueden aplicar las siguientes técnicas.

### 2.2.1 Técnicas destructivas

Se entiende por técnica destructiva aquella que requiere de la extracción de material o la modificación irreversible de la muestra durante el proceso de análisis. Este enfoque implica que la muestra no puede ser recuperada o reutilizada en su estado original una vez que se ha llevado a cabo la prueba.

Entre las técnicas que requieren la extracción de muestras para la detección, identificación y cuantificación de sales solubles destacan por su aplicabilidad en obra las siguientes [18]:

- *Cromatografía Iónica (IC)*: es una técnica analítica de separación y cuantificación de iones en una muestra líquida. Esto se consigue gracias a una columna rellena de material de intercambio iónico y una carga eléctrica. Mediante la cromatografía iónica se pueden analizar iones orgánicos e inorgánicos, así como, proporcionar información de la composición iónica de la muestra [19].

- *Difracción de rayos X (DRX)*: técnica física que permite reconocer de forma eficaz las fases cristalinas que componen un material, permitiendo por tanto identificar qué tipo de sal está presente. Proporciona información sobre estructuras, fases, orientaciones cristalinas, tamaño de grano, cristalinidad y defectos [20].

- *Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)*: es una técnica para la cuantificación de cationes en una muestra mediante una radiación. En esta técnica se emplea un plasma generado por acoplamiento inductivo para excitar los átomos, que luego emiten esta radiación electromagnética [21].

### 2.2.2 Técnicas no destructivas

Por otro lado, existen métodos que no requieren la extracción de muestras. Se conocen como técnicas no destructivas (*Non-Destructive Techniques*, NDT) y gracias a estos métodos se pueden evaluar las propiedades de los materiales sin provocar un daño permanente al material. Entre algunas de las NDT que son capaces de identificar la presencia de diferentes materiales destacan [18]:

- *Transmisión de ultrasonidos*: esta técnica permite conocer la presencia de distintos materiales o la variación en las propiedades en el interior del material, según las trayectorias de propagación de las ondas ultrasónicas en un tiempo determinado. Para llevar a cabo esta técnica se requiere de un emisor de ondas y un receptor que las reciba para conocer la duración de la trayectoria.

- *Tomografía eléctrica*: es una técnica geofísica que se utiliza para determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo. Consiste en aplicar una corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de dos electrodos, mientras se mide el voltaje en otro par de electrodos a lo largo de un perfil de medida y hasta cierta profundidad. Los valores obtenidos representan la resistividad aparente, que tras su procesamiento revela información sobre la resistividad real del subsuelo, la cual es característica de cada tipo de material [22]. Esta técnica ofrece numerosas ventajas, como su bajo coste, portabilidad y seguridad en su manejo. Al no requerir el uso de radiación, no se necesitan habilidades especiales ni genera residuos peligrosos [23].

- *Georradar*: esta técnica consiste en el uso de ondas electromagnéticas de alta frecuencia para explorar el subsuelo y las estructuras presentes en él. Se envían pulsos electromagnéticos al suelo a través de una antena y se registran las ondas reflejadas para generar imágenes de secciones del subsuelo. La interpretación de los datos permite identificar características como capas geológicas, cavidades o estructuras enterradas [24].

- *Análisis termográfico*: esta técnica se basa en el estudio de imágenes de temperatura o térmicas extraídas mediante una cámara termográfica. Como se verá en el apartado 2.3, mediante este método se

mide la radiación infrarroja emitida por un objeto, lo cual, permite detectar anomalías o problemas internos sin causar daños.

## 2.3 Termografía infrarroja

### 2.3.1 Teoría de la termografía infrarroja

Como se ha comentado en el apartado anterior, la termografía infrarroja es un método de Evaluación No Destructivo existente desde hace décadas y que aún sigue desarrollándose para poder ser aprovechada al máximo. Algunas de las características que definen esta técnica son que mide en tiempo real, es decir, se observa el objeto en la pantalla de la cámara termográfica (también conocida como térmica o infrarroja) durante su medición, es bidimensional, midiendo la temperatura en más de un punto de un objeto a la vez y es multidisciplinar, lo cual quiere decir que no obtenemos información únicamente de la temperatura, sino que se pueden observar patrones térmicos y anomalías [25]. Su precisión depende de varios factores, como la superficie que puede abarcar, la velocidad de toma de imágenes o la cámara infrarroja que se utilice [26].

A su vez, la cámara infrarroja debe conocer valores de ciertos parámetros para ser capaz de convertir los valores de radiación emitidos por el objeto en cuestión, en valores precisos de temperatura, conocido como temperatura absoluta. Los parámetros que debe conocer son la distancia entre el objeto y la cámara infrarroja ( $d(m)$ ), emisividad de la superficie a medir del objeto ( $\varepsilon (-)$ ), temperatura atmosférica ( $T_{atm}$  (K)), humedad relativa ( $H_r$  (%)) y temperatura reflejada ( $T_{ref}$  (K)) [27].

En el caso de la radiación, esta se compone de partículas, comúnmente conocidas como “fotones” o “cuantos”. Cada una de estas partículas tiene una energía asociada, la cuál es conocida gracias a la ecuación de Planck-Einstein (Ecuación 1):

$$e = h \times \nu = (h \times c) / \lambda \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde la energía del fotón ( $e$ ) se mide en Julios (J), la  $h$  es la constante de Planck y su valor es de  $6,626 \cdot 10^{-34}$  (J·s), la  $\nu$  es su frecuencia medida en Hz, la velocidad de la luz ( $c$ ) medida en (m/s) y  $\lambda$  hace referencia a la longitud de onda del fotón medida en metros (m).

En la Figura 2-9 se puede observar que la banda espectral infrarroja se divide a su vez en tres sub-bandas dentro del espectro electromagnético: SIR, MIR y FIR. El SIR (*Short Infrared*) abarca desde 780 nm a 3  $\mu m$ , el MIR (*Mid Infrared*) desde 3 a 5  $\mu m$  y el FIR (*Far Infrared*), también conocido como TIR (*Thermal Infrared*), de 7 a 14  $\mu m$ .

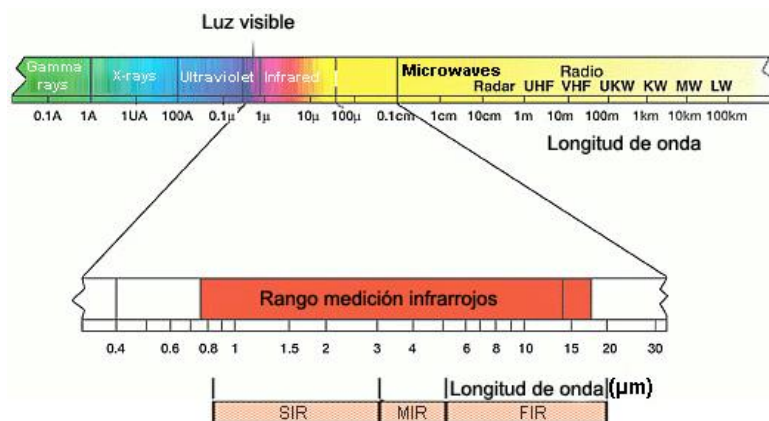


Figura 2-9. Espectro electromagnético magnético completo. La banda roja hace referencia al rango de medición de infrarrojos en  $\mu m$  [28]

Por otro lado, cada cuerpo emite una radiación determinada según su estado de temperatura. Esta temperatura depende de qué tan rápido se muevan los átomos y según la intensidad de vibración de las moléculas de este cuerpo. La radiación de interés solamente es la que comprende en la banda espectral infrarroja, ya que en esa banda es donde la correlación entre radiación y temperatura emitida del cuerpo alcanza el máximo punto, siendo así más fácil la medición. Por eso las cámaras termográficas sólo son sensibles sus sensores a dicha banda, concretamente en condiciones ambientales a la sub-banda TIR. Dicha radiación infrarroja ( $E_b$ ), o térmica, sigue la expresión matemática expresada según la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 2) [27]:

$$E_b = \sigma \times T_b^4 \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde  $E_b$  se mide en  $\text{W/m}^2$ , la  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de  $5.67 \cdot 10^{-8}$  medido en  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  y  $T_b$  es la temperatura absoluta del cuerpo negro medido en Kelvin (K). Un cuerpo negro es un cuerpo físico ideal que emite toda la radiación recibida. Sin embargo, al no existir este objeto ideal, se están desarrollando simuladores que tratan de replicar el comportamiento de un objeto negro. Además, la cámara debe ser capaz de medir la radiación de los cuerpos reales, también conocidos como cuerpos grises. Esto se consigue gracias a la emisividad ( $\varepsilon$ ), que es la diferencia de radio entre un cuerpo gris y un cuerpo negro a la misma temperatura. Por esta razón, se incluye la emisividad en la adaptación de la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 3) [27]:

$$E_g = \varepsilon \times \sigma \times T_g^4 \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde  $E_g$  y  $T_g$  son la radiación emitida y la temperatura de un cuerpo gris y la  $\varepsilon$  tiene un valor entre 0,1 y 0,99, parámetro adimensional al ser un ratio.

Por tanto, el sensor térmico de una cámara de infrarrojos recibe radiación térmica de dos fuentes: la radiación reflejada (la fracción  $1 - \varepsilon$ ) y la transmitida (la fracción  $\varepsilon$ ) por el cuerpo en cuestión. Entonces, en las aplicaciones de termografía infrarroja (IRT), la radiación medida es la suma de la emitida por el objeto en estudio y la reflejada por su entorno. Dado que los materiales suelen ser opacos, la radiación atravesada al cuerpo se considera insignificante. Además, durante la medición, hay una atenuación atmosférica de las radiaciones reflejadas y emitidas hacia la cámara. Por lo tanto, la ecuación de la radiación térmica total medida por la cámara infrarroja ( $W_{\text{tot}}$  ( $\text{W/m}^2$ )) es la siguiente, pudiendo ser posible conocer  $T_g$  (Ecuación 4):

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon \times T \times W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \times T \times W_{\text{refl}} + (1 - T) \times W_{\text{atm}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde  $\varepsilon$  hace referencia a la emisividad del cuerpo,  $T$  la transmitancia atmosférica (-), obtenida por la cámara al introducirle los valores de  $d$ ,  $H_r$  y  $T_{\text{atm}}$ ;  $W_{\text{obj}}$  es la radiación térmica del cuerpo (ecuación 2),  $W_{\text{refl}}$  es la radiación reflejada por el cuerpo, que además depende de las propiedades de reflexión de la superficie del cuerpo, conocida al medir  $T_{\text{ref}}$  y aplicarle en la Ecuación 2, y  $W_{\text{atm}}$  la radiación térmica de la atmósfera, conocida al aplicar  $T_{\text{atm}}$  en la Ecuación 2.

Si la emisividad no se calcula durante el uso de una cámara infrarroja, la temperatura medida se llama "temperatura aparente". Los estudios de termografía infrarroja pueden utilizar esta temperatura en enfoques cualitativos, siempre que se utilicen materiales con emisividades similares. Sin embargo, siempre se recomiendan pruebas de emisividad in situ cuando se requiere una alta precisión de los valores de temperatura medidos, por ejemplo, en enfoques cuantitativos. De otro modo, en cualitativo,

se deja un valor de emisividad igual a 1. In situ se colocaría una cinta negra en la superficie del objeto, se esperaría hasta que este alcance un equilibrio térmico con dicha superficie, se mide la temperatura de la cinta con la cámara estableciendo un valor de emisividad igual 1, y finalmente se quitaría la cinta, midiendo de nuevo la temperatura de la superficie, ajustando la emisividad desde la cámara hasta que la temperatura sea igual a la medida en la cinta.

Para obtener el parámetro  $T_{ref}$ , se ajusta la cámara a una lámina arrugada de aluminio colocada en la superficie del objeto, se establece una emisividad de 1, y de esta forma la temperatura medida refleja la temperatura de los objetos cercanos junto con las propiedades reflectivas de la superficie del objeto de interés. Hay que destacar que se debe evitar enfocar la lente de la cámara perpendicularmente al objeto para evitar la autorreflexión de la lente. [27].

### 2.3.2 Enfoques de la termografía infrarroja

Dependiendo del tipo de prueba de termografía infrarroja que se vaya a realizar, existen cuatro combinaciones diferentes en cuanto a la presencia o ausencia de un mecanismo externo y artificial de excitación térmica y el propósito de la investigación.

En relación con la presencia o ausencia de un mecanismo externo y artificial de excitación térmica en el objeto en estudio, son posibles enfoques activos y pasivos. Si existe una fuente natural de excitación térmica, como la radiación solar, el enfoque se conoce como enfoque pasivo. Con el enfoque pasivo, se mide el comportamiento térmico natural del cuerpo, ya que el análisis se realiza en condiciones reales sin ninguna fuente de calor artificial. Por otro lado, el análisis termográfico puede realizarse utilizando fuentes de calor artificiales, con el fin de medir los procesos de calentamiento o enfriamiento del objeto en estudio, durante o después de la excitación térmica. Este enfoque se llama enfoque activo, y permite identificar anomalías internas en el objeto de interés, ya que la transmitancia térmica generada por la radiación solar sería insuficiente para apreciar huellas térmicas de las anomalías internas en la superficie medida. Las diferentes estimulaciones térmicas pueden clasificarse de la siguiente manera [27]:

- *Técnicas tradicionales de excitación térmica:* Incluyen el uso de mantas térmicas y pistolas de calor. Aunque todavía se usan, se han desarrollado nuevas técnicas para mejorar la detección de defectos.

- *Nuevas técnicas de excitación térmica:* Estas técnicas incluyen la estimulación óptica, que puede emitir pulsos de energía y calor modulado. Sin embargo, a veces no proporcionan suficiente contraste térmico para algunos defectos específicos.

- *Técnicas de excitación térmica avanzadas:* Comprende métodos como la vibrotermografía, la termografía de termoinducción, la termografía de punto láser y la termografía excitada por ultrasonidos. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y se utiliza para detectar diferentes tipos de defectos en materiales.

Además, el enfoque activo presenta sub-clasificaciones:

- *Modos de Reflexión y Transmisión:*

1. Reflexión: La fuente de calor y la cámara de infrarrojos están en el mismo lado del objeto en estudio. Sirve para inspeccionar capas menos profundas.
2. Transmisión: El objeto está entre la fuente de calor y la cámara. Sirve para inspeccionar capas más profundas.

- *Tipos de Procesos de Calentamiento:*

1. Termografía Pulsada (PT): Se estimula térmicamente el objeto con pulsos cortos de duración milisegundos.
2. Termografía Lock-in (LT): El flujo de calor aplicado está modulado a una frecuencia específica.

Aparte del enfoque visto en cómo puede ser la fase de adquisición de imágenes térmicas, la técnica de la termografía infrarroja con respecto a la fase de procesamiento de imágenes tras la adquisición puede ser cualitativo o cuantitativo, dependiendo del propósito de la investigación. El enfoque cualitativo se usa cuando no se necesitan valores de temperatura precisos (valores aparentes, dejando los parámetros  $d$ ,  $T_{\text{atm}}$ ,  $H_r$ ,  $\varepsilon$ ,  $T_{\text{ref}}$  en valores estándar), sino, sino que se busca detectar la presencia o ausencia de anomalías térmicas.

Por otro lado, el enfoque cuantitativo se utiliza para obtener valores de temperatura precisos. Requiere correcciones de la emisividad y la temperatura reflejada, además de determinar la transmitancia atmosférica, como se ha explicado en el apartado previo. Este enfoque se utiliza después de la detección de posibles patologías térmicas en el material en estudio, identificadas mediante un enfoque cualitativo u otra herramienta diferente, con el fin de clasificar la gravedad y/o calcular algunas propiedades termofísicas de las anomalías detectadas, como la determinación de la profundidad de las grietas detectadas en un puente o el contenido de agua en los poros de un edificio histórico. La termografía infrarroja también emplea un enfoque cuantitativo para calcular diversos parámetros termofísicos del material en estudio, como la transferencia de calor a través de una estructura [27].

### 2.3.3 Aplicaciones de la termografía infrarroja en materiales de construcción

#### – *Envoltorio de un edificio:*

La termografía infrarroja se utiliza principalmente en la construcción para investigar la envolvente del edificio, como son las paredes y los techos, con un enfoque en la conservación de energía. Mediante la termografía infrarroja se detectan áreas de aislamiento térmico faltante o dañado, evaluando la conductividad térmica local. Se realiza después del atardecer con calefacción operando, para crear diferencias de temperatura entre las superficies internas y externas. Además, se puede utilizar para identificar anomalías debidas a la humedad y evaluar el éxito de las medidas correctivas. La realización del ensayo desde el interior, o el exterior del edificio (o ambos), dependerá de varios factores que el operador experimentado deberá tener en cuenta. Realizar el ensayo desde el interior evita problemas de reflexión solar, pero la ubicación de los defectos en relación con las caras del edificio también influye. La detección de filtraciones en el techo mediante gradiente térmico puede ser exitosa, aunque en techos de concreto puede ser difícil debido a la falta de diferencia de temperatura. Sin embargo, este método puede no revelar las vías reales de filtración debido a la humedad, en este caso, se tendrá que esperar a un clima veraniego y caluroso (Figura 2-10) [29].



Figura 2-10. Termografía cuantitativa de fachadas. Izquierda sin reformar, derecha reformada [30]

– *Estructuras y acabados:*

En ocasiones, es necesario determinar información sobre la estructura interna de paredes o techos, ya sea para confirmar su configuración estructural esperada o para planificar alteraciones. En estructuras de hormigón y similares, esto solo es posible con exposición solar intensa en la superficie exterior. La termografía infrarroja es útil para localizar elementos como columnas y vigas dentro de la mampostería. También se puede utilizar para detectar problemas como el desprendimiento de hormigón o la laminación del revestimiento, especialmente en lugares con fuerte exposición solar. En construcciones más ligeras, como edificios de madera, la termografía puede realizarse con éxito después del atardecer utilizando un método de gradiente térmico [29].

– *Servicios:*

Al considerar estructuras, es crucial ubicar con precisión servicios enterrados o escondidos detrás de ellas, como las tuberías de calefacción central o el cableado eléctrico. La termografía infrarroja se utiliza para localizar rápidamente estos servicios, lo que es especialmente útil en edificios antiguos donde la información sobre la ubicación de las tuberías puede ser limitada. Además, la termografía infrarroja puede ayudar a evitar daños a las tuberías durante otros trabajos, como la perforación de suelos para servicios adicionales (Figura 2-11). Asimismo, temperaturas superficiales muy altas sobre suministros eléctricos enterrados pueden indicar un riesgo potencial de incendio [29].

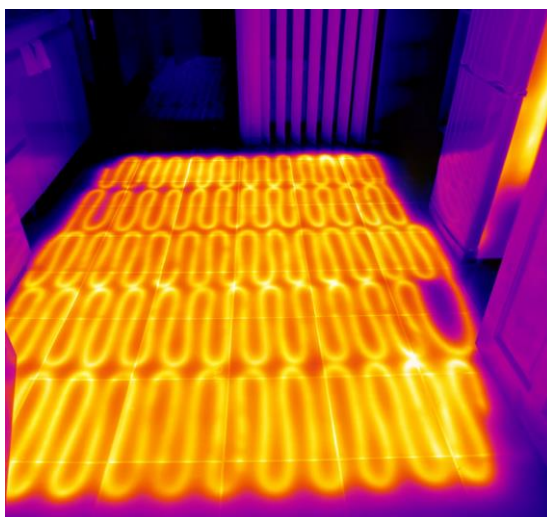


**Figura 2-11. Suelo radiante visto a través de una cámara infrarroja [31]**

### *2.3.3.1 Termografía aplicada a la identificación de sales*

Actualmente, no hay muchas investigaciones en este campo, sin embargo, se pueden destacar dos investigaciones. Estas tratan sobre la relación entre la concentración del sulfato de sodio y la respuesta térmica reconstituida en el laboratorio, y sobre la respuesta térmica de piedras de construcción contaminadas con sales.

La primera de ellas es un estudio donde se analiza la piedra reconstituida en la Abadía de Orval, susceptible a la intemperie salina debido a su composición variable. Se empleó termografía infrarroja para investigar su comportamiento térmico, revelando que la acumulación de sal afecta sus propiedades. La termografía infrarroja activa se mostró como una herramienta útil para detectar este problema de manera no destructiva, destacando la relación entre la absorción de sal y los cambios térmicos. Por último, se interpretó como un gran potencial para el diagnóstico de la acumulación de sal en materiales de construcción [32].

En segundo lugar, se llevó a cabo un estudio en el cual se investigó cómo la acumulación de sales en piedras de construcción puede causar deterioro, y, al igual que en el anterior, se determinó la termografía infrarroja (IRT) como una técnica no destructiva para su detección y seguimiento. Se probaron tres tipos de materiales mediante inmersión en soluciones salinas, y se encontró que la respuesta térmica varía según la porosidad y concentración de sales. La IRT activa se mostró prometedora para identificar y cuantificar sales en etapas iniciales de acumulación, aunque llegaron a la conclusión de que se deben hacer más investigaciones en este campo para obtener resultados más precisos y fiables [33].

## 2.4 Inteligencia artificial

La Revolución Industrial del siglo XIX, que se originó en el aumento de la capacidad humana mediante el empleo de máquinas, encuentra un símil en lo que podría denominarse una Segunda Revolución, desencadenada por la aparición de los ordenadores. Estos surgieron en la segunda mitad del siglo XX, pero a diferencia de la revolución anterior, se caracterizan por su capacidad para sustituir al hombre en actividades de tipo intelectual.

El uso de los ordenadores ha crecido con el tiempo y se ha integrado de manera significativa en la vida cotidiana. La cuestión sobre si los ordenadores pueden pensar y razonar ha sido objeto de debate durante mucho tiempo, incluso antes de su globalización. Autores como Alan Turing se plantearon esta pregunta mientras desarrollaban la idea de los ordenadores, considerando la posibilidad de que pudieran eventualmente dar lugar a la creación de objetos inteligentes [34].

Muchos autores sostienen que la inteligencia artificial (IA) es la capacidad de las máquinas para aprender utilizando algoritmos y datos, y luego realizar predicciones de manera similar a como lo haría un ser humano. Una diferencia clave entre un sistema de IA y un ser humano es que los sistemas de IA no necesitan descansar y pueden trabajar y analizar grandes cantidades de información simultáneamente, con una tasa de errores significativamente menor.

Algunos de los campos en los que la IA puede aplicarse incluyen el reconocimiento de imágenes, mejoras en la estrategia comercial, procesamiento eficiente de datos médicos, detección y clasificación de objetos, distribución de contenido en redes e Internet, protección contra amenazas de seguridad cibernética, y análisis de texto para extraer información o conclusiones.

En el futuro, se espera que los sistemas de IA también puedan ayudar en la toma de decisiones importantes en áreas como la salud, la educación, las finanzas y las relaciones interpersonales. Además, la IA ofrece la ventaja de realizar trabajos que los humanos consideran difíciles o incluso peligrosos.

Una de las principales dificultades que enfrentan los investigadores de la IA es la diferencia entre la memoria de los ordenadores y la humana. Esto significa incorporar cualidades humanas, como la capacidad para distinguir información importante de datos irrelevantes, en los procesos de aprendizaje siendo un desafío actual importante [34].

El aprendizaje automático, también conocido como *machine learning*, es uno de los principales campos de la inteligencia artificial. El *machine learning* ha tenido un gran éxito al aprender patrones complejos que les permiten realizar predicciones sobre datos no observados. Además de su uso en predicciones, se está prestando cada vez más atención a la capacidad de interpretar lo que estos modelos han aprendido. Sin embargo, este mayor enfoque ha generado una considerable confusión en torno al concepto de interpretabilidad. Específicamente, no está claro cómo se relacionan los diversos métodos de interpretación propuestos y qué conceptos comunes se pueden utilizar para evaluarlos [35]. Algunos ejemplos de este aprendizaje automático son las recomendaciones de productos en tiendas en línea, asistentes virtuales y el reconocimiento facial.

El aprendizaje profundo, *Deep Learning*, es un subconjunto del *machine learning*, el cual tiene una estructura de redes neuronales, organizadas en múltiples capas, que le permite abordar tareas más complejas [36]. Entre otros ejemplos cabe destacar el análisis de vídeo, reconocimiento de voz y de imágenes, y conducción autónoma (Figura 2-12).

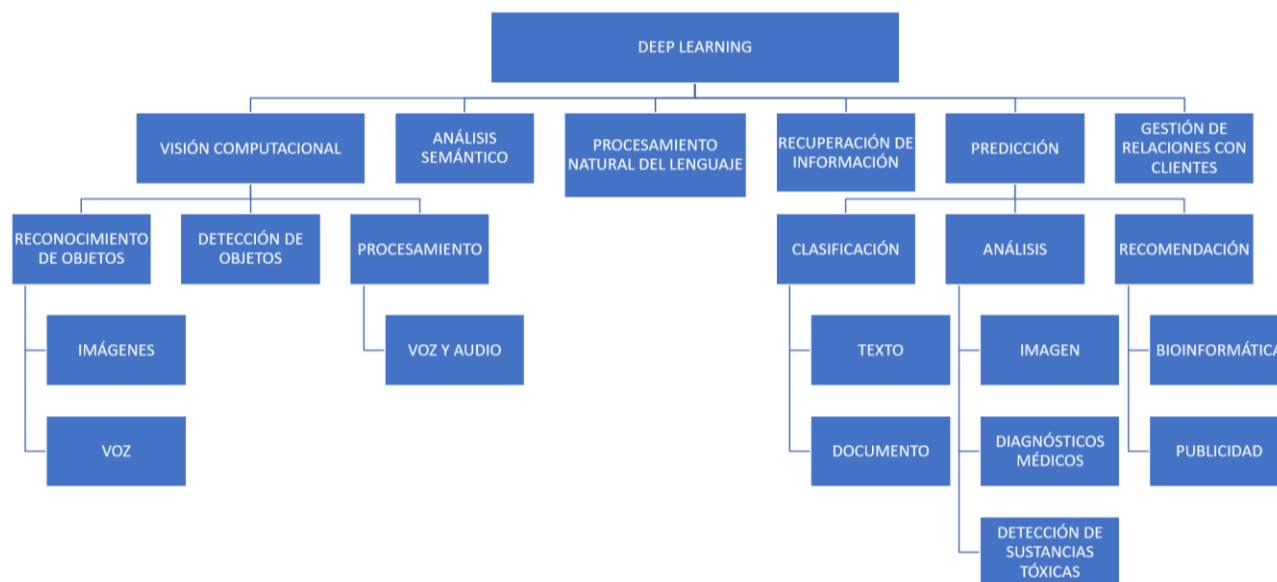


**Figura 2-12. Aplicaciones del Deep Learning (elaboración propia basada en [37])**

### 2.4.1 Modelo de Deep Learning empleado

El modelo *Deep Learning* utilizado es el conocido como *GRU* (*Gated Recurrent Unit*), propuesto por Cho et al. [38], el cual es una arquitectura de redes neuronales recurrentes (Figura 2-13). Esta arquitectura es similar a otra RNN conocida como *LSTM* (*Long Short-Term Memory*) e incorpora mecanismos de puertas (*gates*) que permiten retener y olvidar parte de información en secuencias de datos, abordando el problema del desvanecimiento del gradiente. Las GRUs son eficaces para recordar eventos pasados y utilizar esa información en eventos futuros en datos secuenciales, lo que las hace útiles en tareas como el análisis de texto, la generación de texto y el procesamiento de lenguaje natural.

Al igual que otras redes neuronales recurrentes, GRU procesa datos secuenciales una secuencia a la vez, actualizándose cada célula del modelo (véase Figura 2-13) su estado de información en función de la entrada actual y el estado de la célula anterior. Para ello, cada célula utiliza un "vector de activación candidato", el cual combina información de la entrada y del estado de la célula anterior. Esto se logra mediante la puerta de reinicio, que controla cuánto olvidar de la información del estado de la anterior célula para combinarlo con la información de la entrada. Además, dicho vector, tiene otra puerta, de actualización, que decide cuánto de la información del estado de la célula actual (tras la puerta de reinicio), incorporar como información de salida para la siguiente célula del modelo GRU. La arquitectura consiste en los siguientes componentes:

1. Capa de entrada: Recibe datos secuenciales y los introduce uno a uno en el modelo GRU.
2. Capa oculta: Realiza la computación recurrente actualizando el estado en cada célula basado en la entrada actual y el estado oculto anterior.
3. Puerta de reinicio: Determina cuánto olvidar del estado de la célula anterior ("n-1") y lo combina con la entrada que va a la célula siguiente ("n"), que será su estado correspondiente.
4. Puerta de actualización: Controla cuánto olvidar del estado de la célula "n" que va como entrada a la siguiente célula ("n+1").
5. Vector de activación candidato: responsable de la ejecución de las puertas de reinicio y actualización.
6. Capa de salida: Produce la salida de la red tras la última célula del modelo GRU.

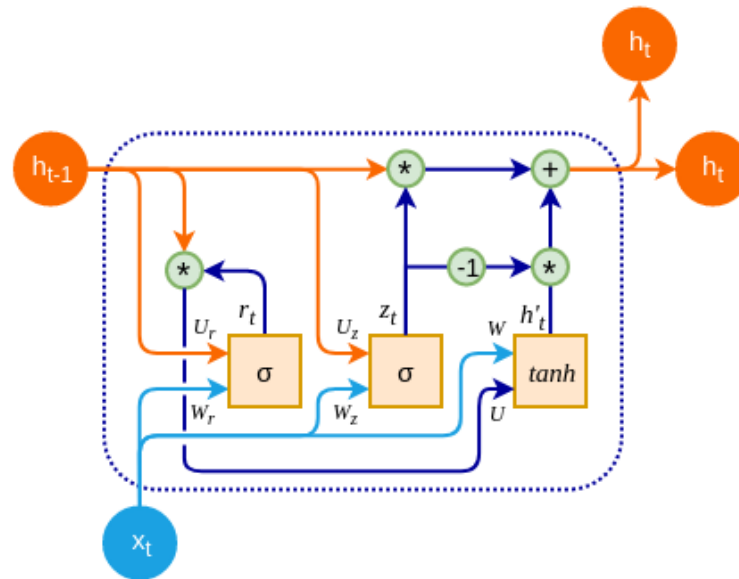


**Figura 2-13. Célula tipo de un modelo GRU. Para más información de las nomenclaturas ver fuente [38]**

El modelo GRU tiene muchas ventajas, similares a las LSTMs aunque más eficientes, con menos parámetros. El modelo GRU puede manejar dependencias a largo plazo en datos secuenciales al recordar y olvidar selectivamente entradas anteriores. Se desempeñan bien en tareas como procesamiento de lenguaje natural, reconocimiento de voz y generación de música. Son útiles tanto para secuencia a secuencia como para clasificación de secuencias, esta última que es el caso de este trabajo. En otras palabras, en este TFG se empleará la temperatura media de cada muestra medida durante un intervalo temporal de calentamiento o enfriamiento de dicha muestra, introduciendo cada secuencial temporal de temperaturas medias como una secuencia de entrada diferente, con el fin de que el modelo GRU sea capaz tras el aprendizaje de predecir qué tipo de sal hay contenido en cada muestra utilizada en este estudio.

Por otro lado, tiene algunos inconvenientes, como que los modelos GRU pueden no funcionar tan bien como las LSTMs en tareas que requieren modelar dependencias a largo plazo o patrones secuenciales complejos. Asimismo, pueden ser más propensas al sobreajuste (*overfitting*), especialmente en conjuntos de datos pequeños de entrada. Requieren ajustes cuidadosos de hiperparámetros (ajustes de control del aprendizaje del modelo) para un buen rendimiento y pueden no ser tan interpretables debido al mecanismo de las puertas.

En resumen, las redes o modelos GRU son una herramienta poderosa para modelar datos secuenciales, especialmente en situaciones con recursos computacionales limitados o cuando se busca una arquitectura más simple. Sin embargo, como cualquier modelo de aprendizaje automático, tienen limitaciones y es necesario considerar cuidadosamente su elección para una tarea específica.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Materiales empleados

#### 3.1.1 Granitos

Para este trabajo se han seleccionado tres granitos distintos, ampliamente empleados en construcciones del norte de la zona norte de Portugal, con propiedades físico mecánicas distintas como son el granito Mondim procedente del distrito de Vila Real, el granito Roriz procedente del distrito de Oporto y más concretamente de una cantera situada en Paços da Ferreira y el granito Azul Alpendorada también procedente del distrito de Oporto (Figura 3-1).

En total se han empleado 5 muestras por granito tanto para la caracterización de sus propiedades físico-mecánicas (Apartado 3.2) como para la realización de los ensayos. Todas las muestras de granito tenían unas dimensiones de 5 centímetros por lado de media.



Figura 3-1. En la imagen de la izquierda se puede observar la localización de extracción de las diferentes muestras de granito utilizadas en el proyecto (elaboración propia)

### 3.1.2 Mortero de cal

En este trabajo se ha empleado un mortero de cal confeccionado con cal apagada como ligante (compuesto a base de hidróxido de calcio), árido silíceo como agregante y agua. Este tipo de mortero se ha seleccionado en lugar de un mortero en base de cemento para evitar que, debido a procesos de lixiviación, que puedan tener lugar durante los ensayos, se produzca la liberación de sulfatos que dificulten el análisis posterior de la influencia de cada sal.

Se han fabricado diez muestras idénticas de 5 centímetros de lado en cuanto a composición se refiere, empleando para ello una relación en volumen ligante:árido de 1:3, que es la relación más utilizada en obra según algunos autores [39]. Se le añadió a la mezcla la cantidad de agua suficiente para que esta alcanzase un grado óptimo de trabajabilidad. El contenido de agua añadido a la mezcla se midió mediante el método gravimétrico, que compara el peso de la muestra reciente preparada con el peso de la muestra completamente seca, alcanzándose un contenido de agua del 15,8%.

En la Figura 3-2 se muestra la curva granulométrica obtenida para el árido empleado, utilizando para ello un juego de tamices estándar, apreciándose como éste se encuentra dentro de los límites máximo y mínimo establecidos por la norma ASTM C144 para un árido empleado en mortero [40].

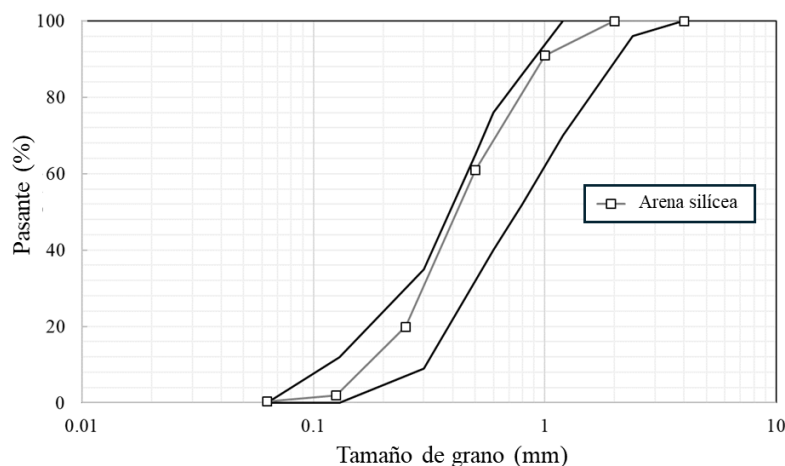


Figura 3-2. Distribución del tamaño de grano de la arena de sílice empleada en este estudio [40].

### 3.1.3 Sales solubles seleccionadas

De entre las sales solubles que suelen afectar a los materiales de construcción una vez puestos en servicio se han seleccionado tres sales muy comunes que contienen como ion común al catión sodio. Esto permitirá eliminar del estudio la influencia que pueda tener la presencia de un catión distinto en la respuesta térmica del material analizado y centrarse únicamente en el anión. En concreto se ha empleado NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaNO<sub>3</sub>.

El cloruro de sodio se escogió por ser una de las sales mayoritarias que hay en el agua de mar y por tanto ser una de las principales sales que afectan a construcciones próximas al mar, tales como las instalaciones navales. Debido a la elevada solubilidad y estabilidad de esta sal (dado que su constante de equilibrio apenas varía con la temperatura), el mecanismo de saturación se produce principalmente por evaporación, precipitando cerca de la superficie de evaporación de las rocas y ocasionando arenización o formación de eflorescencias [41][42].

El sulfato de sodio se seleccionó por ser una de las sales más abundantes en los edificios históricos y además por estar considerada como la sal más agresiva en los procesos de alteración de los materiales pétreos. Esta sal presenta cambios en la estabilidad de las fases importantes que conllevan cambios volumétricos considerables, este hecho es de gran relevancia en el deterioro de materiales pétreos

sometidos a variaciones climáticas, debido a la presión de cristalización de las sales contra las paredes de los poros. Estas sales pueden ocasionar ampollamiento o desplazaciones en el material pétreo [43][44].

Por último, el nitrato de sodio se seleccionó debido a que sirve tanto como contaminante como material de cambio de fase. Esto se debe a su alta conductividad térmica y a su estabilidad térmica y química adecuadas. Estas sales pueden generar degradación en el material a largo plazo [45].

En la Tabla 3-1 se recogen las principales propiedades de cada una de las sales empleadas

| Propiedades/Sales                              | Cloruro de sodio | Sulfato de sodio | Nitrato de sodio  |
|------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Fórmula                                        | NaCl             | SO <sub>4</sub>  | NaNO <sub>3</sub> |
| Masa molecular (g/mol)                         | 58,4             | 142,04           | 85                |
| Temperatura de fusión (°C)                     | 800 [46]         | 884 [47]         | 310 [48]          |
| Solubilidad a 20 °C (g/100 g H <sub>2</sub> O) | 36 [46]          | 18,6 [49]        | 88 [50]           |

**Tabla 3-1. Propiedades de las sales solubles escogidas para el ensayo**

A partir de estas sales se realizaron tres disoluciones a diferente concentración para contaminar las muestras de granito y los morteros de cal (3.2Tabla 3-2). Las disoluciones contaminantes empleadas fueron:

- NaCl, al 20% en peso.
- Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, al 14% en peso.
- NaNO<sub>3</sub>, al 14% en peso.

El proceso de contaminación se basó en ciclos de inmersión completas (24 horas) seguido de procesos de secado en estufa a 75°C durante 3 h para asegurar el proceso de cristalización. Una muestra de cada granito, y dos muestras de mortero, se contaminaron con una de las disoluciones antes mencionadas. En total se realizaron 8 ciclos con cada una de las disoluciones. En la Tabla 3-2 se indica la identificación asignada a cada muestra según la sal que se ha empleado para contaminarla, a la hora de tenerlo en cuenta durante los ensayos.

| Muestra/Sal      | NaCl | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | NaNO <sub>3</sub> | Referencia (sin sal) |
|------------------|------|---------------------------------|-------------------|----------------------|
| Mondim           | 1    | 2                               | 3                 | 4                    |
| Roriz            | 1    | 2                               | 3                 | 4                    |
| Azul Alpendorada | 1    | 2                               | 3                 | 4                    |
| Mortero cal      | 1, 5 | 2, 6                            | 3, 7              | 4, 8                 |

**Tabla 3-2. Números de cada piedra según la sal, correspondiendo aquellas con el número 1 y 5 al NaCl, número 2 y 6 para el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, número 3 y 7 para el NaNO<sub>3</sub> y aquellas sin sal con el número 4, 8 y 9**

Previamente al proceso de contaminación por sales, y una vez finalizado éste, se procedió a registrar el peso seco de las muestras para conocer el incremento de peso ocasionado por un aumento en el contenido de sales.

Una vez finalizados todos los ensayos de este estudio, y con objeto de cuantificar el contenido aniónico de cada sal, se procedió a realizar una extracción acuosa para su análisis por cromatografía iónica en las instalaciones del Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación de la Universidad de Vigo (C.A.C.T.I.). Para ello, se perforaron todas las muestras ensayadas, desde la superficie hasta una profundidad de 3 cm, recogiendo el polvo generado. Posteriormente se sumergió 1 gramo de polvo en 10 ml de agua ultrapura y se agitaron en baño de ultrasonidos durante 2 horas (tiempo suficiente para la solubilización de las sales). Transcurrido este tiempo, se procedió al filtrado de la muestra para su posterior análisis. Antes de las perforaciones, por supuesto, se hicieron los ensayos oportunos.

### 3.2 Caracterización físico-mecánica de los materiales empleados

Antes de la realización de los ensayos objeto de este trabajo se procedió a caracterizar las propiedades físico-mecánicas tanto de los granitos como de los morteros, empleando para ello todas las muestras disponibles, a fin de analizar la posible influencia de éstas en los resultados obtenidos. En concreto se analizaron las propiedades que se detallarán a continuación siguiendo la metodología expuesta en cada subapartado.

#### 3.2.1 Porosidad accesible al agua

Según el ensayo estipulado en la norma UNE-EN 1936:2007 [51], titulada "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total", se busca obtener datos sobre el volumen de poros con un tamaño superior a  $0,1\mu\text{m}$ , los cuales están conectados entre sí y con el entorno exterior. Este parámetro revela que cuanto mayor sea la porosidad accesible, mayor será la susceptibilidad de los agentes externos para penetrar en el material y provocar alteraciones en él.

En este ensayo, se emplearon muestras por cada tipo de material, las cuales fueron secadas en una estufa a una temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa seca fuese constante ( $M_d$ ). Posteriormente, se procedió con la saturación con agua a vacío. Para ello, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se pesan las muestras ( $m_d$ ) y se colocan en un recipiente vacío. Mediante un compresor se reduce la presión hasta  $(2,0\pm 0,7)$  KPa que equivale a  $(15\pm 5)$  mmHg y durante 2 horas se mantiene constante la presión.
2. Se introduce agua a una temperatura aproximada de  $20^{\circ}\text{C}$  en el recipiente.
3. Unas sumergidas las probetas se restablece la presión atmosférica durante 5 horas.
4. Se determina la masa saturada ( $m_s$ ) de las muestras tras este ciclo, y seguidamente se pesan las muestras bajo el agua para calcular el peso hidrostático ( $m_h$ ).

Siguiendo la norma UNE-EN 1015-10:2007 [52] se determina la densidad aparente mediante la siguiente ecuación (Ecuación 5):

$$D_B = \frac{M_d}{V_B} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde  $M_d$  es el peso de la muestra una vez secada (g) y  $V_B$  el volumen aparente (ml).

Por otro lado, para calcular la porosidad abierta  $\rho_o$  (%), se utiliza la siguiente ecuación (Ecuación 6):

$$\rho_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde  $m_s$  es el peso de la muestra saturada,  $m_d$  es el peso de la muestra seca y  $m_h$  es la masa de la muestra sumergida, todo en gramos.

### 3.2.2 Porosidad accesible al mercurio y distribución porosimétrica

Ambos parámetros se determinan mediante la porosimetría por inyección de mercurio. Esta técnica permite determinar la distribución volumétrica de los poros, en el rango entre 0,1  $\mu\text{m}$  y 360  $\mu\text{m}$ , en función de la presión impuesta al mercurio, permitiendo determinar la presencia de poros en un principio inaccesibles para el agua.

Para el análisis de todos estos parámetros, se procedió a enviar muestras de 1x1x2 cm al Laboratorio de Petrofísica perteneciente a la Unidad Técnica de Caracterización Física y Química de Materiales del Instituto de Geociencias del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Se envió 1 muestra por cada tipo de roca que se analizó en un porosímetro Micrometrics (Auto Pore IV 9500), que trabaja en dos rangos de presiones, uno de baja presión (14 y 200 KPa) y otro de alta presión (0,20 a 225 MPa).

Por lo tanto, este ensayo consiste en el aumento de forma progresiva de la presión ejercida sobre la muestra. A medida que aumenta la presión, el equipo se encarga de registrar el volumen de mercurio introducido en el sólido. Mediante la ecuación de Washburn se halla el radio del poro, correspondiente con el volumen de mercurio que ha sido introducido a esa presión.

Con los parámetros obtenidos del porosímetro es posible determinar otras propiedades como por ejemplo la tortuosidad, la cual es una medida de la complejidad geométrica de un medio poroso. Es una tasa que caracteriza la difusión de fluidos a través de una estructura porosa cuya ecuación viene dada por la Ecuación 7:

$$\tau = \frac{V_i}{V_i - V_e} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde el volumen introducido ( $V_i$ ) y el volumen extruido ( $V_e$ ) se miden en ml/g.

### 3.2.3 Capilaridad

Este ensayo se rige según la norma UNE-EN 1925:1999: “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad” [53]. El objetivo de este ensayo es comprobar que el volumen de poros que presenta el material en cuestión es un factor determinante para analizar la capacidad de absorción ascendente del mismo. Este hecho sucede en el interior de los materiales de construcción, en mayor medida en fachadas y cimientos.

La absorción por capilaridad tiene lugar principalmente por la succión, proceso en el cual, el material absorbe tanto el agua como todos aquellos agentes mezclados en ella. Estos agentes pueden ser de carácter destructivo, como las sales, lo cual puede provocar una pérdida en las propiedades mecánicas del material, dañando la estructura interna del edificio en cuestión. Además, en cuanto a este fenómeno, está establecido que, a mayor volumen de poros con un diámetro de menor tamaño, mayor serán la succión la altura del frente capilar.

En cuanto al ensayo realizado en este trabajo, se ha realizado un secado de las muestras en la estufa a 75°C hasta alcanzar un peso seco constante. En segundo lugar, se han sumergido diferentes muestras de granito y mortero de cal, sobre una fina rejilla para facilitar el máximo contacto. La capa de agua ultrapura utilizada cubría aproximadamente 1 centímetro de altura de cada una de las muestras (véase

Figura 3-3). A continuación, se establecieron diferentes periodos de tiempo en los que se tomaban mediciones del peso de las muestras para ser capaces de definir las curvas de capilaridad.

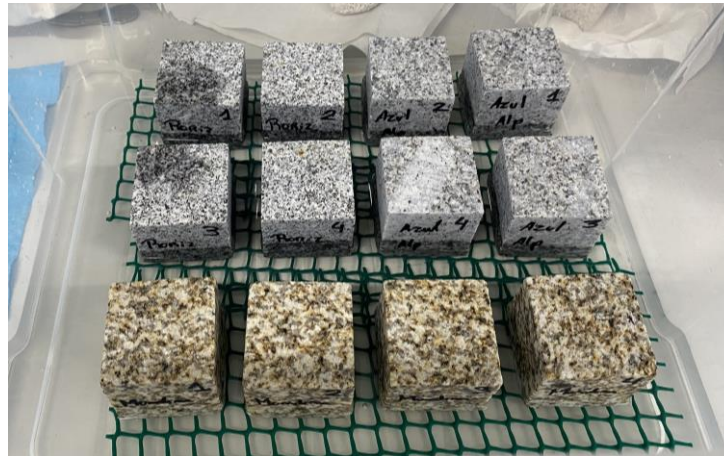


Figura 3-3. Muestras de granito siendo sometidas al ensayo de capilaridad (elaboración propia)

### 3.2.4 Velocidad de transmisión de los ultrasonidos

La prueba de ultrasonidos es una técnica no destructiva que se realiza para conocer el interior de un material, dependiendo de las trayectorias de propagación de las ondas durante un periodo de tiempo. La norma utilizada ha sido la UNE-EN 14579:2005: “Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la velocidad de propagación del sonido” [54]. Para realizar este ensayo se ha utilizado un instrumento de prueba ultrasónico, en concreto, el de Pundit Lab+ con dos transductores de 54 KHz. Se midió el tiempo que tardaba el ultrasonido en llegar del transmisor al receptor en los tres ejes dimensionales (x, y, z), para que, sabiendo la medida de cada lado, se pudiese calcular tanto la velocidad de propagación en el interior de las muestras como la anisotropía:

1. En primer lugar, se debe comprobar que el instrumento está bien calibrado. Para esto se utiliza una varilla de calibración cilíndrica, cuyo valor del tiempo de transmisión debe ser igual a 25,4  $\mu$ s. En caso de que coincida el valor, el equipo estará calibrado.
2. A continuación, se enfrentan los transductores (transmisor-receptor) colocándolos en caras opuestas (método directo de funcionamiento) (véase Figura 3-4).
3. Una vez realizado el segundo paso, se pulsa el botón correspondiente al brazo izquierdo de la cruz de botones presente en el equipo, buscando un 100% de transmisión. En caso de no conseguir este porcentaje, se utiliza un gel acoplador conductor de ultrasonidos.
4. Repetir el proceso en todas las caras de la muestra y con todas las muestras.

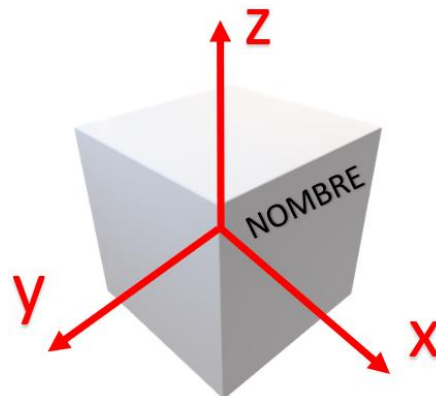
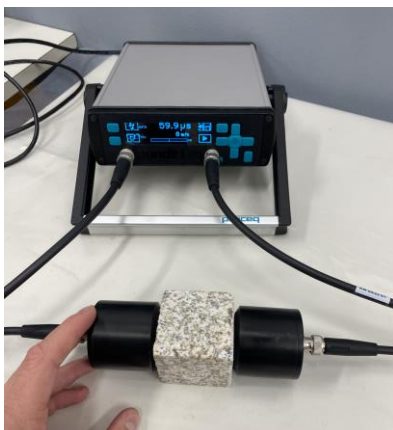


Figura 3-4. Instrumento ultrasónico de Pundit Lab+ mientras se realiza un ensayo con una muestra de granito Mondim. La imagen de la derecha muestra los 3 ejes (x, y, z) empleados (elaboración propia)

Una vez obtenidos los datos sobre el tiempo que transcurre desde que la emisión de ultrasonidos, que viaja del transmisor al receptor, se mide mediante un pie de rey las medias de cada cara. De esta forma, se puede calcular la velocidad de propagación ultrasónica en el interior de las muestras. La transmisión de los ultrasonidos se determinó antes y después del proceso de contaminación por sales. Las expresiones indicadas en las Ecuaciones 8 y 9 representan  $dM$  (%) y  $dm$  (%), que son índices de anisotropía:

$$dM\% = (1 - (2V_{Pmin} / (V_{Pmax} + V_{Pmedia}))) \times 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$dm\% = (2x((V_{Pmax} - V_{Pmedia}) / (V_{Pmax} + V_{Pmedia}))) \times 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde  $V_{Pmax}$  es la máxima velocidad de las ondas (cm/ $\mu$ s),  $V_{Pmedia}$  es la velocidad media (cm/ $\mu$ s) y  $V_{Pmin}$  es la velocidad mínima (cm/ $\mu$ s).

### 3.2.5 Propiedades mecánicas: dureza superficial y resistencia a compresión simple

El ensayo de dureza es uno de los más empleados en la selección de los materiales, ya que nos permite realizar un control de calidad de estos. Este ensayo destaca por ser una técnica no destructiva que nos permite evaluar propiedades de los componentes microestructurales del material [55].

La resistencia a la compresión simple o uniaxial de una roca (RCS) es el término técnico utilizado para describir el esfuerzo medido sobre una roca en una dirección específica. Este parámetro es fundamental para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso. Obtener la RCS mediante ensayos de laboratorio implica la preparación meticulosa de muestras y un tiempo considerable para obtener resultados, lo que puede generar costos elevados [56].

Para realizar este ensayo se utilizó el durómetro indicado en la Figura 3-5. Se tomaron 6 medidas diferentes para cada una de las muestras, descartando aquellas que se desviaban en gran medida del valor medio, tanto en valores superiores, como inferiores.



**Figura 3-5. Medidor de dureza PCE-2500 (elaboración propia)**

El valor de la dureza superficial se puede emplear para predecir de manera indirecta la resistencia compresión uniaxial (RCS), empleando para ello la expresión de Aoki (Ecuación 10).

$$RCS(MPa) = 0,079e^{-0,039n}LS^{1,1} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde  $n$  hace referencia a la porosidad accesible al agua (%) y  $L_s$  al valor de la dureza superficial obtenida con el durómetro (HDL).

### 3.3 Análisis termográfico

#### 3.3.1 Comportamiento de térmico de las sales empleadas frente a enfriamiento

Antes de analizar cómo influye la presencia de las sales en el comportamiento térmico de los materiales de construcción seleccionados, se procedió a determinar la curva de enfriamiento de cada sal.

Para ello, se colocaron 6 gramos de sal sobre un vidrio de reloj y se introdujeron en estufa a 80°C durante 48 horas. Transcurrido este tiempo, se colocaron las placas Petri con las sales en una zona del laboratorio donde tanto la pared como la mesa se recubrieron de plástico negro para evitar la reflexión de la luz. Posteriormente se comenzó a monitorizar el enfriamiento de las sales mediante la cámara termográfica en modo de grabación tomando 10 imágenes por segundo. Alcanzada la temperatura ambiente se da por finalizado el ensayo.

Hay que recalcar que antes de realizar la grabación, se configuraron los parámetros de la cámara termográfica, como son la distancia (1 metro para todos los ensayos), la humedad relativa, la temperatura atmosférica y la temperatura reflejada de acuerdo con la teoría explicada en el apartado 2.3.1. Este último parámetro se ajustó gracias al uso de un papel de aluminio arrugado, y posteriormente estirado y pegado a la pared negra. Además, la emisividad establecida para todas las grabaciones fue de 0,87 tras las mediciones hechas basándose en una cinta negra colocado encima de las muestras. La distancia se estimó mediante un flexómetro, y la humedad relativa y la temperatura atmosférica mediante un termohigrómetro.

En el caso de las sales, el valor de la humedad relativa en ese instante fue de 56%, de la temperatura atmosférica fue de 17°C y de la temperatura reflejada fue de 17°C.

La cámara termográfica empleada fue la FLIR E85 y el procesamiento de las imágenes se realizó mediante la aplicación FLIR Tools+ (Figura 3-6). Para la determinación de la temperatura media a cada instante de tiempo se seleccionó un área de 10 cm<sup>2</sup>.



**Figura 3-6. Cámara termográfica FLIR E85 [57]**

| FLIR E85               | CARACTERÍSTICAS                                                                                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Resolución térmica     | 384x288 (110,592 píxeles)                                                                                        |
| Resolución visible     | 5 megapíxeles                                                                                                    |
| Resolución de pantalla | 640x480                                                                                                          |
| Rango de temperaturas  | Desde -20 °C hasta 1200 °C                                                                                       |
| Exactitud              | $\pm 2$ °C o $\pm 2$ %                                                                                           |
| Sensibilidad térmica   | <40 mK a 30 °C                                                                                                   |
| Opción de paletas      | Múltiple: Iron, Gray, Rainbow, Artic, Lava, Rainbow HC (High Contrast)                                           |
| Emisividad             | Sí, variable desde 0.01 hasta 1.0                                                                                |
| Batería                | Dispone de 2 baterías recargables de 3,6 V con una duración de $\pm 2.5$ horas a temperatura de trabajo de 25 °C |

Tabla 3-3. Especificaciones cámara FLIR E85 [58]

### 3.3.2 Comportamiento térmico de las muestras de granito

Una vez determinado el comportamiento térmico de cada sal, se procedió a medir la respuesta térmica de los diferentes materiales de construcción seleccionados frente a ciclos de enfriamiento y de calentamiento.

Los ciclos de enfriamiento siguieron un procedimiento similar al empleado para caracterizar las sales. En primer lugar, se calentaron las muestras a 80°C en estufa a fin de garantizar que el proceso de calentamiento fuese lo más homogéneo posible. Transcurrido el tiempo suficiente para que la temperatura de las muestras fuese aproximadamente de 70°C, se procedió a sacarlas de la estufa y colocarlas sobre la mesa para llevar a cabo la monitorización del enfriamiento con la cámara termográfica hasta que las muestras alcanzasen temperatura ambiente, momento en el cual se da por finalizado el ensayo (Figura 3-7).

Para la realización de los ciclos de calentamiento, las muestras se enfriaron en la nevera hasta alcanzar una temperatura aproximada de 6°C. Posteriormente se colocaron sobre la mesa y se siguió el mismo proceso de monitoreo hasta alcanzar temperatura ambiente.

Finalizados los ensayos se procedió al procesamiento de las imágenes mediante la herramienta FLIR Tools+ tomando como temperatura de referencia la temperatura media en una superficie de 40 cm<sup>2</sup>, superficie que abarcaba a una de las caras de las muestras.

En cada una de las pruebas termográficas realizadas, se colocaron 4 muestras de uno de los materiales, 3 con cada una de las sales antes mencionadas y una sin sal que se empleó como referencia, es decir, la que indica cuál es el comportamiento del material sano (Figura 3-8).

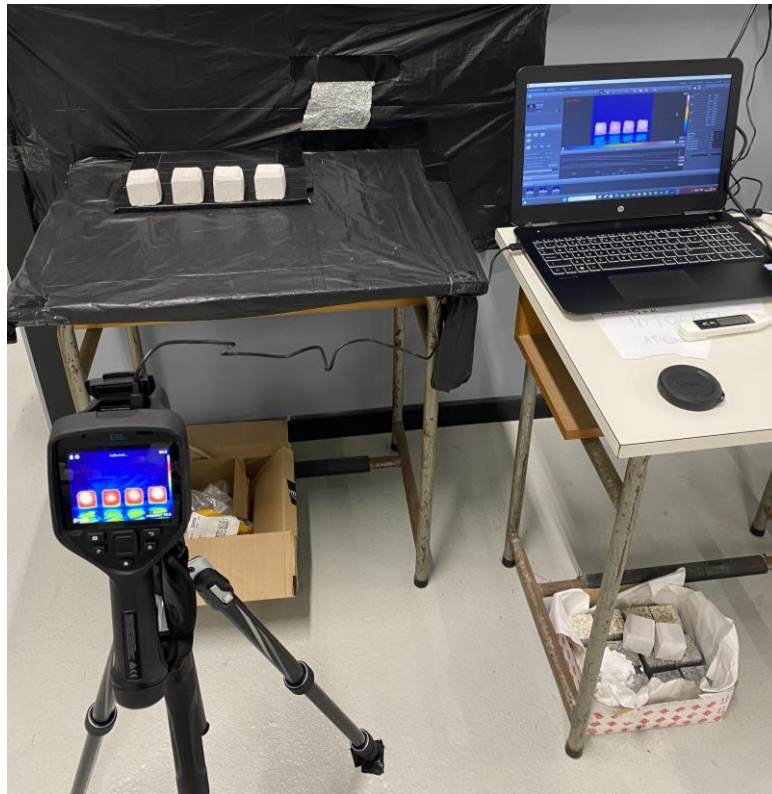


Figura 3-7. Disposición de las muestras de mortero, cámara termográfica y aplicación FLIRTools+ en el laboratorio de mecánica de la escuela Naval Militar, durante el registro de temperatura realizado en uno de los ensayos (elaboración propia)

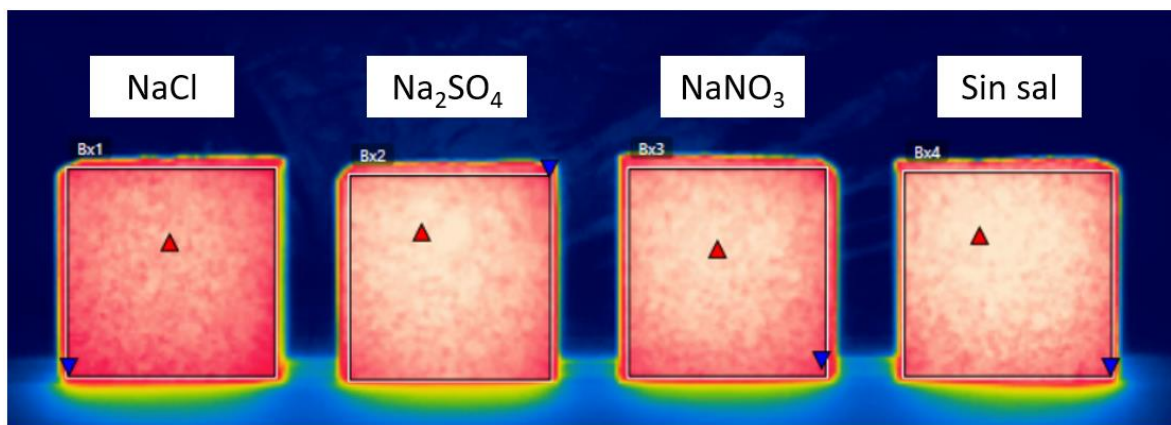


Figura 3-8. Muestras de granito Roriz durante el inicio de un ensayo de enfriamiento observado desde la aplicación FLIRTools+. Los rectángulos con contorno negro indica las regiones seleccionadas manualmente para el cálculo de la temperatura media en cada instante temporal, cálculo realizado por la propia aplicación (elaboración propia)

### 3.4 Análisis de calorimetría diferencial de barrido

La calorimetría diferencial de barrido (*Differential Scanning Calorimetry* o *DSC*) permite medir la cantidad de calor liberado o absorbido por una muestra durante el calentamiento o enfriamiento en un rango de temperatura establecido.

El equipo utilizado para realizar este ensayo es el *Labsys Evo TGA*. Este equipo dispone de una balanza y un horno, el cual puede alcanzar hasta una temperatura de 1180°C. En total se hicieron 20

ensayos, 12 de ellos para cada muestra de granito o mortero de cal con cada sal, 4 para las muestras que no contenían sal y 3 para las sales por separado y un ensayo inicial con el crisol vacío denominado blanco para poder quitar la influencia de este en la respuesta térmica detectada por el equipo.

Los pasos a seguir en cada uno de estos ensayos fueron los siguientes:

- En primer lugar, se inicia el programa “Acquisition”, donde se programan las secuencias de temperatura, las velocidades de enfriamiento y calentamiento (Figura 3-9 y Figura 3-10).

| #  |   | Initial T (°C) | Final T (°C) | S.r. (K/min) | Time (s) | Valves  |         |         | TG Tare                  |
|----|---|----------------|--------------|--------------|----------|---------|---------|---------|--------------------------|
| 1  | → | 20             | 20           | 0            | 300      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 2  | ↗ | 20             | 100          | 10           | 480      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 3  | → | 100            | 100          | 0            | 300      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 4  | ↘ | 100            | 20           | 10           | 480      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 5  | → | 20             | 20           | 0            | 300      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 6  | ↗ | 20             | 100          | 10           | 480      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 7  | → | 100            | 100          | 0            | 300      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 8  | ↘ | 100            | 20           | 10           | 480      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 9  | → | 20             | 20           | 0            | 300      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 10 | ↗ | 20             | 100          | 10           | 480      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 11 | → | 100            | 100          | 0            | 300      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |
| 12 | ↘ | 100            | 20           | 10           | 480      | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | <input type="checkbox"/> |

**Figura 3-9. Ciclo de calentamiento y enfriamiento establecido para los ensayos (elaboración propia)**

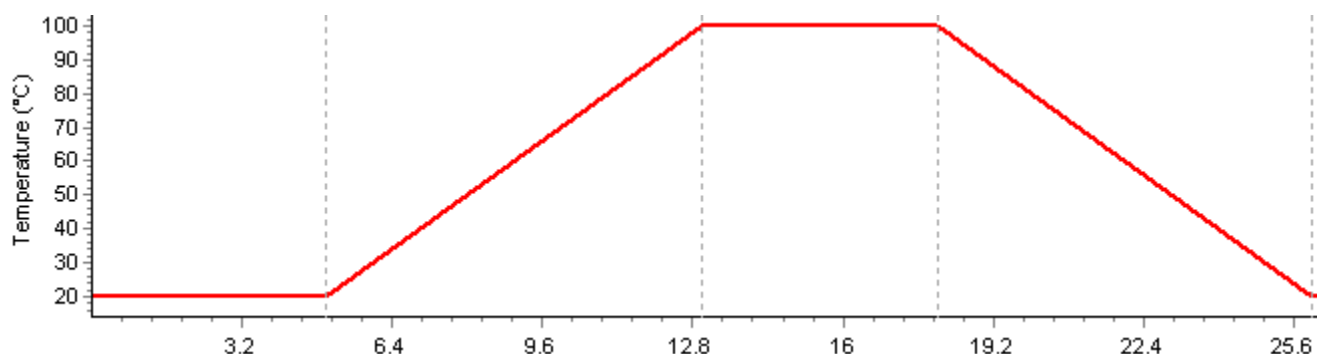


**Figura 3-10. Representación gráfica de uno de los tres ciclos de calentamiento-enfriamiento a los que se someten las muestras (elaboración propia)**

- Una vez seleccionados los ciclos, se deben preparar las muestras. Para conseguir muestras en polvo de los diferentes granitos y cal, se hizo uso de un taladro para poder acceder a las zonas centrales del interior de las muestras. El equipo dispone de dos crisoles que se sitúan en la parte superior de la caña, uno de referencia y otro de ensayo donde se introducen las muestras en polvo obtenidas. Este último crisol, es de alúmina 203 y se sitúa en la parte exterior de la base donde se encuentran ambos crisoles (véase Figura 3-11).

- Tras haber pesado el crisol de alúmina, se tara para, posteriormente, introducir la muestra de polvo correspondiente hasta medio milímetro antes de llenar por completo el crisol. Los pesos de cada muestra variaron entre 70 y 130 mg dependiendo del granito y la sal que tenían en su interior. Cuando se haya realizado la medida del peso e introducido este dato en las propiedades del experimento, el crisol se sitúa en su lugar de la caña, es decir, en la base superior, y se cierra el equipo Labsys Evo para comenzar el ensayo termogravimétrico.

- Por último, una vez finalizado el tiempo, se abre el equipo y se limpia el crisol de alúmina con ácido clorhídrico al 0,7%, agua y posteriormente se procede a comenzar el ciclo de secado del crisol en la estufa a 100°C para evitar obtener resultados erróneos.

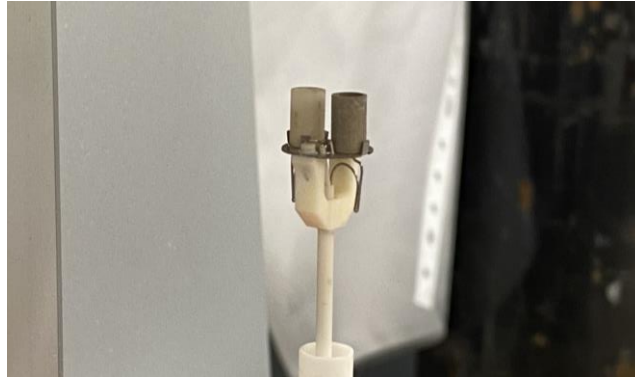


**Figura 3-11.** El crisol de la izquierda de la imagen corresponde al de referencia y el de la derecha al de alúmina 203 (elaboración propia)

Tras haber finalizado el experimento, se utiliza el software “*Processing*”, donde se obtienen los datos de forma gráfica y pueden ser exportados a *Microsoft Excel*.

### 3.5 Modelado de la repuesta térmica mediante *Deep Learning*

Python es un lenguaje de código abierto, de fácil escritura, requiriendo pocos recursos para el funcionamiento de sus potentes librerías a la hora de realizar diferentes operaciones. A la hora de trabajar con modelos de *Deep Learning* (DL), dicho lenguaje cuenta con librerías como *TensorFlow* y *Keras*, conteniendo entre otras redes neuronales, la red utilizada en este trabajo, el mencionado *GRU* (*Gated Recurrent Unit*). En todas las secuencias de comandos, conocidas como scripts, se ha empleado la versión 3.10 de Python apoyado para sus escrituras mediante el entorno de desarrollo integrado *Spyder* (versión 5) con el fin de aplicar correctamente la red en este TFG. Se describe cómo se ha preparado el código.

Primero de todo, se importa las librerías necesarias, siendo la librería “os” para poder acceder a las distintas rutas del sistema operativo, y, por tanto, a las secuencias de las temperaturas medias de cada muestra con su condición (tipo de sal, o sin sal) y estado (calentamiento tras salir de la nevera, enfriamiento tras salir de la estufa), “numpy” para crear vectores y matrices multidimensionales, además de que es una librería que recoge funciones matemáticas de alto nivel para operar con ellas, el propio “tensorflow” y “keras”, siendo *Keras* una sublibrería de *TensorFlow*, y el “sklearn” que agrupa varios algoritmos de clasificación, regresión y análisis de datos (Figura 3-12).

```
#import all libraries
import os
import numpy as np
import tensorflow as tf
from sklearn.model_selection import KFold
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
```

**Figura 3-12.** Script para la carga de las librerías necesarias para utilizar el modelo DL (elaboración propia)

A continuación, se importa las secuencias de entrada (sus valores), teniendo que estar cada secuencia en el formato CSV (valores separados por comas), formato que permite exportar el software *FLIRTtools+*. Aquí, simplemente en “path” se tendría que sustituir por la ruta correspondiente, y “AltaT” si se quiere importar las secuencias del enfriamiento, y “BajaT” las de calentamiento, ya que cada secuencia tiene como nombre en el archivo CSV: “NombreMuestra\_AltaT\_TipodeSal” o

“NombreMuestra\_BajaT\_TipodeSal”, siendo en “TipodeSal” “SinSal” cuando la muestra sea la de referencia (Figura 3-13).

```
#Only heating
dataset_names = []
for file in os.listdir(path_dataset):
    if file.endswith(".txt") and file.split("_")[1] == "AltaT":
        dataset_names.append(file)
        print(file)

dataset_names_with_values = []
for name in dataset_names:
    with open(path_dataset + name) as f:
        l = [line.rstrip(' ') for line in f]
        l2 = list(map(str, l[0].split(',')))
        aux = []
        for l2 in l:
            aux.append(float(l2))
        aux_2 = aux
        dataset_names_with_values.append([name, aux_2])
```

Figura 3-13. Script para la carga de las secuencias de datos de entrada al modelo DL. En este caso las secuencias de enfriamiento (“AltaT”) (elaboración propia)

Luego, se separa las secuencias en conjuntos de datos de entrenamiento, de validación y de testeo. Los valores de las variables de cada célula del modelo GRU irán variando durante el aprendizaje del modelo, que consiste en introducir el conjunto de entrenamiento al modelo como entrada, indicarlo qué valor tendría la salida de cada secuencia (valor 0 sin sal, 1 al NaCl, 2 al Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 3 al NaNO<sub>3</sub>). Al realizar un primer ajuste de los valores de los parámetros, se tendrá una cierta desviación (error), y antes del segundo ajuste (segunda iteración, conocida la iteración como *epoch*), también calcula la desviación en el conjunto de validación. Estos dos tipos de desviaciones el modelo tratará de ir reduciéndolos con los pasos de los *epochs* hasta acabar el aprendizaje (hasta llegar al último *epoch* definido por el usuario). Al tener el aprendizaje terminado, se analiza las predicciones del modelo en el conjunto de testeo y se halla también su desviación. Estos tres tipos de desviaciones se muestran los resultados aplicados en este TFG en el apartado 4 (Figura 3-14).

```
# Splitting the dataset into Train, Valid & Test data
test_dataset = [dataset_names[3], dataset_names[6], dataset_names[9], dataset_names[16]]

train_and_val_dataset = []
for name in dataset_names:
    if not name in test_dataset:
        train_and_val_dataset.append(name)
```

Figura 3-14. Script para la separar las secuencias de entrada al modelo DL en entrenamiento, validación y testeo (elaboración propia)

Con la separación de las secuencias, hay que destacar que entre la de entrenamiento y la de validación se escoge aleatoriamente, mediante una técnica llamada *cross validation*, muy empleada cuando se tiene un conjunto de datos de entrada pequeño. Dentro de la función definida de *cross validation* se emplea también variables que permite escoger el inicio (“start”) y final (“end”) de cada secuencia, en caso de no escogerla toda, y da como salida la diferencia de temperaturas frente al intervalo del tiempo que se elija (“delta\_t”). Asimismo, según el nombre del archivo CSV de cada secuencia, ya se le asigna el tipo de salida que debería tener cada uno (valor 0 sin sal, 1 al NaCl, 2 al Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 3 al NaNO<sub>3</sub>). Además, las diferencias de temperatura frente al tiempo obtenido en cada secuencia (“ratios”) se escala los resultados entre (0,1), dado que estos modelos DL trabajan mejor en esos intervalos de valores numéricos (“MinMax”) (Figura 3-15).

```

# Cross validation function
def cross_validation(train_and_val_dataset, Fold):
    k_fold = KFold(n_splits = N_Folds, shuffle = True)
    train_dataset_cross_validation = []
    val_dataset_cross_validation = []
    for i, (train, val) in enumerate(k_fold.split(train_and_val_dataset)):
        if Fold == i:
            for index in train:
                train_dataset_cross_validation.append(train_and_val_dataset[index])
            for index in val:
                val_dataset_cross_validation.append(train_and_val_dataset[index])
    x_train = np.array(np.zeros([1, num_ratios]))
    x_train = x_train.reshape(1, num_ratios, 1)
    y_train = np.array(0)
    for name in train_dataset_cross_validation:
        for name_2 in dataset_names_with_values:
            if name_2[0] == name:
                aux = np.array(name_2[1][start:end:delta_t])
                aux_list = list(aux)
                aux_list.append(aux[len(aux)-1])
                aux = np.array(aux_list)
                ratios = []
                for s, t in zip(aux, aux[1:]):
                    ratios.append((t-s)/(delta_t/delta_t))
                aux = np.array(ratios)
                min_max_scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0,1))
                aux = min_max_scaler.fit_transform(np.asarray(aux).reshape(-1,1))
                x_train = np.vstack((x_train, aux.reshape(1, num_ratios, 1)))

            if name.split('_')[2] == "SinSal.txt":
                y_train = np.vstack((y_train, np.array(0)))
            if name.split('_')[2] == "NaCl.txt":
                y_train = np.vstack((y_train, np.array(1)))
            if name.split('_')[2] == "NaSO.txt":
                y_train = np.vstack((y_train, np.array(2)))
            if name.split('_')[2] == "NaNO.txt":
                y_train = np.vstack((y_train, np.array(3)))
    x_train = x_train[1:len(x_train)+1]
    y_train = y_train[1:len(y_train)+1]

    x_val = np.array(np.zeros([1, num_ratios]))
    x_val = x_val.reshape(1, num_ratios, 1)
    y_val = np.array(0)
    for name in val_dataset_cross_validation:
        for name_2 in dataset_names_with_values:
            if name_2[0] == name:
                aux = np.array(name_2[1][start:end:delta_t])
                aux_list = list(aux)
                aux_list.append(aux[len(aux)-1])
                aux = np.array(aux_list)
                ratios = []
                for s, t in zip(aux, aux[1:]):
                    ratios.append((t-s)/(delta_t/delta_t))
                aux = np.array(ratios)

                min_max_scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0,1))
                aux = min_max_scaler.fit_transform(np.asarray(aux).reshape(-1,1))
                x_val = np.vstack((x_val, aux.reshape(1, num_ratios, 1)))

            if name.split('_')[2] == "SinSal.txt":
                y_val = np.vstack((y_val, np.array(0)))
            if name.split('_')[2] == "NaCl.txt":
                y_val = np.vstack((y_val, np.array(1)))
            if name.split('_')[2] == "NaSO.txt":
                y_val = np.vstack((y_val, np.array(2)))
            if name.split('_')[2] == "NaNO.txt":
                y_val = np.vstack((y_val, np.array(3)))
    x_val = x_val[1:len(x_val)+1]
    y_val = y_val[1:len(y_val)+1]

    return x_train, y_train, x_val, y_val

```

Figura 3-15. Script para separar conjunto de entrenamiento y validación según *cross validation*, recorte y obtención diferencia de temperaturas frente intervalo de tiempo asignado por el usuario en cada secuencia, y escalado de los ratios entre 0 y 1 (elaboración propia)

En el conjunto de testeo también se haría recorte y obtención diferencia de temperaturas frente intervalo de tiempo asignado por el usuario en cada secuencia, y escalado de los ratios entre 0 y 1 de los resultados (Figura 3-16). Hay que subrayar que los *start*, *end* y *delta\_t* son los mismos para los 3 conjuntos de datos, y se definen como variables “global” para que tenga todo el código acceso a los valores que se definan (Figura 3-17).

```
# Configuration testing dataset to the DL model (train and val dataset inside cross_validation function)
x_test = np.array(np.zeros([1,num_ratios]))
x_test = x_test.reshape(1,num_ratios,1)
y_test = np.array(0)
for name in test_dataset:
    for name_2 in dataset_names_with_values:
        if name_2[0] == name:

            aux = np.array(name_2[1][start:end:delta_t])
            aux_list = list(aux)
            aux_list.append(aux[len(aux)-1])
            aux = np.array(aux_list)
            ratios = []
            for s, t in zip(aux, aux[1:]):
                ratios.append((t-s)/(delta_t/delta_t))
            aux = np.array(ratios)

            min_max_scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0,1))
            aux = min_max_scaler.fit_transform(np.asarray(aux).reshape(-1,1))

            x_test = np.vstack((x_test, aux.reshape(1,num_ratios,1)))

            if name.split('_')[2] == "SinSal.txt":
                y_test = np.vstack((y_test,np.array(0)))
            if name.split('_')[2] == "NaCl.txt":
                y_test = np.vstack((y_test,np.array(1)))
            if name.split('_')[2] == "NaSO.txt":
                y_test = np.vstack((y_test,np.array(2)))
            if name.split('_')[2] == "NaNO.txt":
                y_test = np.vstack((y_test,np.array(3)))
x_test = x_test[1:len(x_test)+1]
y_test = y_test[1:len(y_test)+1]
```

Figura 3-16. Script para recorte y obtención diferencia de temperaturas frente intervalo de tiempo asignado por el usuario en cada secuencia, y escalado de los ratios entre 0 y 1, para el conjunto de testeo (elaboración propia)

```
#Defining hyper-parameters
global N_Folds
N_Folds = 2
global start
start = 500
global end
end = 4500
global delta_t
delta_t = 500
num_ratios = int((end-start)/delta_t)
n_inputs = 1
n_neurons = 400
batch_size = 1
n_epochs = 50
test_size = int(len(test_dataset))
```

Figura 3-17. Script que definen valores numéricos a diferentes variables usadas en el código, valores definidos por el usuario (elaboración propia)

De la figura anterior se aprecian otras variables, como la “N\_Folds”, que igualándola a 2 significa que se hará 2 separaciones aleatorias en el conjunto “entrenamiento + validación” en el *cross validation*. En otras palabras, las secuencias (“n”) que van para entrenamiento y validación se escoge aleatoriamente “n”/“N\_Folds” para validación, y el resto para entrenamiento. En un segundo escenario, de nuevo se

escoge aleatoriamente “n”/”N\_Folds” pero en el conjunto de entrenamiento previo para la parte de validación, y el conjunto previo de validación iría para el conjunto de entrenamiento. El “num\_ratios” es para conocer la longitud que tendrá realmente cada secuencia al entrar al modelo, es decir, cada secuencia tras el recorte realizado (con *start* y *end*), y tras realizar las diferencias de temperaturas medias cada *delta\_t* tras el recorte previo, para luego a cada resultado dividirlo por el *delta\_t* y así tener ratios en °C/s, que son las variables que realmente entran al modelo. Con ese “num\_ratios” junto con “n\_inputs”, que indica la dimensión de cada entrada al modelo (como son secuencias, es ratios introducidos x 1), y “n\_neurons”, que indica el número de células del modelo GRU, se tiene definido el modelo DL. Se introduce ratios, y no temperaturas medias al modelo, ya que con los ratios se introducen variables absolutas, y no relativas si fueran las temperaturas medias. Las temperaturas medias dependerán siempre de la temperatura que se le asigne a la estufa o a la nevera, pero dividiendo por un intervalo temporal, los ratios se convierten en variables que no dependan de las condiciones de contorno del calentamiento o del enfriamiento, ya que deben ser algo característico de la sal que se tenga independientemente de la muestra en cuestión. En esa hipótesis es lo que se basa este TFG para que funcione correctamente el modelo GRU a los intereses propuestos. Como se ve en la figura previa, se establece 400 células como una cifra estándar. De todas formas, se enfatiza que se varió el número de células, observando que los resultados del modelo, tanto en el aprendizaje como en el testeo, no variaba sustancialmente. Con el “batch\_size” igual a 1 se indica que el modelo, en cada *epoch*, entrena con todas las entradas del entrenamiento, y no solamente con parte de ellas, conocido este método como *batch gradient descent*, muy empleado cuando el número de entradas es bajo. Con el “n\_epochs” se define el número de iteraciones de aprendizaje a cada uno de los escenarios establecidos por el *cross validation* (en este caso 50 a cada uno, viendo que fue suficiente para la estabilización). El “test\_size” define el número de secuencias que se utiliza en el conjunto de datos de testeo, para que el modelo tras el aprendizaje pueda realizar las predicciones.

Para poder terminar el código, quedaría por definir el propio modelo GRU tras tener asignado los valores de “num\_ratios” y “n\_inputs” para la dimensión de entrada, y “n\_neurons” para el número de células del modelo GRU (véase Figura 3-18).

```
#Building and Compile the Model
model = keras.Sequential()
model.add(layers.GRU(n_neurons, input_shape=(num_ratios,n_inputs)))
model.add(layers.BatchNormalization())
model.add(layers.Dense(4,activation='softmax'))
print(model.summary())

model.compile(
    loss='sparse_categorical_crossentropy',
    optimizer='adam',
    metrics=["accuracy"]
)
```

Figura 3-18. Script que define el modelo DL (elaboración propia)

El número 4 de la Figura 3-18 significa que el modelo tiene 4 salidas, ya que con el “softmax” lo que hace el modelo DL es darle una probabilidad estimada a 0 (sin sal), a 1 (NaCl), a 2 (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y a 3 (NaNO<sub>3</sub>) a cada entrada introducida. La que tenga mayor probabilidad en cada entrada es la predicción en cuestión del modelo, cuantificando su desviación respecto a la salida real con las métricas “loss” y “accuracy”, métricas frecuentemente empleadas para estos tipos de modelos, tratando de mejorar las

métricas en cada *epoch* con un optimizador muy empleado conocido como “adam” durante el aprendizaje. Esto métricas y optimizador también se aprecia en la figura anterior.

En la Figura 3-19 se muestra cómo se ejecutaría el aprendizaje del modelo GRU, con todo lo indicado previamente, representando en las últimas líneas el guardado del “*loss*” y del “*accuracy*” en el conjunto de entrenamiento y en el de validación.

```
# Fitting the model
for i in range(N_Folds):
    fold = i
    x_train, y_train, x_val, y_val = cross_validation(train_and_val_dataset, fold)

    hist = model.fit(x_train, y_train, validation_data=(x_val, y_val), batch_size=batch_size, epochs=n_epochs)

    gru_train_loss = hist.history['loss']
    gru_val_loss = hist.history['val_loss']
    gru_train_accuracy = hist.history['accuracy']
    gru_val_accuracy = hist.history['val_accuracy']
```

**Figura 3-19. Script para ejecutar el aprendizaje del modelo DL (elaboración propia)**

Tras el aprendizaje, en la Figura 3-20 se indica cómo se testea el modelo aprendido en el conjunto de datos de testeo, mostrando la predicción más probable a cada entrada y su salida real correspondiente.

```
# Testing the model
for i in range(test_size):
    result = model.predict(tf.expand_dims(x_test[i], 0), steps=1)
    print("class predicted = ", np.where(np.asarray(result[0])==np.max(np.asarray(result[0]))))
    print("class real = ", y_test[i])
    print("all classes predicted = ", result)
```

**Figura 3-20. Script para aplicar el modelo DL aprendido al conjunto de datos de testeo (elaboración propia)**

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterización de las muestras

#### 4.1.1 Propiedades iniciales antes de contaminar con sales

La Tabla 4-1 recoge las principales propiedades físico-mecánicas de los materiales analizados. En ella se puede apreciar como el mortero sólo aparece una vez ya que se presentó el valor promedio teniendo en cuenta a ambos. Además, el mortero es el material que presenta una mayor porosidad, superior al 20% en lo que a porosidad accesible al agua y al mercurio se refiere y próxima al 20% en lo que respecta a la porosidad capilar. Entre los granitos empleados, Mondim presenta una porosidad en torno al 3%, mientras que los otros dos granitos presentan una porosidad muy baja en torno al 0,6%. Los tres granitos presentan casi todo su volumen poroso dentro del rango de poros con tamaño capilar, entre 0,1 y 100  $\mu\text{m}$ , ya que la porosidad capilar es similar o está muy próxima a la porosidad accesible al agua. Con respecto a la velocidad con la que estos materiales son capaces de absorber mediante este mecanismo, se aprecia que el mortero de cal seguido del granito Mondim son los materiales con un coeficiente capilar mucho mayor, es decir, presentan una mayor velocidad de absorción capilar por lo que presentan una mayor pendiente en el tramo inicial del proceso de absorción (Figura 4-1).

|                     | Parámetros                                                   | Mondim | Roriz  | Azul   | Mortero |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| Estructura Porosa   | Porosidad accesible al H <sub>2</sub> O (% v/v)              | 3,46   | 0,62   | 0,65   | 22,71   |
|                     | Porosidad accesible al Hg (% v/v)                            | 3,12   | 0,62   | 0,55   | 28,73   |
|                     | Porosidad Capilar (% v/v)                                    | 3,25   | 0,62   | 0,55   | 19,14   |
|                     | Coeficiente de Capilaridad ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ) | 0,033  | 0,003  | 0,003  | 0,296   |
|                     | Coeficiente de absorción del agua (vacío) (% w/w)            | 1,37   | 0,23   | 0,25   | 12,28   |
|                     | Coeficiente de absorción del agua (por capilaridad) (% w/w)  | 1,24   | 0,19   | 0,20   | 12,12   |
| Estructura Mecánica | Velocidad ultrasonidos eje x (m/s)                           | 2874,6 | 5238,0 | 5197,7 | 1154,6  |
|                     | Velocidad ultrasonidos eje y (m/s)                           | 3019,9 | 5245,0 | 4848,9 | 1087,1  |
|                     | Velocidad ultrasonidos eje z (m/s)                           | 2385,6 | 5050,5 | 4769,5 | 1276,9  |
|                     | dM (%)                                                       | 19,06  | 3,64   | 5,05   | 3,10    |
|                     | dm (%)                                                       | 4,93   | 0,13   | 6,94   | 5,77    |
|                     | Dureza superficial (Leeb, HLD)                               | 735    | 805    | 865    | 194     |
|                     | Resistencia a compresión (MPa)                               | 98,2   | 121,2  | 131,0  | 10,7    |

Tabla 4-1. Principales propiedades físico-mecánicas de los materiales analizados

Las porosimetrías de los diferentes materiales recogidas en la Figura 4-2 muestran que:

- 1) El mortero de cal presenta un rango de poros entre 0,1 y 10  $\mu\text{m}$ , con un mayor volumen de poros con diámetro de acceso en torno a 1  $\mu\text{m}$ .
- 2) Mondim presenta un amplio abanico de poros en todo el rango analizado, aunque el 88% se encuentra dentro del rango capilar. Únicamente 4% se corresponde con poros de tamaño nanométrico no accesible al agua, mientras que el 8% restante se corresponde con poros con un tamaño de acceso superior a las 100  $\mu\text{m}$ .
- 3) Roriz y Azul Alpendorada presentan distribuciones porosimétricas similares, diferenciándose en que Roriz presenta un mayor volumen en el rango de poros con tamaño de acceso superior a 100  $\mu\text{m}$  e inferior a 0,03  $\mu\text{m}$ , mientras que Azul presenta un mayor volumen en el rango entre 0,1-1  $\mu\text{m}$ .

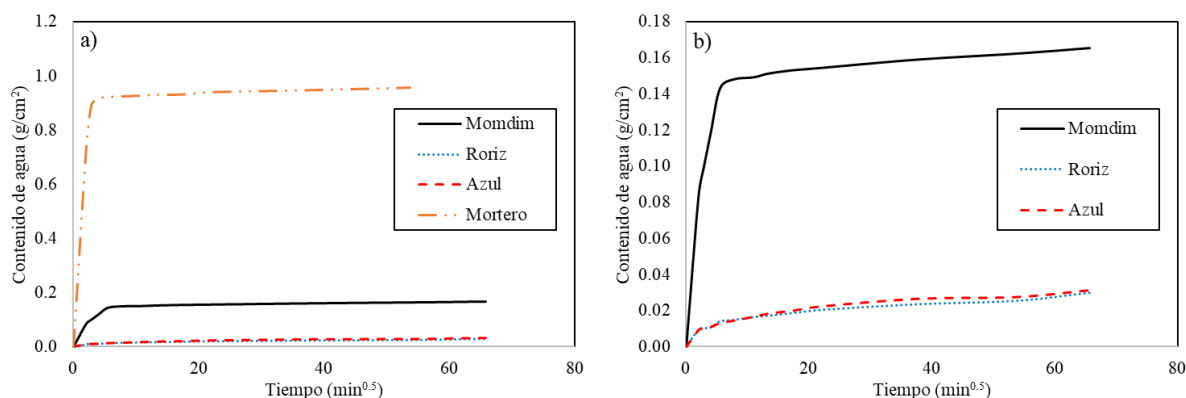


**Figura 4-1. a) Cinética de absorción capilar de los materiales evaluados. b) A la derecha se muestra en detalle la cinética de absorción de los tres granitos (elaboración propia)**

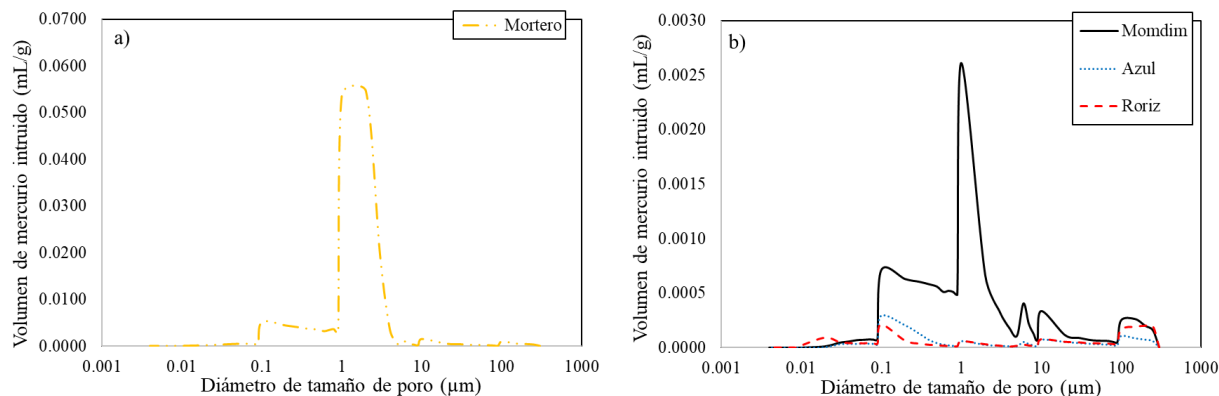


**Figura 4-2. a) Distribución del tamaño de poros accesible al mercurio para el mortero de cal, y, b), los granitos analizados (elaboración propia)**

Entre los materiales evaluados, los que presentan una mayor velocidad de transmisión de los ultrasonidos son los granitos Roriz y Azul de Alpendorada. Este hecho es indicativo de que ambos materiales presentan un mayor esqueleto mecánicamente útil y por tanto un menor volumen de espacios vacíos (es decir poros y fisuras) que puedan llegar a amortiguar las ondas. Por el contrario, el material con mayor porosidad, es decir el mortero, es el material que presenta una menor velocidad de transmisión.

El grado de anisotropía de los materiales evaluados es superior en el granito Mondim, siendo menor en los granitos Azul y Roriz y el mortero de cal. Este hecho es indicativo de que estos dos últimos granitos presentan una mayor durabilidad frente a la acción de agentes externos.

Con respecto a la dureza superficial se aprecia que los materiales con mayor dureza son los granitos Azul y Roriz. Este hecho es lógico teniendo en cuenta que los granitos presentan una mayor dureza que los morteros y, que a menor tamaño de grano se espera que el tamaño y número de espacios vacíos sea menor (es decir menor porosidad y poros más pequeños), lo que implica una mayor dureza. Teniendo en cuenta todas estas propiedades (porosidad, ultrasonidos y dureza superficial) y siguiendo la expresión propuesta por Aoki, se aprecia que los granitos que presentan una mayor resistencia a compresión son aquellos que presentan menor porosidad, mayor velocidad de transmisión de los ultrasonidos y mayor dureza superficial, que en este caso se produce en los granitos de grano fino como son Azul y Roriz.

#### 4.1.2 Propiedades después de contaminar con sales

Tras el proceso de contaminación por sales, el peso de las muestras se incrementó en más de un gramo (Tabla 4-2), siendo este incremento superior en los materiales más porosos como son Mondim y el Mortero. En los otros dos granitos, los incrementos fueron similares. Hecho lógico si se tiene en cuenta que la porosidad de ambos materiales era similar. Los análisis obtenidos por cromatografía iónica confirman la presencia de los principales aniones con los que se contaminaron cada una de las muestras.

| Material/Sal     | NaCl | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | NaNO <sub>3</sub> |
|------------------|------|---------------------------------|-------------------|
| Mondim           | 1,57 | 1,71                            | 1,81              |
| Roriz            | 1,01 | 1,10                            | 1,02              |
| Azul Alpendorada | 1,09 | 1,09                            | 1,05              |
| Mortero          | 1,82 | 2,12                            | 2,17              |

Tabla 4-2. Diferencia de pesos antes y después de ser contaminados por su respectiva sal

Tras los ciclos de contaminación por sales, tanto la velocidad de transmisión de los ultrasonidos como la anisotropía disminuyeron indicativo del relleno de gran parte de los poros del material (Tabla 4-3).

|         | Inicial sin sal |                |                |       |       |
|---------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|
|         | V <sub>x</sub>  | V <sub>y</sub> | V <sub>z</sub> | dM(%) | dm(%) |
| Mondim  | 2874,6          | 3019,9         | 2385,6         | 19,06 | 4,93  |
| Roriz   | 5238,0          | 5245,0         | 5050,5         | 3,64  | 0,13  |
| Azul    | 5197,7          | 4848,9         | 4769,5         | 5,05  | 6,94  |
| Mortero | 1154,6          | 1087,1         | 1276,9         | 3,10  | 5,77  |
|         | Final con sal   |                |                |       |       |
|         | V <sub>x</sub>  | V <sub>y</sub> | V <sub>z</sub> | dM(%) | dm(%) |
| Mondim  | 2942,7          | 2801,2         | 2534,4         | 11,75 | 4,93  |
| Roriz   | 4897,2          | 4896,4         | 4847,2         | 1,01  | 0,02  |
| Azul    | 4914,5          | 4839,3         | 4741,9         | 2,77  | 1,54  |
| Mortero | 1231,9          | 998,2          | 1367,5         | 0,86  | 4,22  |

Tabla 4-3. Diferencia de velocidad de transmisión de ultrasonidos antes y después de ser contaminados por sales

## 4.2 Análisis termográfico

### 4.2.1 Comportamiento térmico de las sales

La Figura 4-4 y la Figura 4-4 muestran el enfriamiento de las tres sales empleadas en este estudio, mostrando en detalle los primeros momentos del enfriamiento y los últimos (Figura 4-3), y sus curvas (Figura 4-4). Los resultados obtenidos muestran que:

1) Pese a permanecer el mismo tiempo en la estufa, el NaCl no alcanza la misma temperatura que las dos otras sales.

2) Durante los primeros 1500 segundos el orden de menor a mayor temperatura fue  $\text{NaCl} < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{NaNO}_3$ , siendo el ratio de enfriamiento mayor para el  $\text{NaNO}_3$  y el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0,0094 y 0,0085 °C/s respectivamente). Este comportamiento guarda relación con la mayor solubilidad de cada una de las sales analizadas a estos rangos de temperatura (Figura 2-6), de manera que las más solubles, en este caso el NaCl, tienen mayor poder refrigerante.

3) En la etapa final del proceso la sal más fría es el  $\text{NaNO}_3$  y la que presenta una mayor temperatura es el NaCl, aunque las diferencias son muy bajas.

En resumen, los resultados obtenidos mostraron que tanto el nitrato de sodio como el sulfato de sodio, ambas sales menos solubles que el cloruro, alcanzan mayores temperaturas en procesos de calentamiento. Sin embargo, en los minutos finales antes de alcanzar la temperatura ambiente, se ha podido observar que el cloruro de sodio conserva más calor, debido seguramente a su mayor estabilidad térmica.

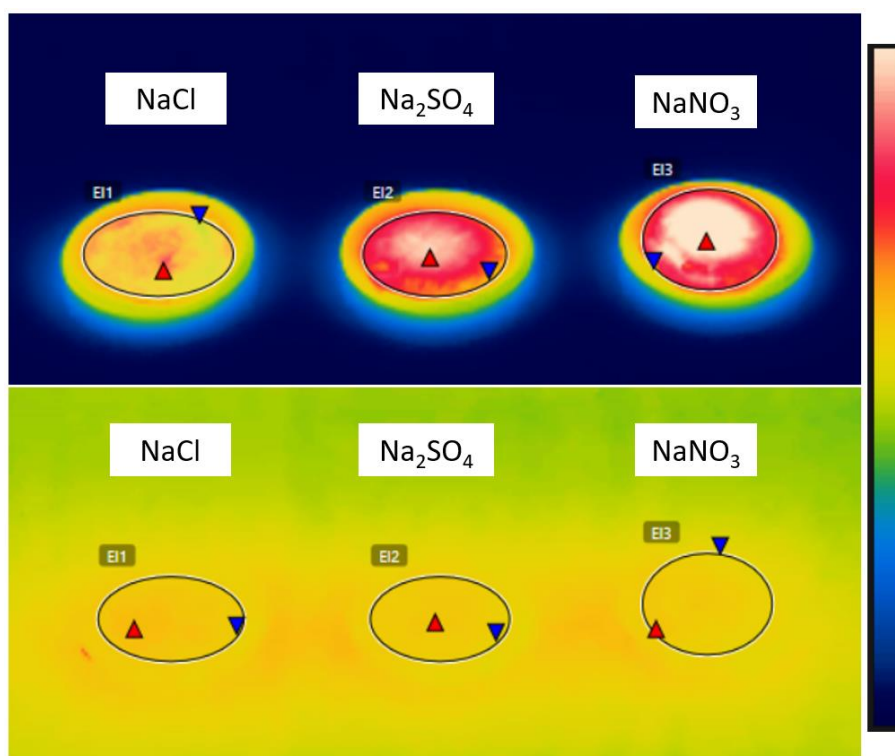


Figura 4-3. La imagen superior muestra una toma termográfica de las sales los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

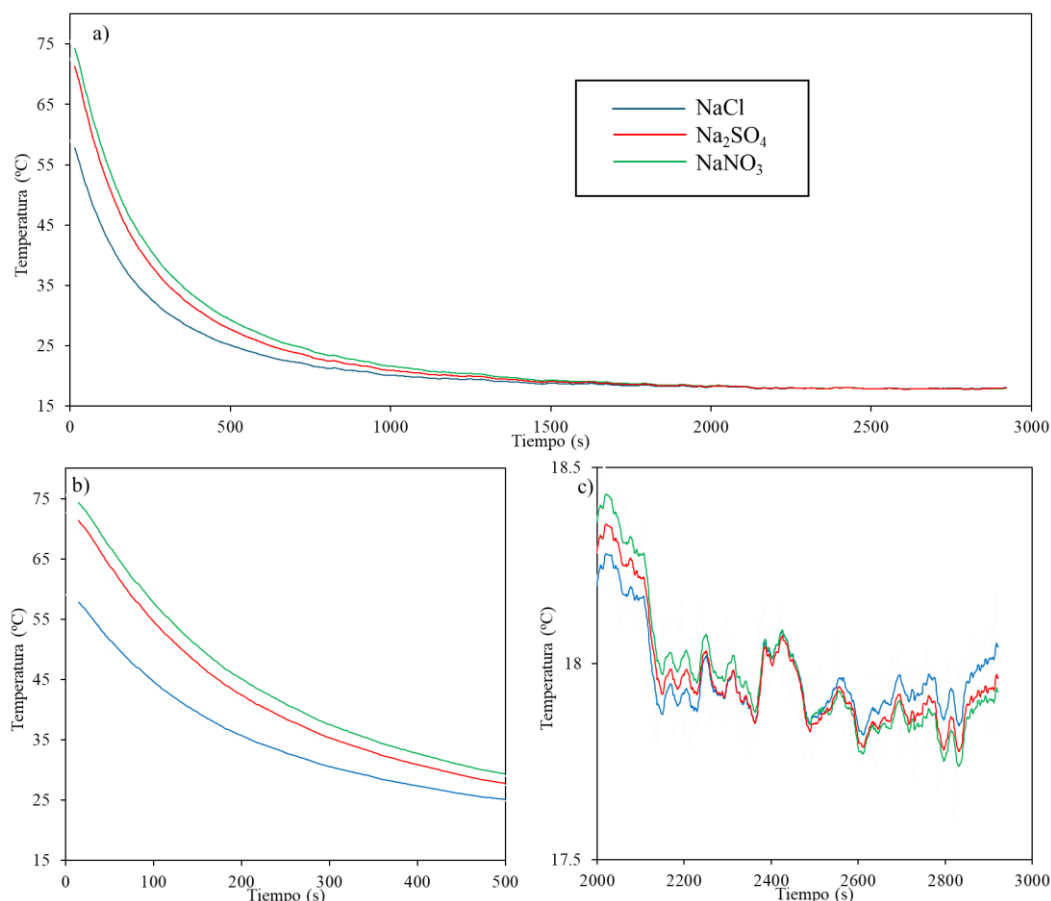


**Figura 4-4. a) Curva de enfriamiento de las sales durante todo el proceso. b) Se muestra en detalle el enfriamiento durante los primeros segundos y, c), también durante los últimos (elaboración propia)**

#### 4.2.2 Ensayo de enfriamiento

Este ensayo consiste en calentar las muestras para posteriormente obtener las curvas de enfriamiento de estas. Para analizar los resultados, se observaron diferentes tendencias, siendo las más relevantes las mostradas por las muestras al inicio y al final de cada ensayo. Para llevarlo a cabo, se siguieron las pautas mencionadas en el apartado 3.3, obteniendo los siguientes resultados:

- En el granito Mondim, Figura 4-5 y Figura 4-6, a diferencia de lo que cabría esperar por el mayor poder refrigerante del NaCl, la muestra que inicialmente muestra una mayor temperatura es la que presenta esta sal seguida de la muestra de referencia (sin sal). Se aprecia además que la muestra sin sal tiende a enfriarse a mayor velocidad, mostrando una mayor pendiente en este tramo inicial de la gráfica, que hace que a los 400 segundos esta muestra tenga una temperatura inferior que la contaminada con sulfato y a los 1000 segundos tenga una temperatura inferior a la muestra contaminada con nitrato.

En el tramo final del ensayo, las diferencias de temperatura fueron inferiores al medio grado, siendo ligeramente las muestras más calientes las del nitrato seguidas de las del sulfato.

- En el granito Azul Alpendorada, Figura 4-7 y Figura 4-8, la muestra con nitrato alcanzó mayores temperaturas que la de referencia y que la del sulfato. En este caso se aprecia que la presencia de cloruro tiende a enfriar la muestra.

Durante el enfriamiento, nuevamente se aprecia una mayor velocidad en la muestra sin sal pasando a estar más fría que la que contenía sulfato a partir de los 900 segundos.

Al finalizar el ensayo, la muestra que presentaba una mayor temperatura fue la de sulfato y nitrato.

- En el granito Roriz, Figura 4-9 y Figura 4-10, la muestra de referencia, la de sulfato y la de nitrato presentaban temperaturas iniciales muy próximas. A partir de los 900 segundos, nuevamente la muestra

de referencia comenzó a situarse con una temperatura inferior a las otras dos hasta que al finalizar el ensayo la muestra de roca más fría era esta.

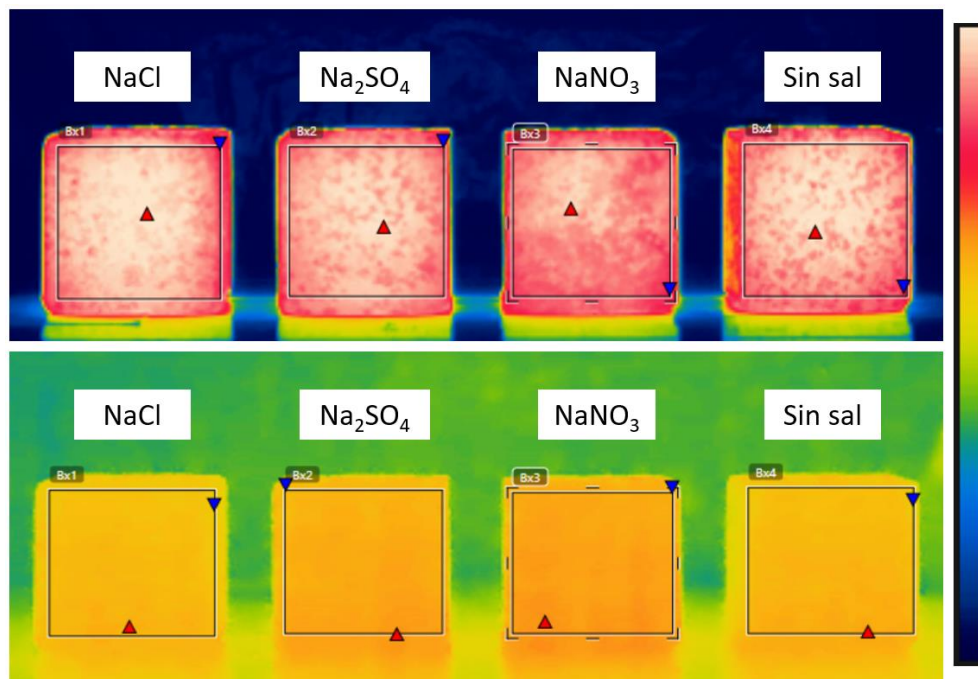


**Figura 4-5.** La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Mondim los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

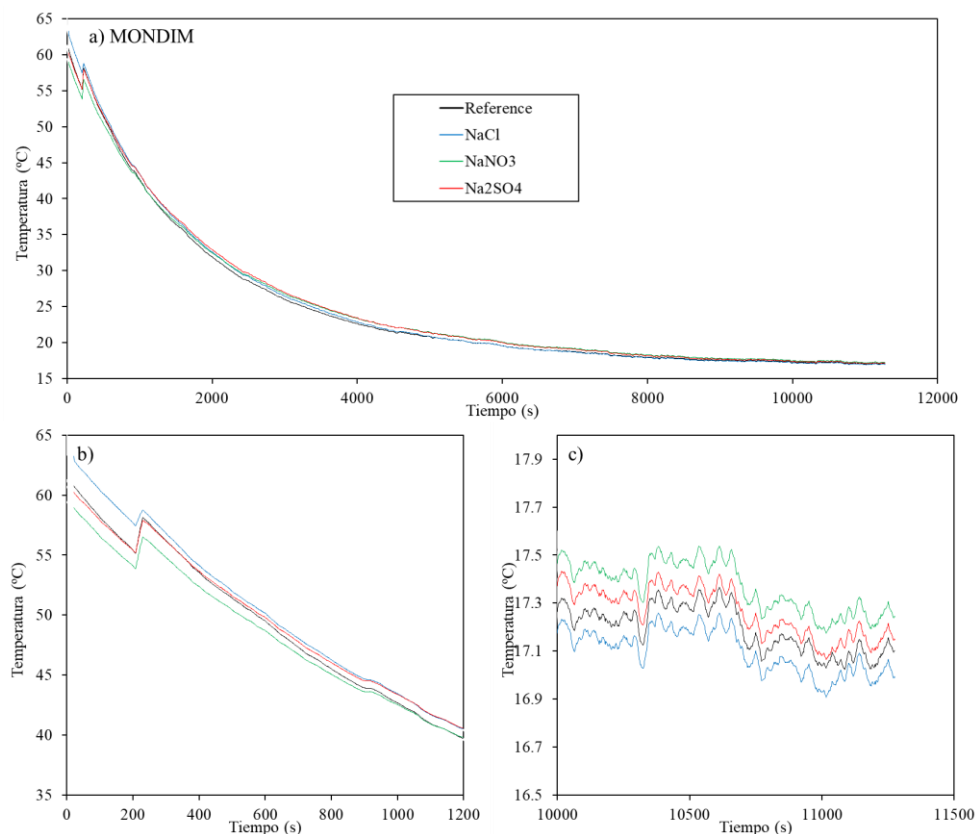


**Figura 4-6.** Ciclo de enfriamiento del granito Mondim según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

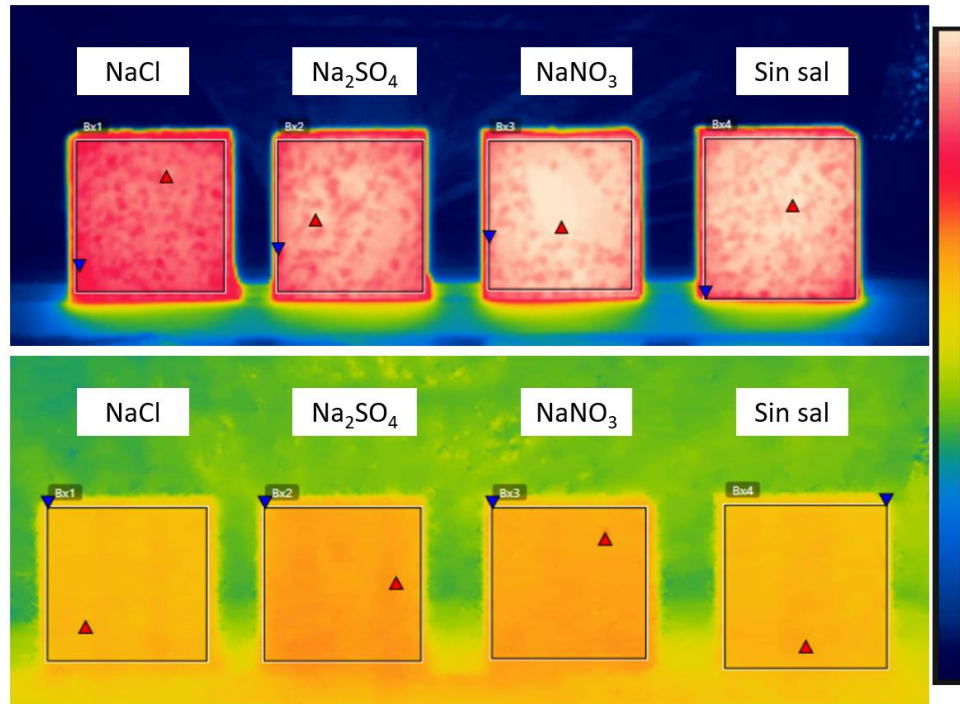


**Figura 4-7.** La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Azul Alpendorada los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

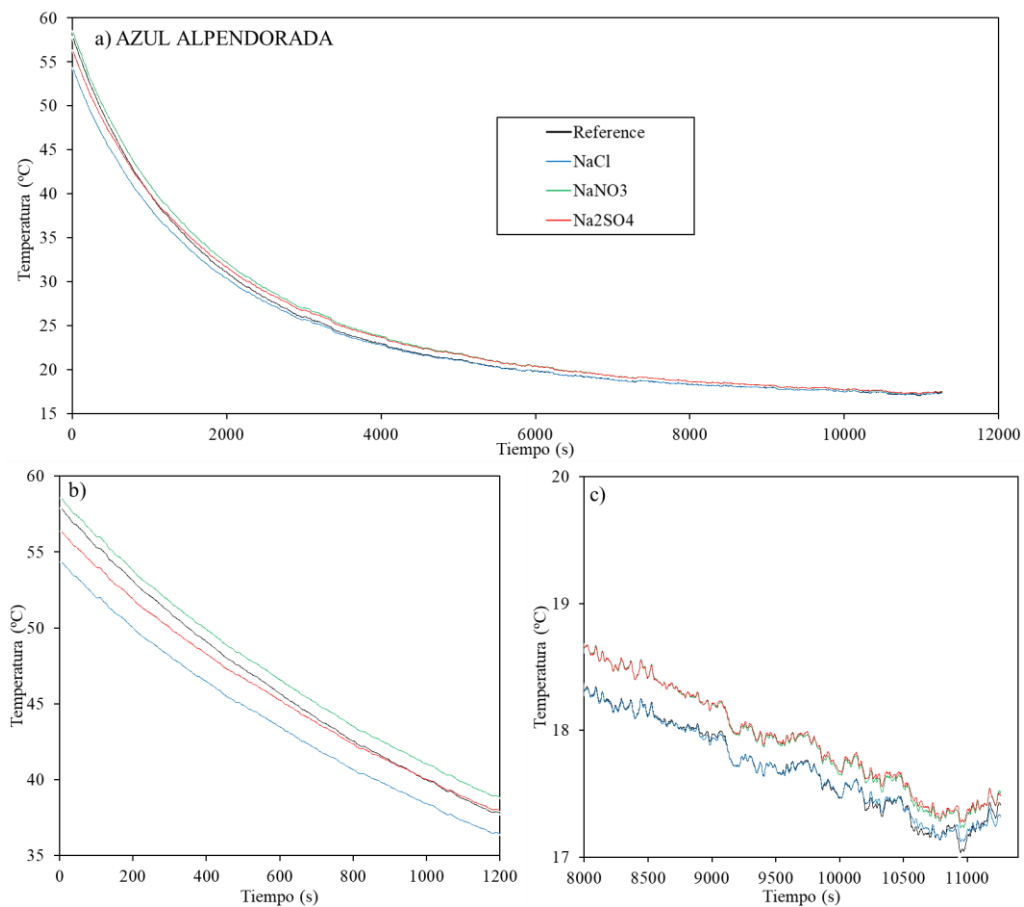


**Figura 4-8.** Ciclo de enfriamiento del granito Azul Alpendorada según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

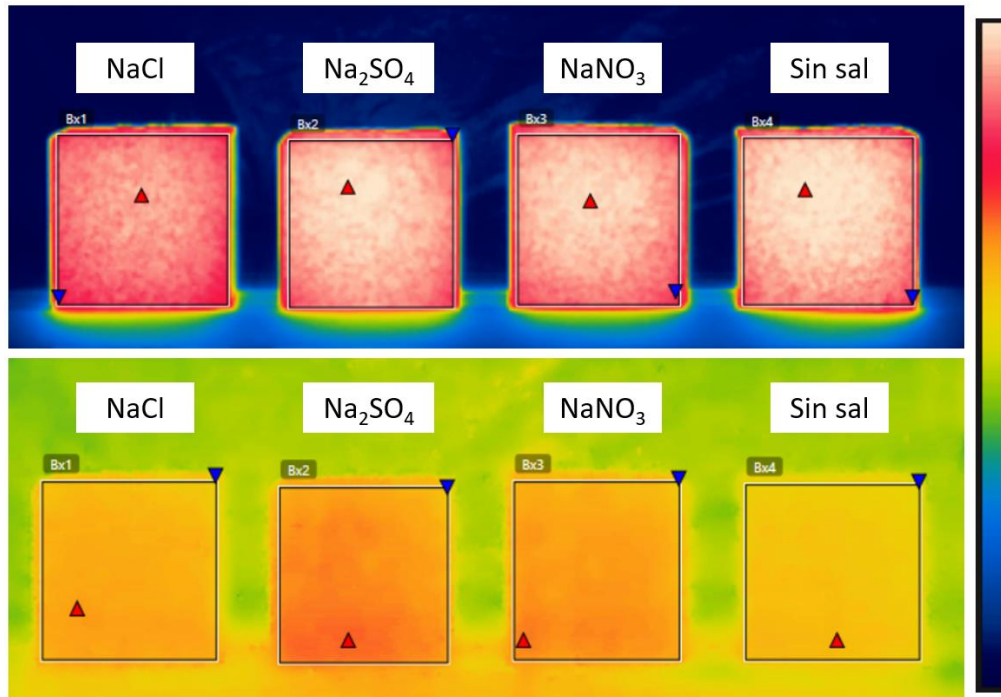


Figura 4-9. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Roriz los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

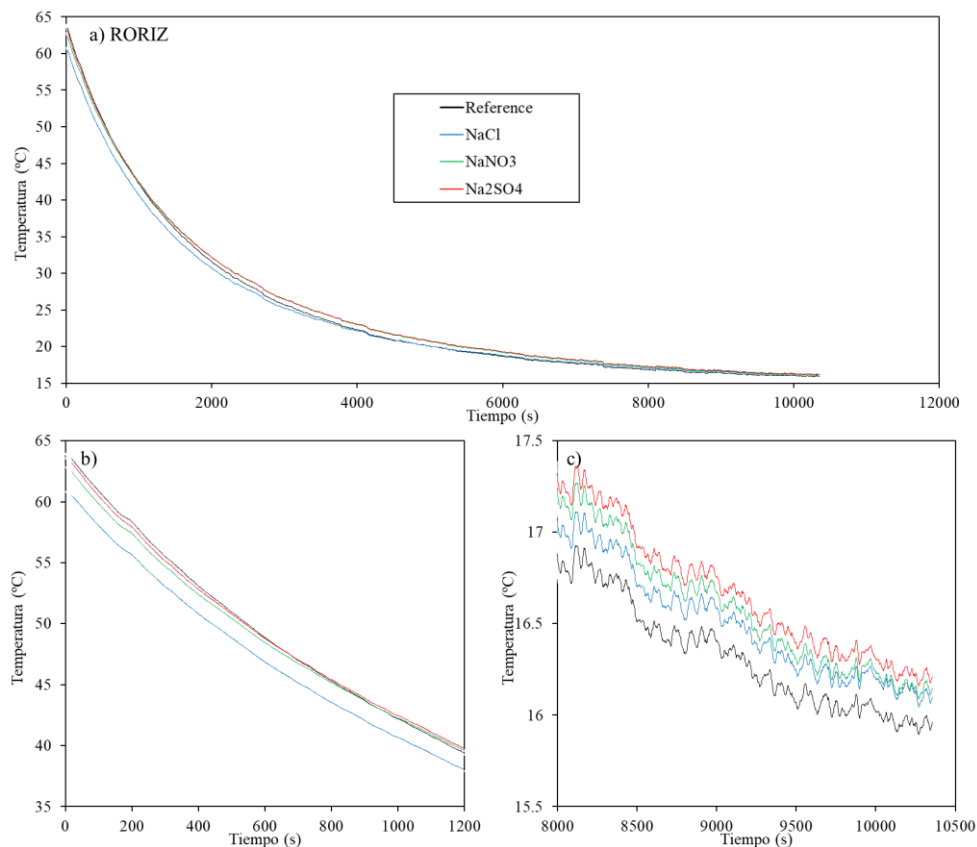


Figura 4-10. Ciclo de enfriamiento del granito Roriz según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

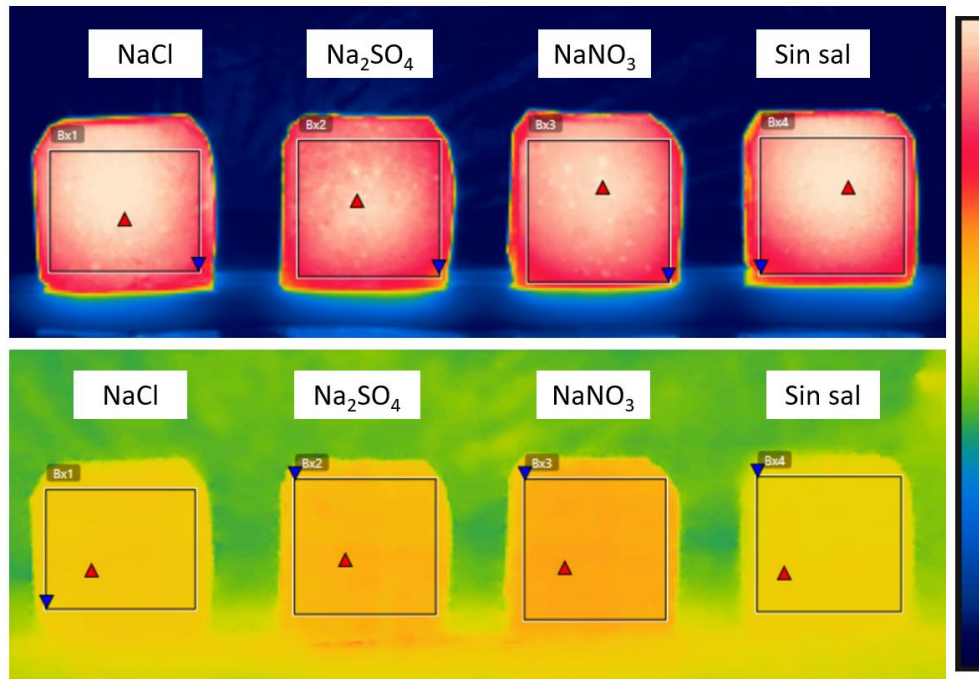


Figura 4-11. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 1 los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

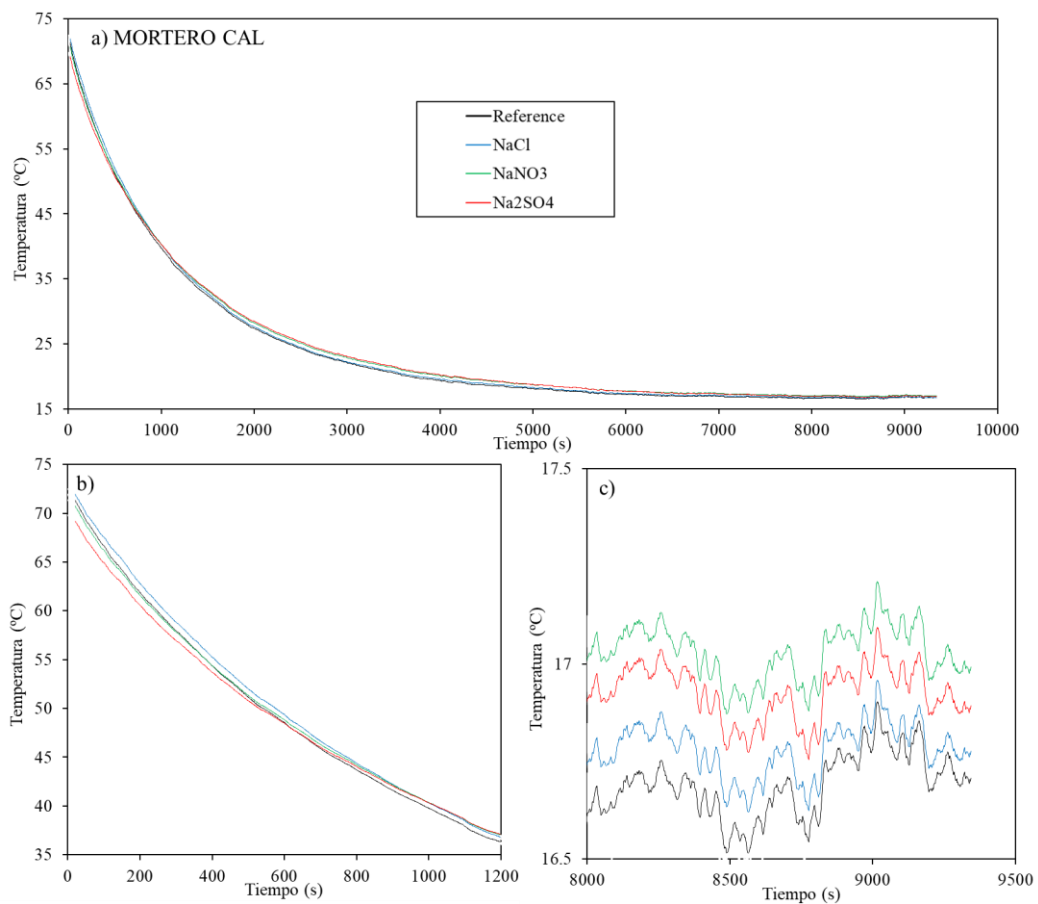


Figura 4-12. Ciclo de enfriamiento del mortero de cal 1 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

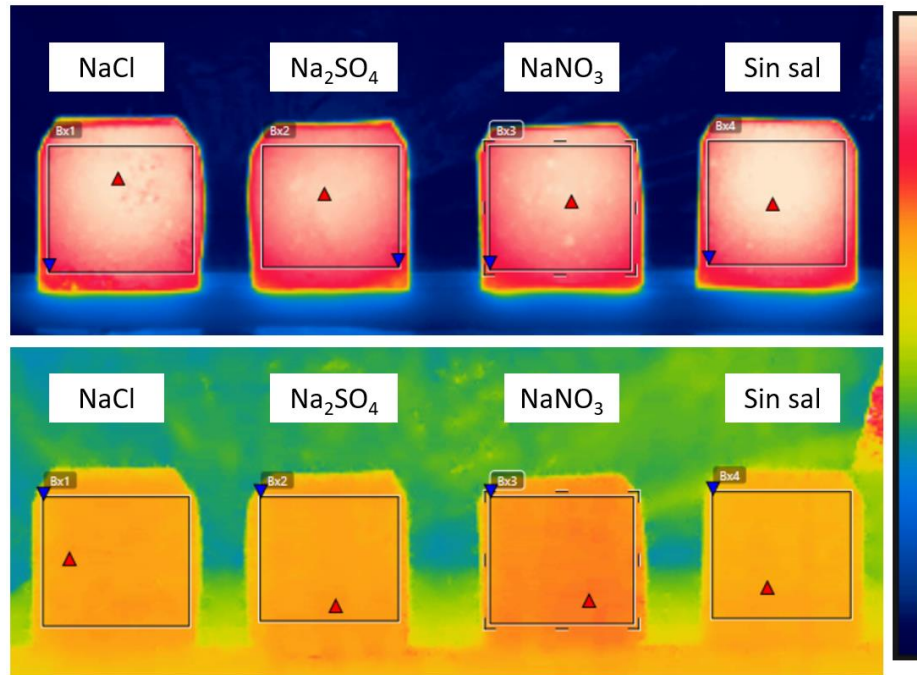


Figura 4-13. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 2 los primeros minutos de enfriamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

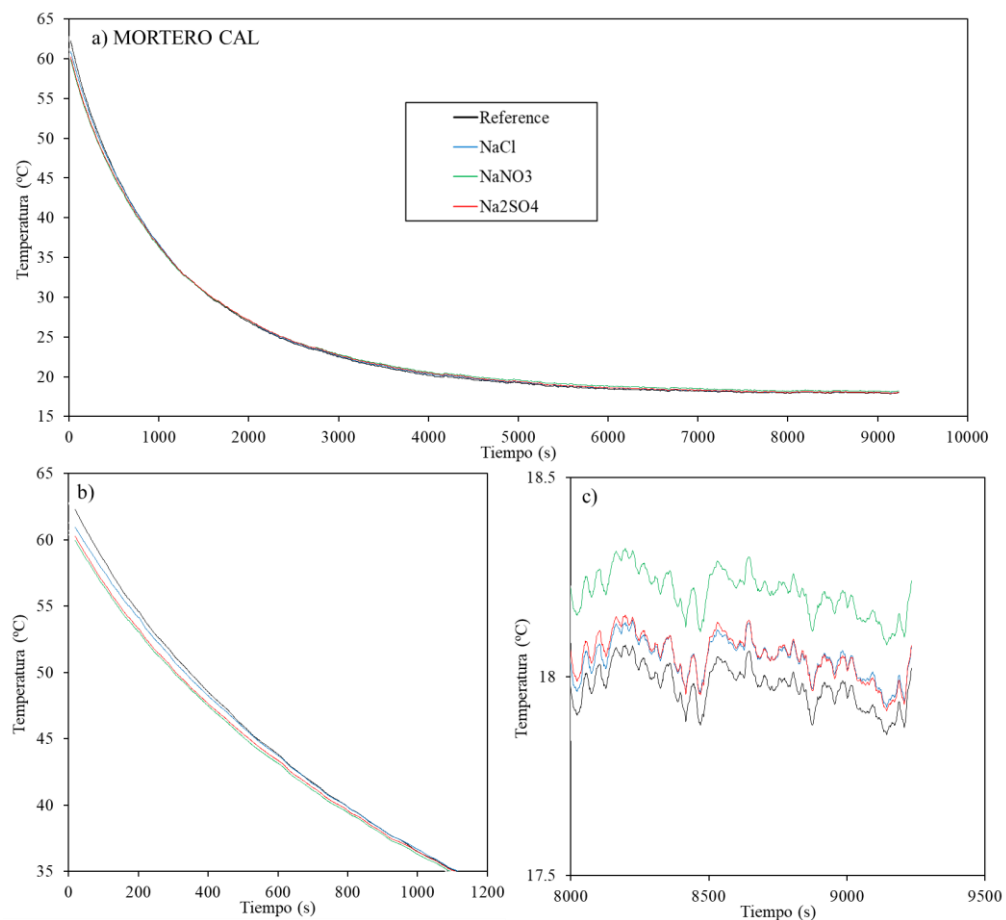


Figura 4-14. Ciclo de enfriamiento del mortero de cal 2 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

- En los morteros de cal, Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14, las diferencias fueron muy bajas, a pesar de que fueron los materiales que presentaban un mayor contenido de sales. Si que se aprecia nuevamente como la velocidad de enfriamiento del mortero sin sal es ligeramente superior a la de los morteros con sales.

En la Tabla 4-4 se muestra un resumen de las principales tendencias encontradas tanto en los instantes iniciales como en los finales.

| Muestra   | Primeros momentos                                                    | Momentos finales                                                     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| MONDIM    | $\text{Cl}^- > \text{Referencia} = \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Referencia} > \text{Cl}^-$ |
| AZUL      | $\text{NO}_3^- > \text{Referencia} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ | $\text{NO}_3^- = \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- = \text{Referencia}$ |
| RORIZ     | $\text{Referencia} = \text{SO}_4^{2-} = \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Referencia}$ |
| MORTERO 1 | $\text{Cl}^- > \text{Referencia} = \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Referencia}$ |
| MORTERO 2 | $\text{Referencia} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{NO}_3^-$ | $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{Cl}^- > \text{Referencia}$ |

**Tabla 4-4. Resumen comportamiento de las temperaturas de las muestras según el tipo de sal con el que han sido contaminadas para el ensayo de enfriamiento**

#### 4.2.3 Ensayo de calentamiento

Este ensayo consiste en enfriar las muestras para posteriormente obtener las curvas de calentamiento de estas. Para analizar los resultados se observaron diferentes tendencias, siendo las más relevantes las mostradas por las muestras al inicio y al final de cada ensayo. Para llevarlo a cabo, se siguieron las pautas mencionadas en el apartado 3.3, obteniendo los siguientes resultados:

- En el granito Mondim, Figura 4-15 y Figura 4-16, las muestras que presentaron inicialmente un calentamiento más rápido fueron las de cloruro y nitrato. Al finalizar el ensayo, las temperaturas fueron similares encontrándose diferencias menores del medio grado entre las muestras.

- En el granito Azul, Figura 4-17 y Figura 4-18, inicialmente las muestras con mayor temperatura fueron las de referencia y nitrato, y la de menor temperatura fue la de cloruro. Sin embargo, esta última muestra presenta una velocidad de calentamiento superior a las otras ocasionando que a los 200 segundos alcance una temperatura superior a la del sulfato, y a partir de los 800 segundos alcance la mayor de las temperaturas analizadas.

Al finalizar el ensayo, momento en el que se alcanza la temperatura ambiente, los resultados obtenidos fueron similares a los obtenidos en el anterior ensayo realizado en este granito, nuevamente la temperatura de la muestra de referencia y de cloruro es similar, al igual que las muestras de sulfato y nitrato.

- En el granito Roriz, Figura 4-19 y Figura 4-20, las muestras que mostraron inicialmente una mayor velocidad de calentamiento fueron las que contenían cloruro y la que no tenía sal, produciéndose un solapamiento de las curvas a partir de los 4000 segundos (momento en el cual casi se alcanzó la temperatura ambiente). El comportamiento de la muestra de nitrato y sulfato fue similar.

- En las muestras de mortero de cal, Figura 4-21, Figura 4-22, Figura 4-23 y Figura 4-24, todas las muestras conservan la temperatura de manera similar tanto al inicio de la curva de calentamiento como al final de esta. Sin embargo, se puede observar que la muestra de NaCl tiende a calentarse más rápido.

El motivo por el cual el cloruro de sodio se calienta más rápido en todas las muestras de materiales analizados podría estar relacionado con la higroscopicidad de esta sal, la cual tiende a absorber la humedad ambiental que está a mayor temperatura que la muestra, lo que favorece su rápido calentamiento.

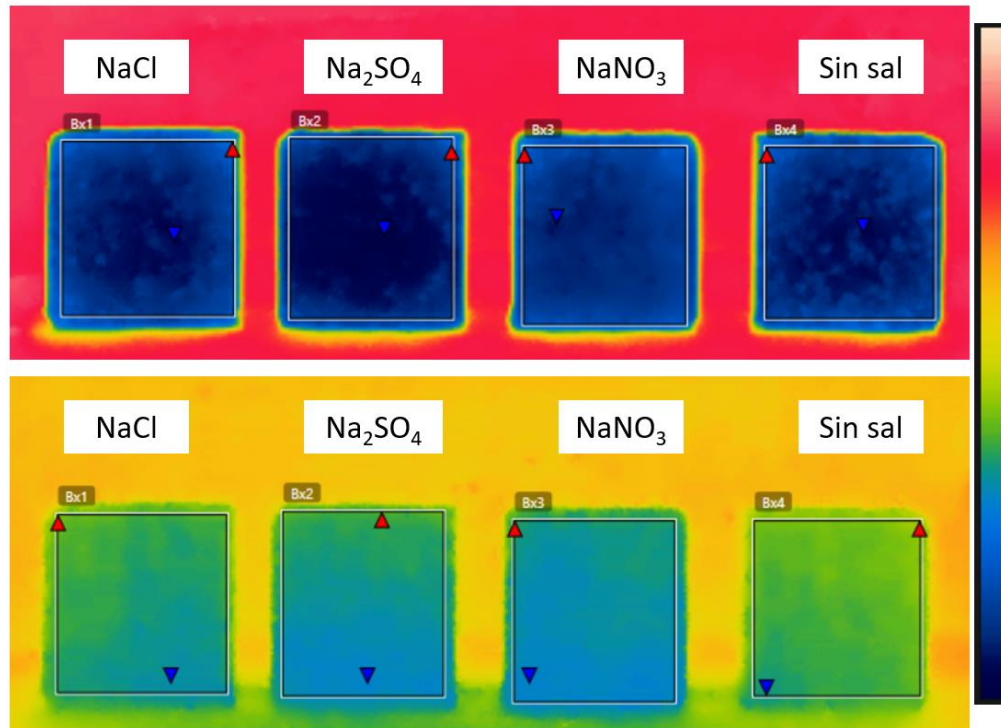


Figura 4-15. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Mondim los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

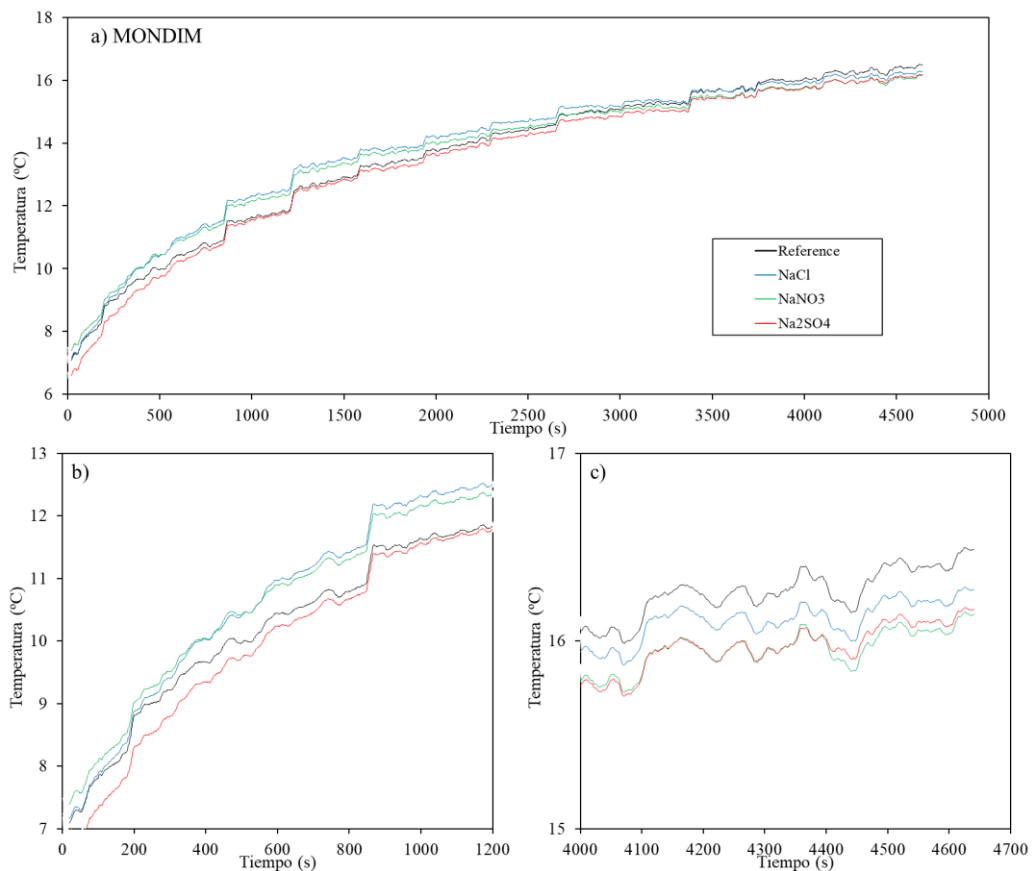


Figura 4-16. Ciclo de calentamiento del granito Mondim según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

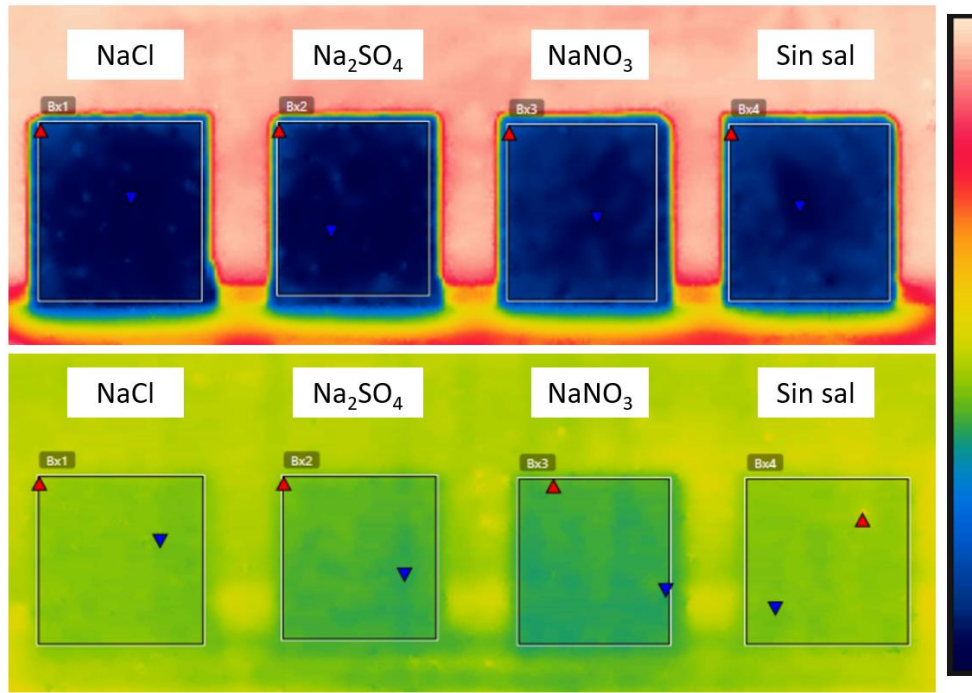


**Figura 4-17.** La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Azul Alpendorada los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

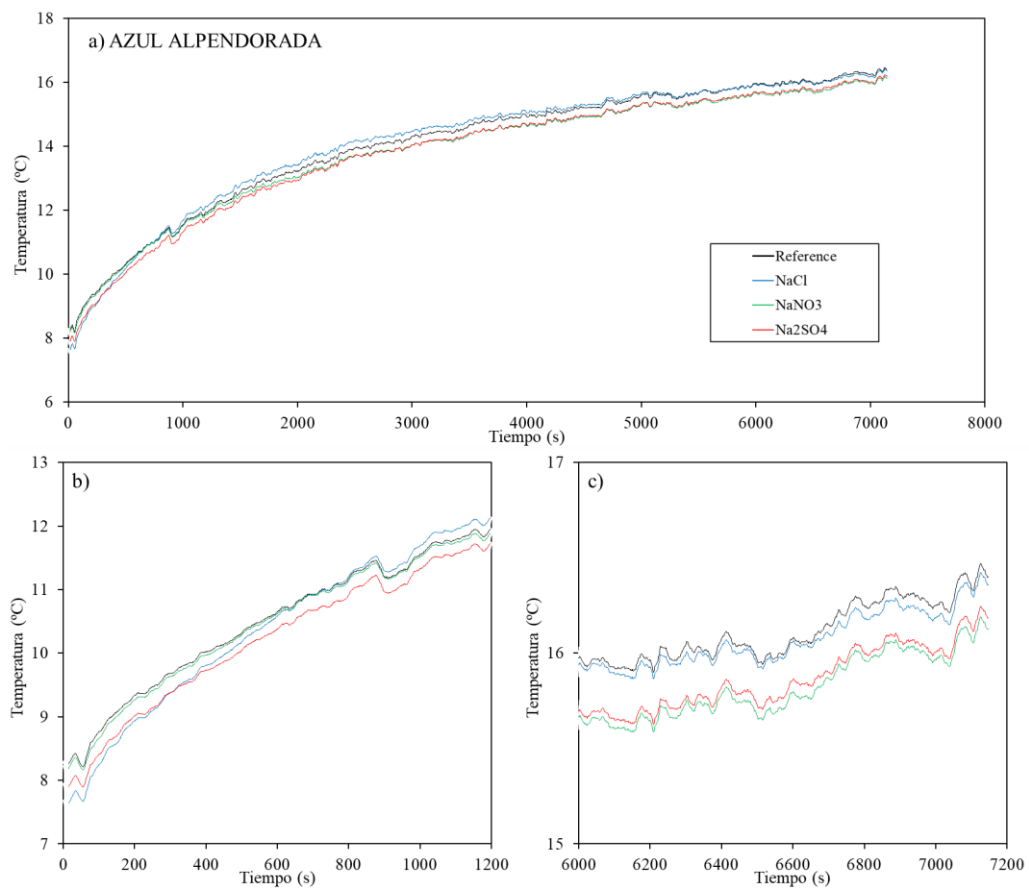


**Figura 4-18.** Ciclo de calentamiento del granito Azul Alpendorada según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

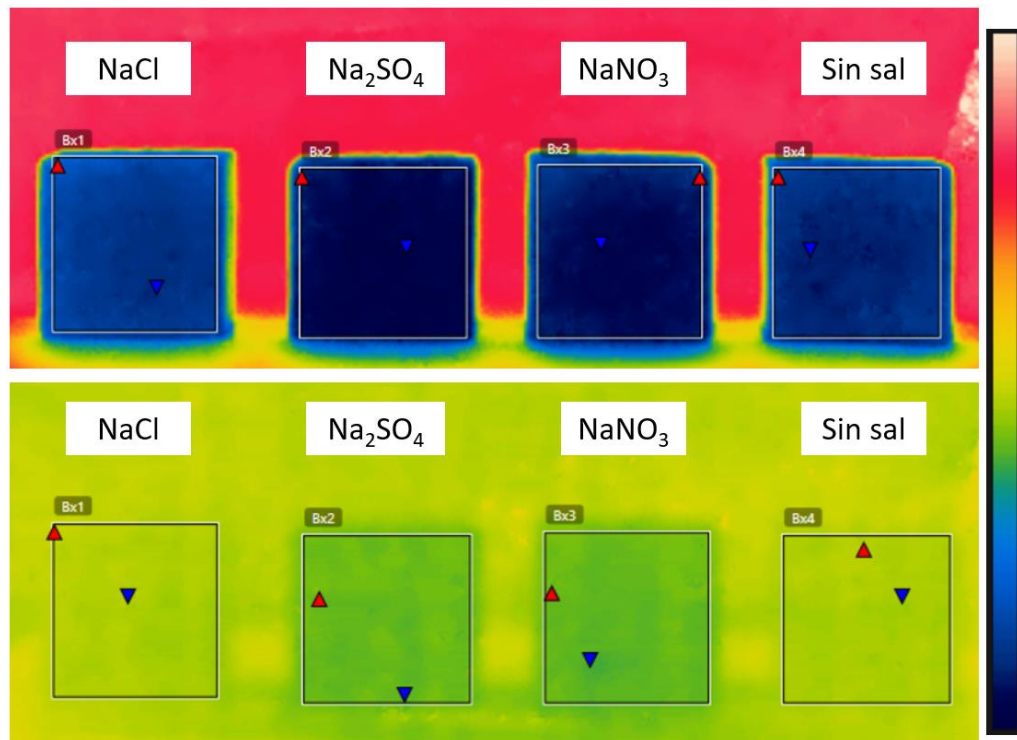


Figura 4-19. La imagen superior muestra una toma termográfica del granito Roriz los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

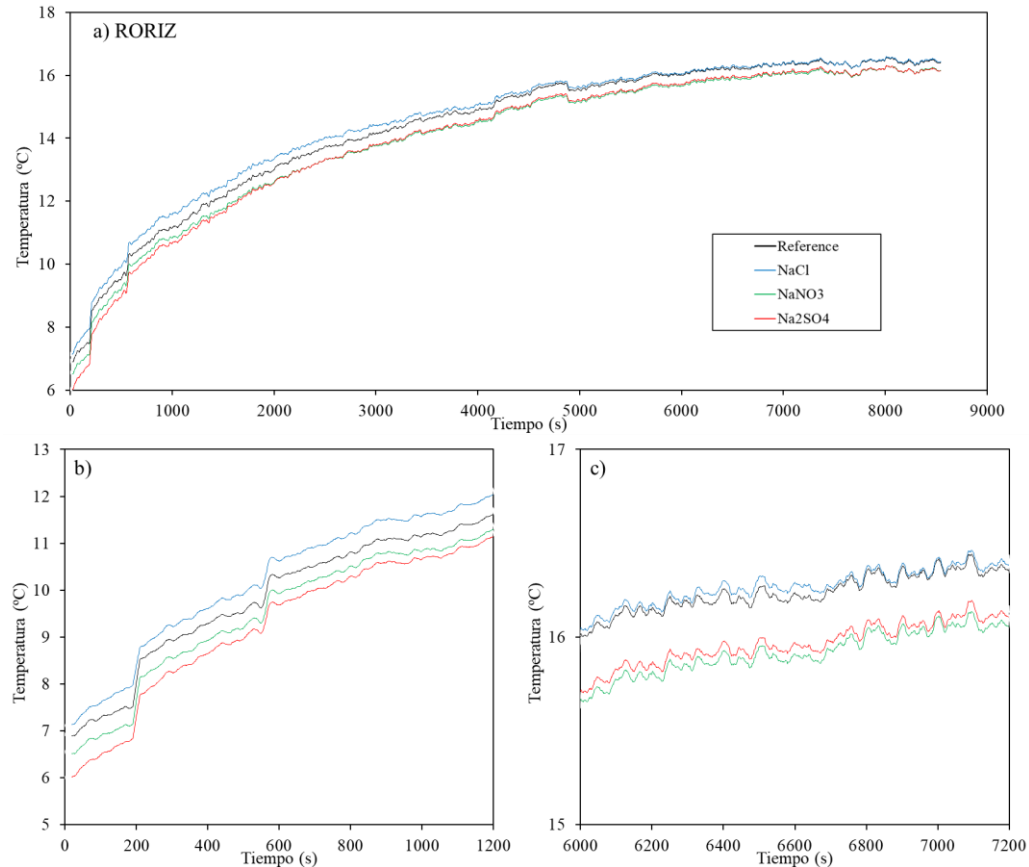


Figura 4-20. Ciclo de calentamiento del granito Roriz según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

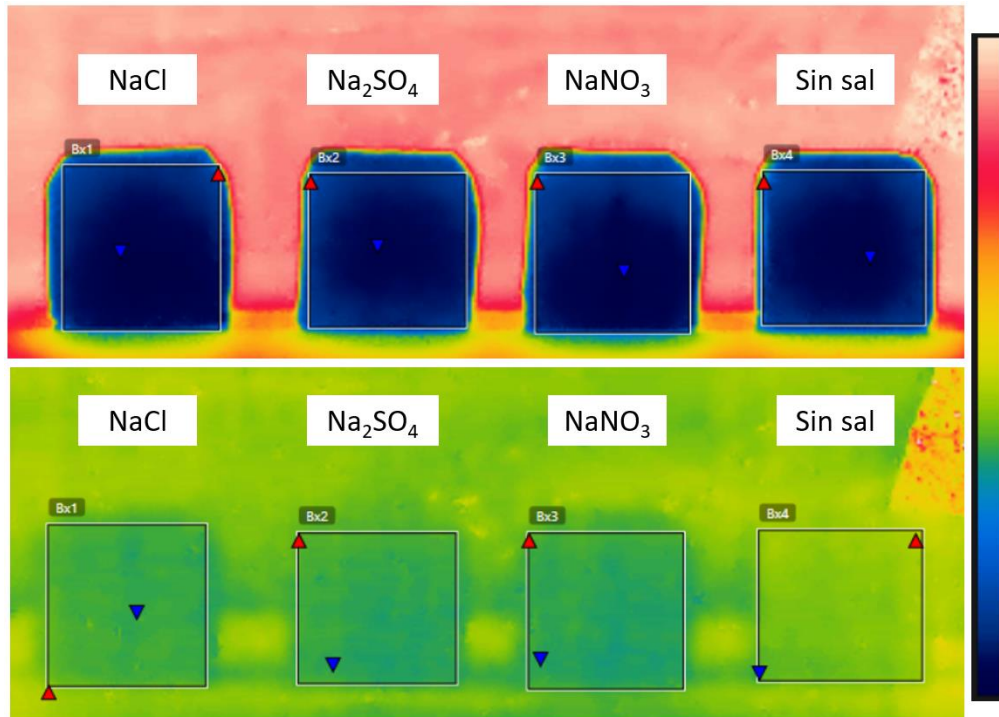


**Figura 4-21.** La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 1 los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

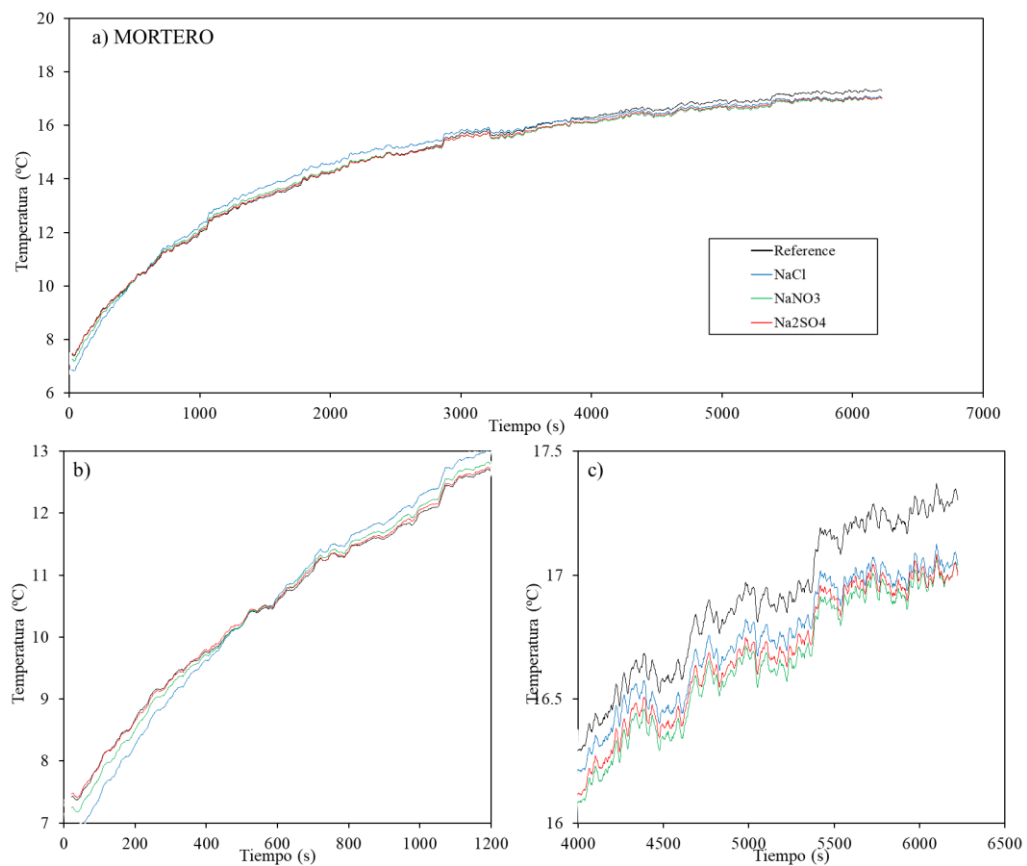


**Figura 4-22.** Ciclo de calentamiento del mortero de cal 1 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

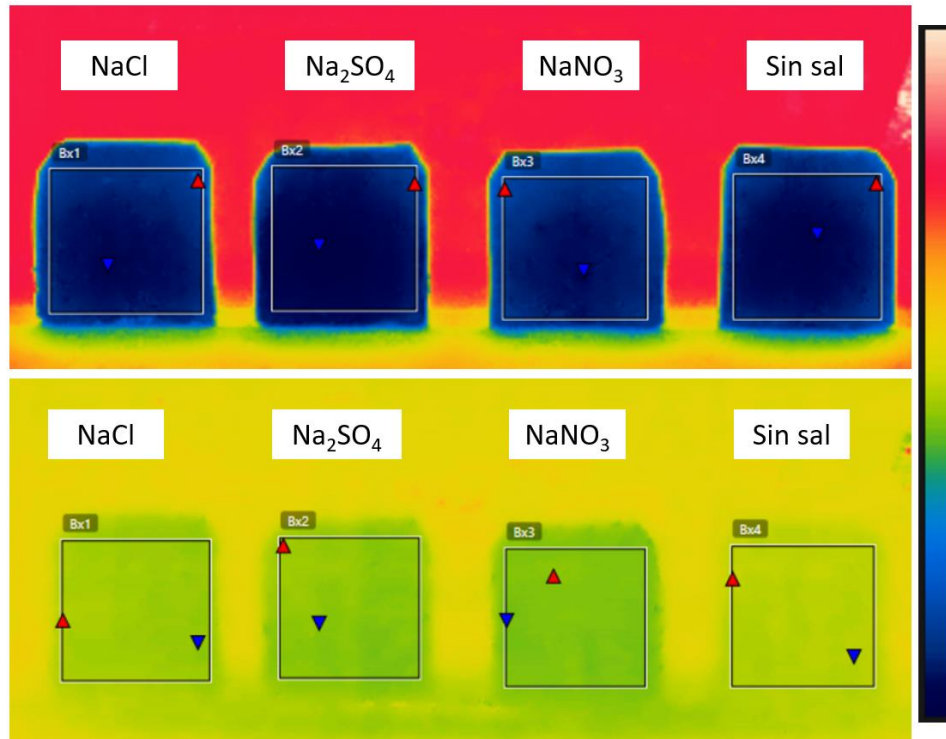


Figura 4-23. La imagen superior muestra una toma termográfica del mortero de cal 2 los primeros minutos de calentamiento, mientras que la inferior los últimos minutos. En la derecha se observa una paleta de colores según la temperatura, desde blanco a azul de mayor a menor temperatura respectivamente (elaboración propia)

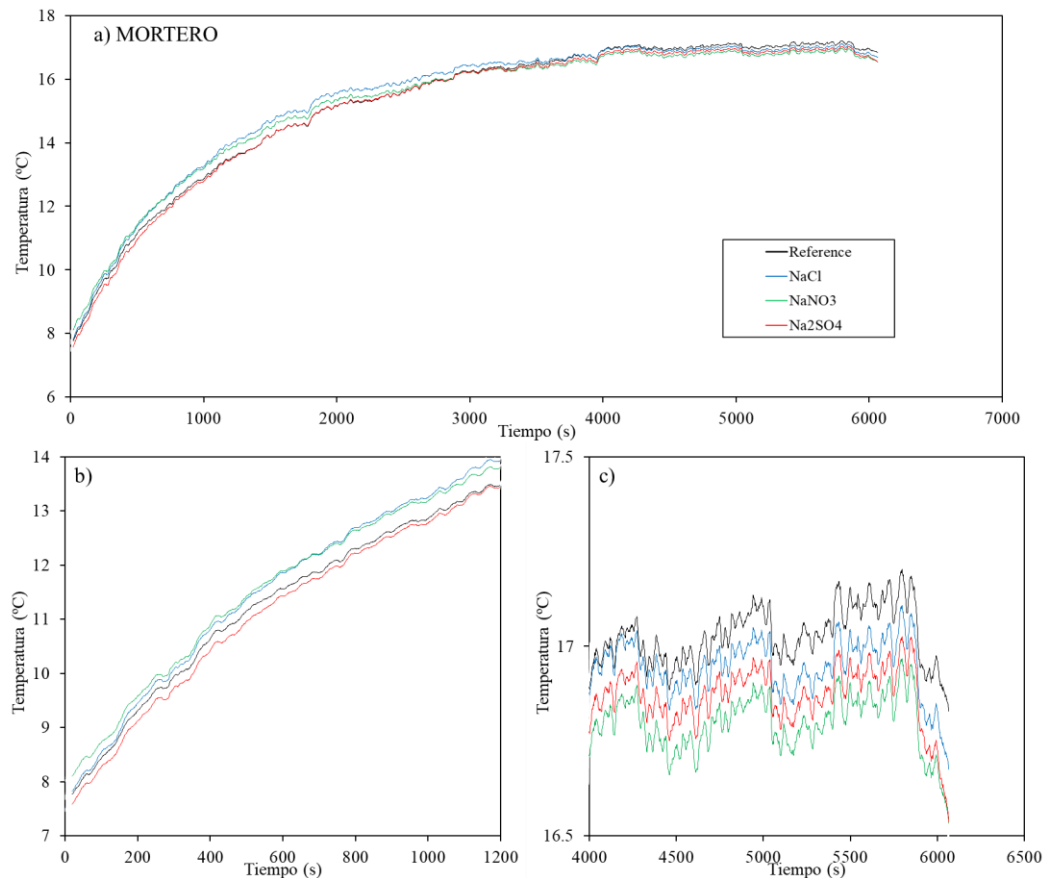


Figura 4-24. Ciclo de calentamiento del mortero de cal 2 según la sal con la que ha sido contaminado. a) Total, b) inicial y c) final (elaboración propia)

Los resultados presentados en la Tabla 4-5 son un resumen de las principales tendencias antes comentadas.

| Muestra   | Primeros momentos                                                    | Momentos finales                                                     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| MONDIM    | $\text{Cl}^- = \text{NO}_3^- > \text{Referencia} = \text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Referencia} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{NO}_3^-$ |
| AZUL      | $\text{Cl}^- = \text{Referencia} = \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Referencia} = \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ |
| RORIZ     | $\text{Cl}^- > \text{Referencia} > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Referencia} = \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{NO}_3^-$ |
| MORTERO 1 | $\text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{Referencia}$ | $\text{Referencia} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{NO}_3^-$ |
| MORTERO 2 | $\text{Cl}^- = \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{Referencia}$ | $\text{Referencia} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} = \text{NO}_3^-$ |

Tabla 4-5. Resumen del comportamiento de las temperaturas de las muestras según el tipo de sal con el que han sido contaminado para el ensayo de calentamiento

### 4.3 Análisis calorimetría diferencial de barrido

La Figura 4-25 muestra la cantidad de calor liberado (rama superior de la gráfica) o absorbido (rama inferior de la gráfica) para las tres sales analizadas.

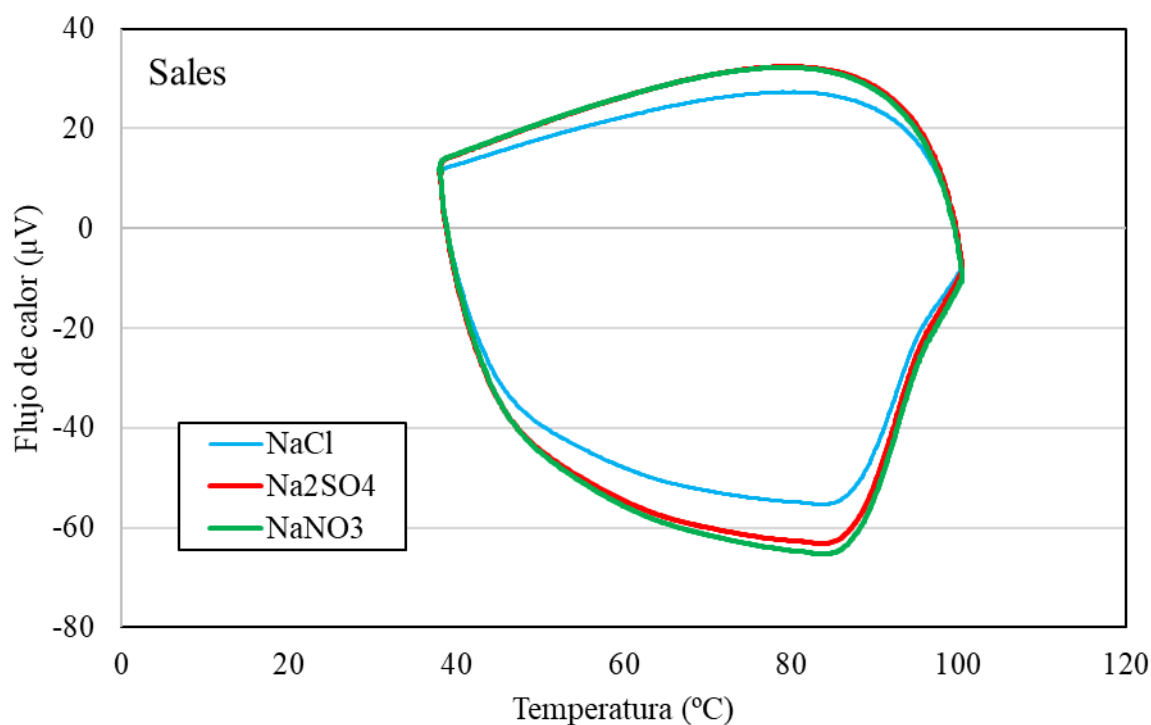


Figura 4-25. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de sales (elaboración propia)

Se aprecia que tanto la fase de absorción de energía, como de liberación, guarda relación con la solubilidad de cada sal, de manera que las sales más solubles a esos rangos de temperatura, como son los cloruros, tienden tanto a absorber menos cantidad de energía como a cederla posteriormente. En este sentido, las que presentan un mejor comportamiento son el  $\text{NaNO}_3$  y el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , compuestos que suelen ser empleados como materiales de cambio de fase [59,60]. Este resultado coincide con lo mostrado en la Figura 4-4.

Tras realizar los ensayos de calorimetría diferencial de barrido en cada uno de los materiales de construcción analizados en este trabajo, se apreció que:

- En el granito Mondim, Figura 4-26, se aprecia que durante la fase de absorción de energía las muestras de referencia, nitrato y sulfato presentan un comportamiento similar, mientras que durante la fase de liberación de energía es la de sulfato la que tiende a liberar más cantidad. Este hecho es el que explica por qué durante el ensayo de enfriamiento durante las primeras etapas (etapas que coinciden con el rango de temperaturas analizado, 40-100), el sulfato tiende a amortiguar el enfriamiento de las muestras de referencia.
- En el granito Azul, Figura 4-27, la muestra de referencia absorbe una alta cantidad de energía, superior a la absorbida con sales, y libera una mayor cantidad.
- En el granito Roriz, Figura 4-28, nuevamente la roca sin sal absorbe más energía que con sal (lo que se corresponde con la mayor temperatura detectada en la Figura 4-10), pero luego libera menos que con el sulfato por lo que esta sal permite amortiguar la pérdida de temperatura, hecho que vuelve a coincidir con lo observado en el ensayo de enfriamiento.

En los tres granitos se aprecia que la presencia de cloruro tiende a refrigerar la muestra dificultando la absorción de energía.

- En el mortero de cal, Figura 4-29, el comportamiento del material con y sin sal es muy similar. Este hecho ya se apreció durante los ensayos de enfriamiento (54Figura 4-12 y Figura 4-14).

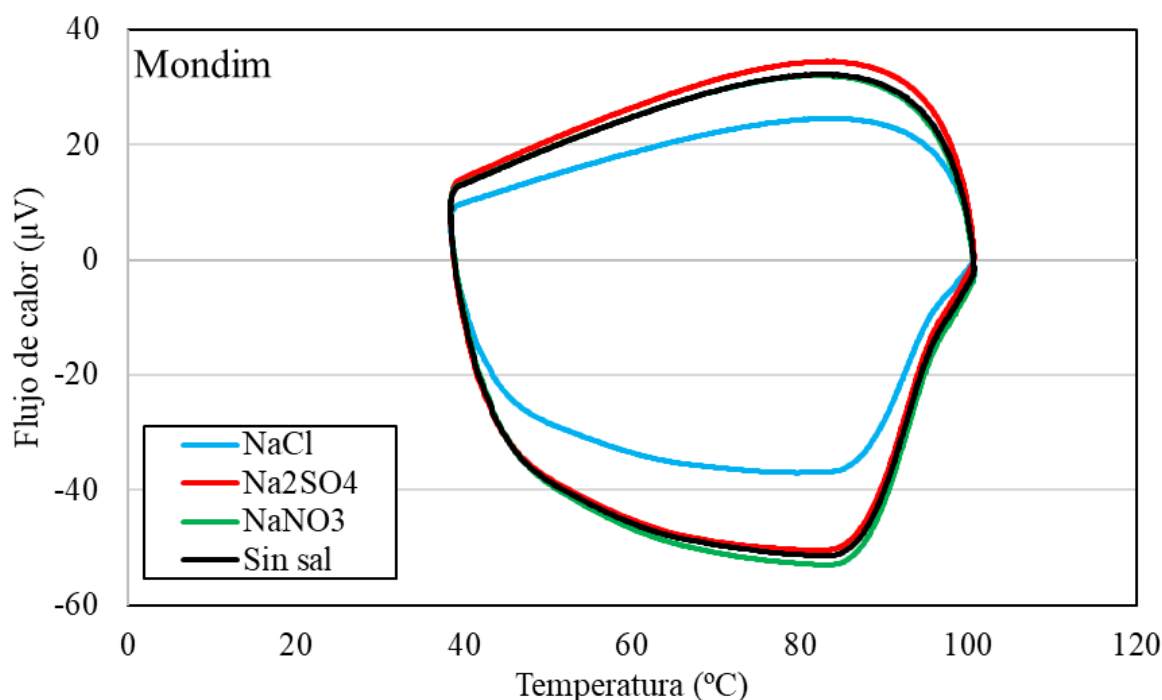


**Figura 4-26. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de granito Mondim (elaboración propia)**

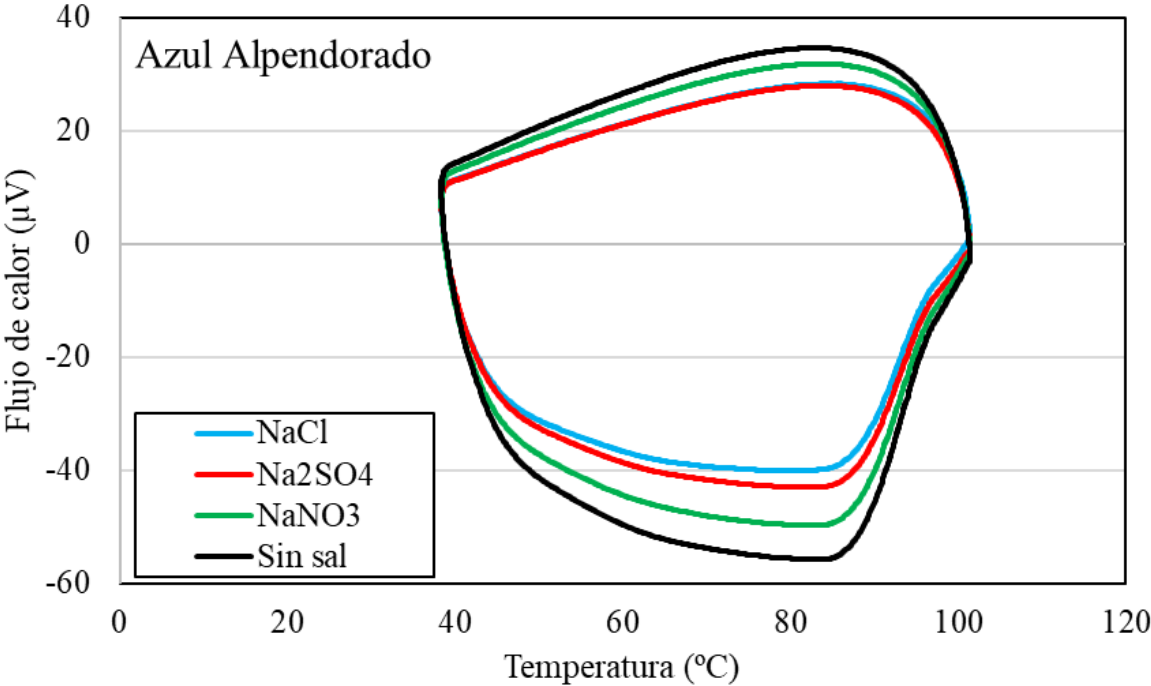


Figura 4-27. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de granito Azul Alpendorada (elaboración propia)

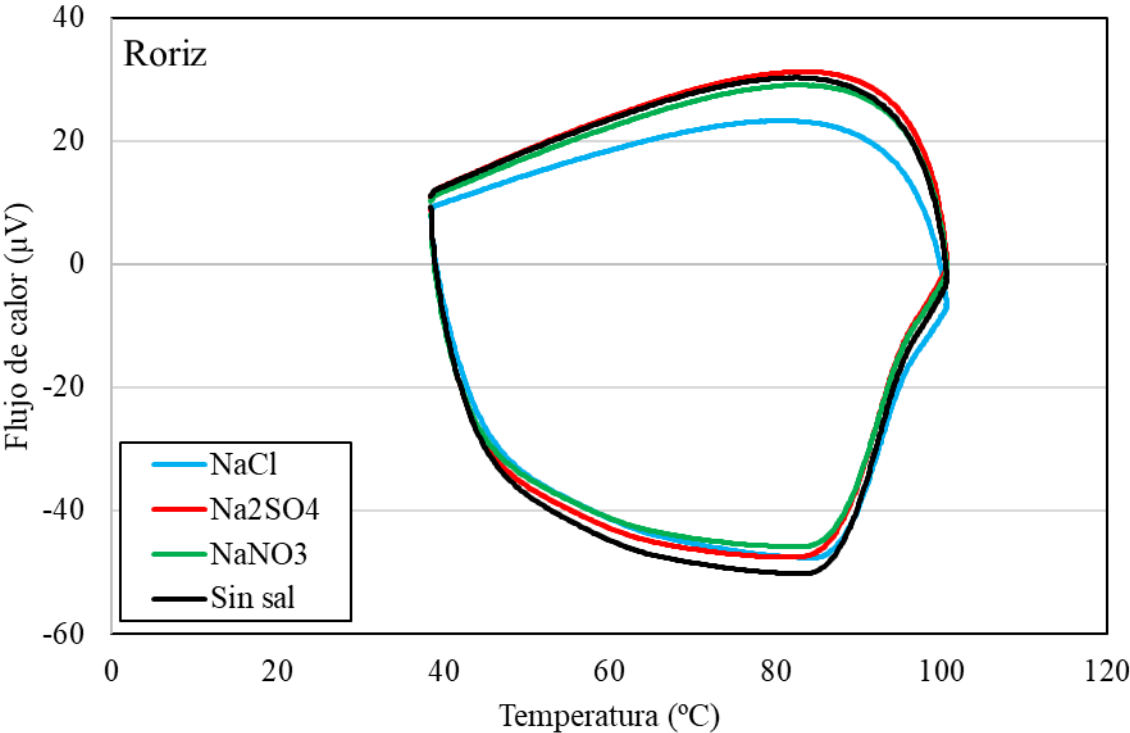


Figura 4-28. Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de granito Roriz (elaboración propia)

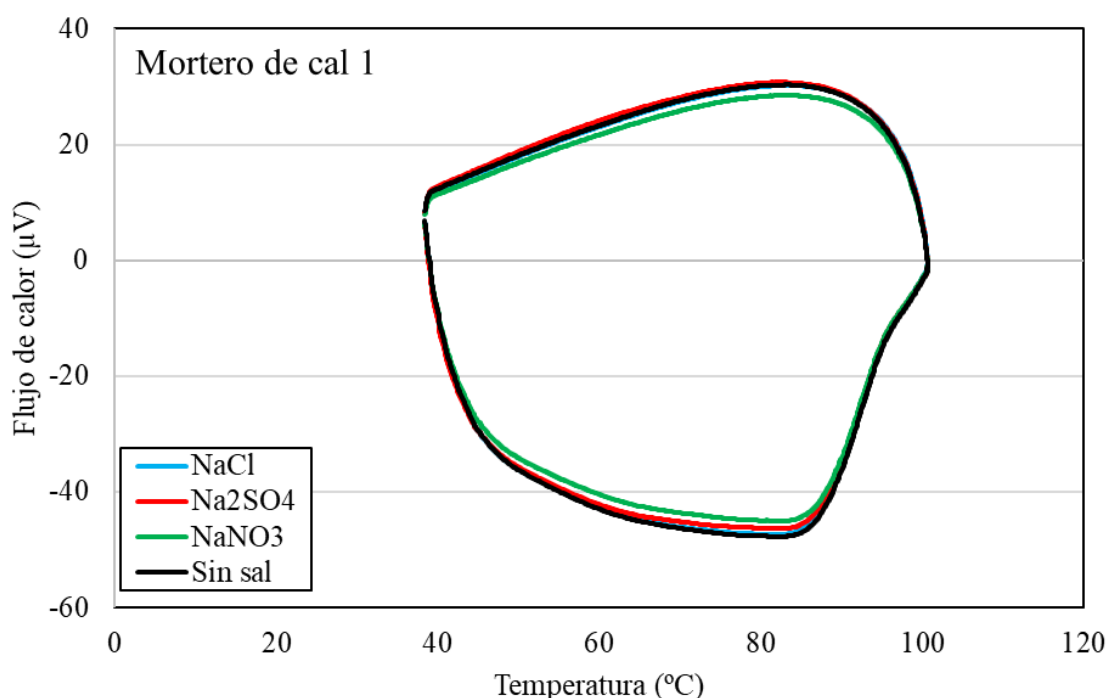


**Figura 4-29.**Flujo de calor frente a la temperatura tras el ensayo de TG realizado sobre las muestras de mortero de cal 1 (elaboración propia)

#### 4.4 Análisis del modelo *Deep Learning*

Para hacer un correcto análisis de la respuesta térmica de las muestras contaminadas de forma automatizada se utiliza el código informático expuesto en el apartado 3.5. Se utiliza el código para dos escenarios diferentes: el primero, empleando como datos de entrada, las secuencias del ciclo de enfriamiento, y el segundo, las secuencias del ciclo de calentamiento. Al ser condiciones iniciales térmicamente diferentes, de ahí el motivo de dicha separación para así analizar y comparar el modelo de *Deep Learning* en ambas escenas.

Se ha elegido para el conjunto de datos de testeo las muestras del granito Azul, el Mondim, uno de los morteros y el granito Roriz: la primera sin estar contaminada, la segunda contaminada de sulfato de sodio, la tercera contaminada de nitrato de sodio y la última contaminada de cloruro de sodio, para tener la mayor variedad posible. Hay que recalcar que es el mismo conjunto para ambos escenarios mencionados previamente, para una comparación más realista.

En cuanto al conjunto de datos de entrenamiento y de validación, 8 secuencias se han elegido aleatoriamente para cada conjunto con respecto a las 16 secuencias restantes, tras la elección previa de las 4 secuencias elegidas para el conjunto de datos de testeo. Esto se debe tras igualar el parámetro “N\_Folds” a 2 en el código (ver apartado 3.5). Cabe recordar que, por la técnica de *cross validation* implementada, se alternan ambos conjuntos, para obtener así mejor resultado del aprendizaje. Tal y como se ha explicado en el apartado 3.5, se realizan 50 iteraciones (50 *epochs*) para cada alternancia. Esto se aplicado a los dos escenarios mencionados.

En cuanto a los resultados, se obtienen gráficas de pérdida (*loss*) y de precisión (*accuracy*) con respecto a la desviación dada, teniendo de referencia a las salidas reales, tanto en el conjunto de entrenamiento como el de validación, para cada *epoch*. Asimismo, se estima la predicción de cada muestra del conjunto de testeo, con el modelo GRU ya aprendido, y se compara con la salida real correspondiente. Esto se puede contemplar también en el código representado en el apartado 3.5,

recordando el patrón de nombres según la sal reflejado en la Tabla 4-6. De nuevo, mismo procedimiento para ambos escenarios.

| Sin sal | NaCl | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | NaNO <sub>3</sub> |
|---------|------|---------------------------------|-------------------|
| 0       | 1    | 2                               | 3                 |

**Tabla 4-6. Número de referencia utilizado por el modelo *Deep Learning* según la sal presente en la muestra**

#### 4.4.1 Ensayo de enfriamiento

En el escenario 1, los datos que se recogieron en el ensayo de enfriamiento fueron a partir de los primeros 500 segundos hasta los 4500 segundos, ya que en ese intervalo temporal se apreció mayores diferencias en las curvas de temperatura de las muestras entre ellas. Los ratios de temperatura frente al tiempo se tomaron cada 50, 500 y 800 segundos, para medir el modelo en diferentes situaciones, analizando la que mejor resultado ofrezca tanto en aprendizaje como en predicción en el conjunto de testeo. Por último, cabe mencionar que los resultados de las predicciones en el conjunto de testeo se mostrarán en tablas como matrices de confusión (Tabla 4-7, Tabla 4-8 y Tabla 4-9), en las cuales las filas hacen referencia a la sal que contiene realmente las muestra y las columnas a la probabilidad en porcentaje de que contenga cada sal según el modelo. Además, se marcará de color verde aquellas que el modelo obtenga mayor porcentaje y acierte el resultado, y de color rojo aquellas que el modelo obtenga mayor porcentaje y no acierte el resultado.

- Para cada 500 segundos de intervalo temporal se obtuvieron los siguientes resultados:

| Contaminante/Hipótesis          | Sin sal (%) | NaCl (%) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%) | NaNO <sub>3</sub> (%) |
|---------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| Sin sal                         | 24,88       | 25,89    | 25,36                               | 23,86                 |
| NaCl                            | 24,95       | 25,61    | 25,27                               | 24,16                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 24,80       | 26,15    | 25,49                               | 23,56                 |
| NaNO <sub>3</sub>               | 25,24       | 24,24    | 24,84                               | 25,67                 |

**Tabla 4-7. Resultados para intervalos temporales cada 500 segundos en el ensayo de enfriamiento**

Como se puede observar, el modelo es capaz de acertar qué muestra está contaminada con cloruro de sodio y cuál con nitrato de sodio. A pesar de no ser capaz de identificar las 2 muestras restantes, se puede observar que el porcentaje es cercano al acierto, aunque lo mismo ocurre con las acertadas.

Por otro lado, se observa poca pérdida y una precisión aceptable en el aprendizaje a pesar de la reducida cantidad de datos de entrada introducida (Figura 4-30 y Figura 4-31).

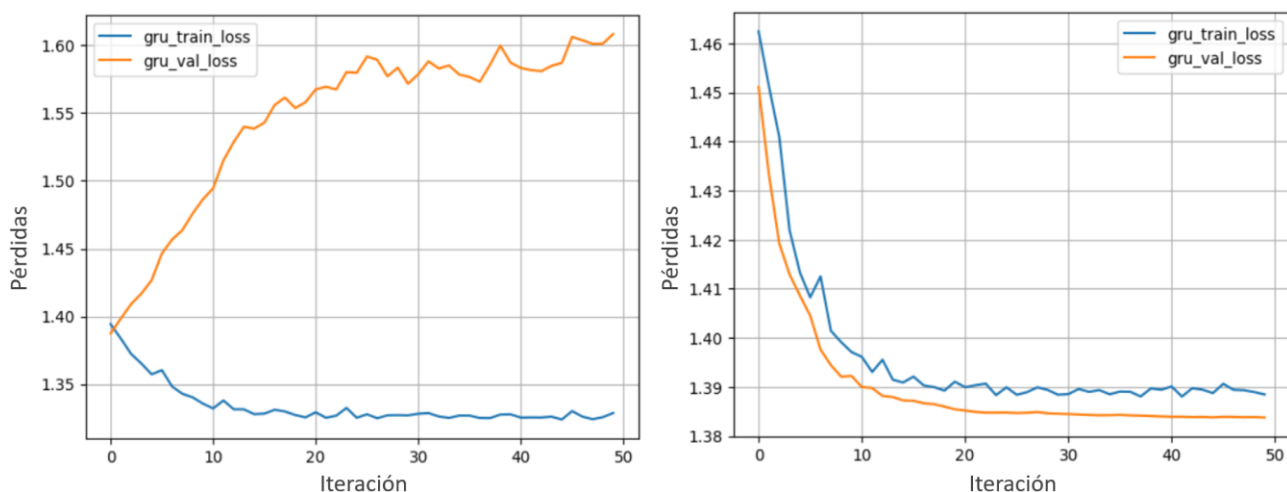


Figura 4-30. La imagen de la izquierda muestra la gráfica de pérdidas de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia)

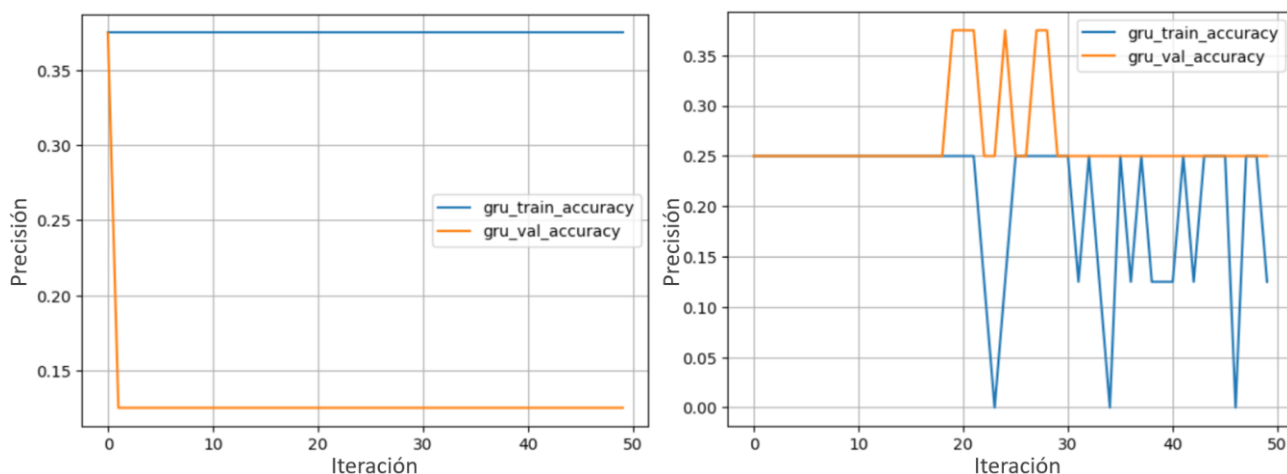


Figura 4-31. La imagen de la izquierda muestra la gráfica de precisión de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia)

– Para cada 50 segundos de intervalo temporal se obtuvieron los siguientes resultados:

| Contaminante/Hipótesis          | Sin sal (%) | NaCl (%) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%) | NaNO <sub>3</sub> (%) |
|---------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| Sin sal                         | 12,82       | 47,09    | 13,53                               | 26,56                 |
| NaCl                            | 12,82       | 47,78    | 13,42                               | 25,98                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 13,01       | 48,16    | 13,34                               | 52,48                 |
| NaNO <sub>3</sub>               | 12,29       | 50,45    | 12,74                               | 24,51                 |

Tabla 4-8. Resultados para intervalos temporales cada 50 segundos en el ensayo de enfriamiento

Como se puede observar, el modelo es capaz de acertar qué muestra está contaminada con cloruro de sodio.

- Para cada 800 segundos de intervalo temporal se obtuvieron los siguientes resultados:

| Contaminante/Hipótesis          | Sin sal (%) | NaCl (%) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%) | NaNO <sub>3</sub> (%) |
|---------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| Sin sal                         | 25,76       | 12,98    | 25,51                               | 35,75                 |
| NaCl                            | 25,28       | 13,14    | 25,25                               | 36,33                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 25,59       | 12,99    | 25,43                               | 35,98                 |
| NaNO <sub>3</sub>               | 24,09       | 13,42    | 24,56                               | 37,92                 |

**Tabla 4-9. Resultados para intervalos temporales cada 800 segundos en el ensayo de enfriamiento**

Como se puede observar, el modelo es capaz de acertar que muestra está contaminada con nitrato de sodio.

Estos resultados dan a entender que el modelo de *Deep Learning* es capaz de identificar más aciertos con un intervalo temporal cada 500 segundos, obteniendo 50% de los aciertos totales (2 de 4). En otras palabras, introduciendo 8 ratios de cada secuencia de entrada al modelo para el aprendizaje y las predicciones, ya que recortando a cada secuencia a partir de los primeros 500 segundos hasta los 4500 segundos del ciclo de enfriamiento, y dividiendo por el intervalo de tiempo de 500 segundos, da como resultado esos 8 ratios de la diferencia de temperaturas medias entre el intervalo temporal asignado. Además, se puede observar que el modelo mejora su precisión y reduce la pérdida tras las iteraciones en términos generales, en el aprendizaje con intervalo de tiempo igual a 500 segundos, lo cual significa que es capaz de aprender un patrón de comportamiento. Por último, se observa que el modelo identifica mejor las muestras contaminadas con cloruro de sodio (en este caso en el granito Roriz según el conjunto de testeo) y nitrato de sodio (en este caso en uno de los morteros según el conjunto de testeo) para el ensayo de enfriamiento.

#### 4.4.2 Ensayo de calentamiento

En el escenario 2, los datos que se recogieron en el ensayo de calentamiento fueron a partir de los primeros 500 segundos hasta los 2500 segundos del ensayo, ya que en ese intervalo temporal se apreció mayores diferencias en las curvas de temperatura de las muestras entre ellas. Los ratios de temperatura frente al tiempo se tomaron cada 50, 250 y 500 segundos como intervalos temporales, para medir el modelo en diferentes situaciones, analizando la que mejor resultado ofrezca tanto en aprendizaje como en predicción en el conjunto de testeo. Por último, cabe mencionar que los resultados se mostrarán en tablas como matrices de confusión (Tabla 4-10, Tabla 4-11 y Tabla 4-12), en las cuales las filas hacen referencia a la sal que contiene realmente las muestra y las columnas a la probabilidad en porcentaje de que contenga cada sal según el modelo. Además, se marcará de color verde aquellas que el modelo obtenga mayor porcentaje y acierte el resultado, y de color rojo aquellas que el modelo obtenga mayor porcentaje y no acierte el resultado.

- Para cada 250 segundos de intervalo temporal se obtuvieron los siguientes resultados:

| Contaminante/Hipótesis          | Sin sal (%) | NaCl (%) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%) | NaNO <sub>3</sub> (%) |
|---------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| Sin sal                         | 16,12       | 39,33    | 14,88                               | 29,66                 |
| NaCl                            | 12,44       | 37,93    | 12,97                               | 36,64                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 13,54       | 38,30    | 13,52                               | 34,63                 |
| NaNO <sub>3</sub>               | 11,16       | 36,91    | 12,12                               | 39,80                 |

**Tabla 4-10. Resultados para intervalos temporales cada 250 segundos en el ensayo de calentamiento**

Como se puede observar, el modelo es capaz de acertar qué muestra está contaminada con cloruro de sodio y cual, con nitrato de sodio, con bastante diferencia en porcentaje con respecto a los candidatos descartados.

Por otro lado, se observa poca pérdida y una precisión aceptable en el aprendizaje a pesar de la reducida cantidad de datos de entrada introducida (Figura 4-32 y Figura 4-33).

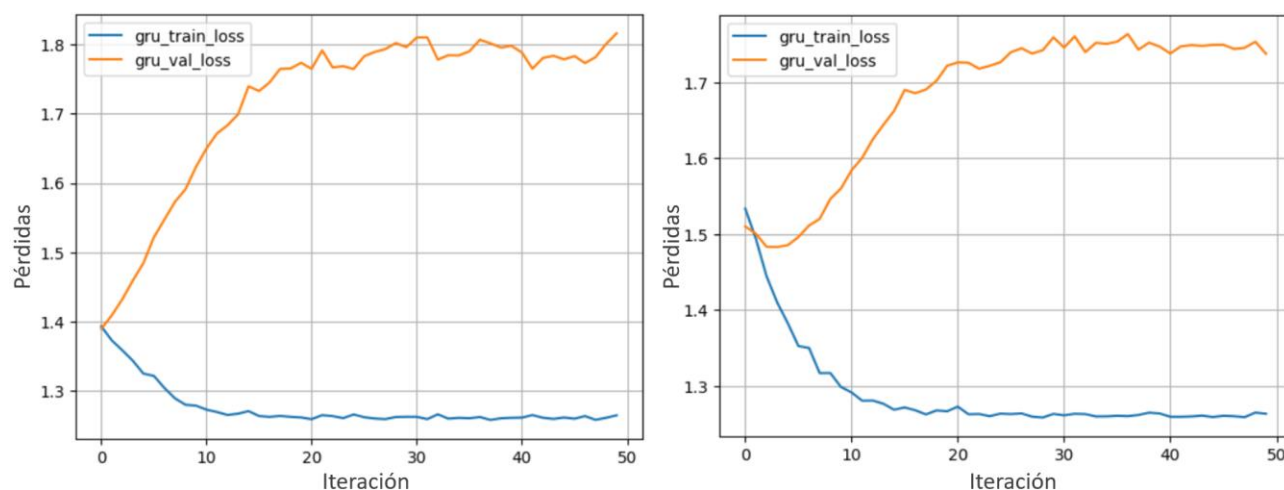


**Figura 4-32.** La imagen de la izquierda muestra la gráfica de pérdidas de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia)

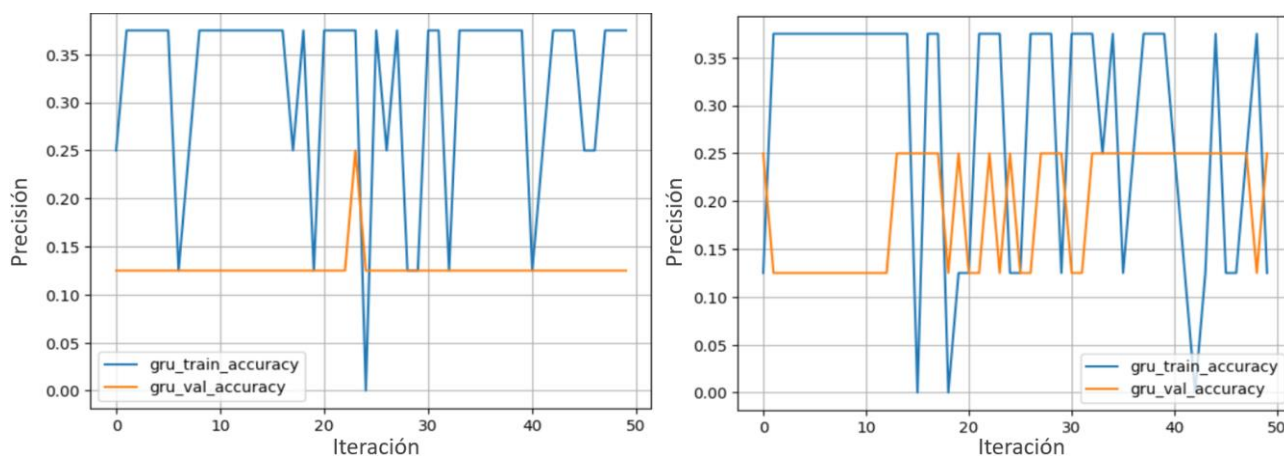


**Figura 4-33.** La imagen de la izquierda muestra la gráfica de precisión de entrenamiento y de validación tras la primera alternancia. La imagen de la derecha tras la segunda alternancia (elaboración propia)

– Para cada 50 segundos de intervalo temporal se obtuvieron los siguientes resultados:

| Contaminante/Hipótesis          | Sin sal (%) | NaCl (%) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%) | NaNO <sub>3</sub> (%) |
|---------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| Sin sal                         | 20,88       | 16,60    | 21,56                               | 40,95                 |
| NaCl                            | 42,48       | 11,10    | 10,40                               | 36,01                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 46,33       | 10,02    | 09,07                               | 34,59                 |
| NaNO <sub>3</sub>               | 37,59       | 12,22    | 12,32                               | 37,86                 |

**Tabla 4-11.** Resultados para intervalos temporales cada 50 segundos en el ensayo de calentamiento

Como se puede observar, el modelo es capaz de acertar qué muestra está contaminada con nitrato de sodio.

- Para cada 500 segundos de intervalo temporal se obtuvieron los siguientes resultados:

| Contaminante/Hipótesis          | Sin sal (%) | NaCl (%) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%) | NaNO <sub>3</sub> (%) |
|---------------------------------|-------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| Sin sal                         | 24,95       | 11,95    | 24,55                               | 38,55                 |
| NaCl                            | 25,32       | 12,61    | 25,44                               | 36,63                 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 24,78       | 11,68    | 24,21                               | 39,33                 |
| NaNO <sub>3</sub>               | 24,28       | 10,95    | 23,49                               | 41,27                 |

**Tabla 4-12. Resultados para intervalos temporales cada 500 segundos en el ensayo de calentamiento**

Como se puede observar, el modelo es capaz de acertar qué muestra está contaminada con nitrato de sodio.

Estos resultados sugieren que el modelo de Deep Learning puede identificar más aciertos al utilizar un intervalo temporal de 250 segundos, alcanzando el 50% de los aciertos totales (2 de 4). En resumen, al introducir 8 ratios de cada secuencia de entrada al modelo para el entrenamiento y las predicciones, se obtienen estos ratios al recortar cada secuencia desde los primeros 500 segundos hasta los 2500 segundos del ciclo de calentamiento, y luego dividir por intervalos de tiempo de 250 segundos. La pérdida y la precisión del aprendizaje con intervalos de tiempo de 50 y 500 segundos no se muestran, pero se destaca que los resultados fueron ligeramente inferiores en comparación con el aprendizaje con intervalo de tiempo de 250 segundos. Además, se observa que el modelo mejora su precisión y reduce la pérdida con cada iteración, en términos generales, durante el aprendizaje con intervalo de tiempo de 250 segundos, lo que indica su capacidad para aprender un patrón de comportamiento. Por último, se observa que el modelo identifica mejor las muestras contaminadas con cloruro de sodio (como en el caso del granito Roriz en el conjunto de pruebas) y nitrato de sodio (como en uno de los morteros en el conjunto de pruebas) durante el ciclo de calentamiento.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

Como principales conclusiones de este trabajo, y teniendo en cuenta los objetivos marcados en un principio, se puede establecer que:

- Los materiales seleccionados presentan distinta porosidad y estructura porosa, aspectos ambos que influyen en el contenido de huecos, contenido de sales absorbidas y en definitiva en la respuesta térmica obtenida mediante cámara termográfica.
- La presencia de sales afecta al comportamiento térmico del material, ya que en el ensayo de enfriamiento tiende a amortiguar la velocidad de pérdida de temperatura de las muestras, especialmente en las muestras menos porosas como son las de granito, mientras que, en los ensayos de calentamiento, al menos el cloruro de sodio tiende a facilitar que la muestra alcance la temperatura ambiente más rápido, debido sobre todo a la higroscopicidad de la sal.
- La capacidad de refrigeración de la sal presente está íntimamente relacionada con su solubilidad, de manera que la más soluble tiende a refrigerar mucho más la temperatura.
- En relación al modelo de Deep Learning, al introducir 8 ratios como número de entrada para cada secuencia temporal de temperatura media de cada muestra, tanto para el ciclo de enfriamiento como para el de calentamiento, se observan mejores rendimientos. Esto se debe probablemente a las características de los datos de entrada y a la propia estructura del modelo. En ambos ciclos, enfriamiento y calentamiento, se logra predecir correctamente, en el conjunto de prueba, la presencia de cloruro de sodio como sal contaminante en el granito Roriz, así como uno de los morteros con nitrato de sodio como contaminante. La precisión de las predicciones es más notable en el ciclo de calentamiento, evidenciada por un porcentaje de probabilidad de acierto más alto (cerca del 40%) en comparación con el ciclo de enfriamiento (donde el porcentaje de acierto más alto ronda el 25%). Estos resultados sugieren que el modelo puede estimar con precisión el tipo de contenido en sal, específicamente cloruro y nitrato de sodio, en materiales pétreos, ya sean poco porosos como el granito Roriz o altamente porosos como el mortero de cal. A pesar de estos resultados, hay que realizar más estudios para confirmar esta tendencia positiva.

## 5.2 Líneas futuras

Como líneas futuras, se debería perfeccionar el modelo de *Deep Learning* a través de incrementar la librería de experimentos aportados tanto para entrenar como para validar, para tener un aprendizaje del modelo más sólido y robusto a la hora de predecir el tipo de contenido en sal en materiales pétreos, sobre todo enfocado a estructuras reales. Para ello, se deberán incluir más tipos de materiales de construcción, especialmente aquellos que presentan una mayor porosidad, como pueden ser ladrillos y rocas calizas, así como incrementar el número de sales analizadas, a fin de que el modelo de *Deep Learning* pueda tener el mayor número posible de diferentes tipos de datos mejorando así su versatilidad a partir de las imágenes adquiridas gracias a la termografía infrarroja.

Por otro lado, una vez desarrollado el modelo de aprendizaje automático, se podría implementar y asentar esta técnica de detección temprana de contaminación por sales como un precedente. De esta forma, en lugares con alta cantidad de contaminación salina como puede ser la costa, se prevendrían fallos estructurales en edificios con mayor eficacia.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. de Rosario Amado, J. Feijoo Conde, Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos: técnicas de conservación, (n.d.) 293. [https://todo-libro.com/es/libro/alteracion-de-las-rocas-y-otros-materiales-de-construccion-en-los-monumentos-tecnicas-de-conservacion\\_AIF0010002](https://todo-libro.com/es/libro/alteracion-de-las-rocas-y-otros-materiales-de-construccion-en-los-monumentos-tecnicas-de-conservacion_AIF0010002) (accessed January 17, 2024).
- [2] Universidad Pablo de Olavide, Sales Solubles como factor de alteración, (n.d.). [https://www.upo.es/tym/WebCT/Medioambiente/page\\_12.htm](https://www.upo.es/tym/WebCT/Medioambiente/page_12.htm) (accessed January 20, 2024).
- [3] J. Feijoo Conde, Definición de los protocolos más eficaces para la desalación en granitos ornamentales, (n.d.).
- [4] M. Barra, D. Aponte, S. Valls, E. Vázquez, RECERCA I INNOVACIÓ A L'ESCOLA DE CAMINS IMPACTO AMBIENTAL EN EL ÀMBITO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, n.d.
- [5] Nick Gromicko, Ben Gromicko, Eflorescencia para Inspectores, (n.d.). <https://www.nachi.org/efflorescence-spanish.htm> (accessed January 21, 2024).
- [6] Propamsa, Humedades por capilaridad, (n.d.). <https://www.propamsa.es/articulos-tecnicos/humedades-por-capilaridad/> (accessed February 24, 2024).
- [7] C.M. Grossi, R.M. Esbert, Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica, *Materiales de Construcción* 44 (1994) 15–30. <https://doi.org/10.3989/MC.1994.V44.I235.579>.
- [8] El Universo, Sal marina pudo corroer cimientos, de acuerdo a expertos que analizan posibles causas que originaron colapso de edificio en Florida, (2021). <https://www.eluniverso.com/noticias/internacional/expertos-analizan-posibles-causas-que-originaron-colapso-de-edificio-en-florida-nota/> (accessed February 24, 2024).
- [9] B. Silva, T. Rivas, E. García-Rodeja, B. Prieto, Distribution of ions of marine origin in Galicia (NW Spain) as a function of distance from the sea, *Atmos Environ* 41 (2007) 4396–4407. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2007.01.045>.
- [10] Lluvia ácida, el enemigo invisible | iAgua, (n.d.). <https://www.iagua.es/noticias/espana/fundacion-aquae/17/07/17/lluvia-acida-enemigo-invisible> (accessed February 24, 2024).

- [11] LibreTexts, Efectos de la Temperatura y Presión sobre la Solubilidad, n.d. <https://espanol.libretexts.org/@go/page/77930>.
- [12] Andreas Arnold, Konrad Zehnder, Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts, (n.d.). [https://books.google.es/books/about/Monitoring\\_Wall\\_Paintings\\_Affected\\_by\\_So.html?id=nSBuzgEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.es/books/about/Monitoring_Wall_Paintings_Affected_by_So.html?id=nSBuzgEACAAJ&redir_esc=y) (accessed March 18, 2024).
- [13] D. Benavente, Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales, Tesis Doctoral. Universidad de Alicante (2002). [https://www.researchgate.net/publication/39673264\\_Modelizacion\\_y\\_estimacion\\_de\\_la\\_durabilidad\\_de\\_materiales\\_petros\\_porosos\\_frente\\_a\\_la\\_cristalizacion\\_de\\_sales](https://www.researchgate.net/publication/39673264_Modelizacion_y_estimacion_de_la_durabilidad_de_materiales_petros_porosos_frente_a_la_cristalizacion_de_sales) (accessed April 3, 2024).
- [14] B.J. Skinner, 1966, Thermal expansion, in Handbook of physical constants, Clark, S.P. Jr., ed., Geological Society of America Memoir 97, Geol Soc Am Bull (n.d.).
- [15] EcuRed, Sal hidratada, (n.d.). [https://www.ecured.cu/Sal\\_hidratada](https://www.ecured.cu/Sal_hidratada) (accessed January 31, 2024).
- [16] J. García Mayayo, Materiales de Cambio de Fase. Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a altas temperaturas., (n.d.).
- [17] A. Oliver, F.J. Neila, A. García-Santos, Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energíatérmica, *Materiales de Construcción* 62 (2012) 131–140. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>.
- [18] E. Wojtaś, J. Kujawska, G. Łagód, Z. Suchorab, Measurement of salinity in building materials: A synopsis of current practices and potential innovations, in: *J Phys Conf Ser*, Institute of Physics, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2628/1/012034>.
- [19] J. Weiss, Handbook of Ion Chromatography, Wiley-VCH, 2016. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=\\_U9gDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=ion+chromatography+method&ots=YppvUe\\_E0P&sig=L6shf82XDstQsEAht57q0VjmMSA#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=_U9gDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=ion+chromatography+method&ots=YppvUe_E0P&sig=L6shf82XDstQsEAht57q0VjmMSA#v=onepage&q&f=false) (accessed March 18, 2024).
- [20] A.A. Bunaciu, E. gabriela Udriștioiu, H.Y. Aboul-Enein, X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications, *Crit Rev Anal Chem* 45 (2015) 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>.
- [21] P. Baedeker, Methods for Geochemical Analysis, U.S. Geological Survey Bulletin 1770, 1987.
- [22] E. Lugo, E. Playà, L. Rivero, Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas Prospection of evaporite formations with electric imaging, (n.d.).
- [23] M.G. Rasteiro, R. Silva, F.A.P. Garcia, P. Faia, Electrical Tomography: a review of Configurations and Applications to Particulate Processes, *KONA Powder and Particle Journal* 29 (2011) 67–80. <https://doi.org/10.14356/KONA.2011010>.
- [24] V. Barrile, R. Pucinotti, Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study, *NDT & E International* 38 (2005) 596–604. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2005.02.003>.
- [25] Comunidad de Madrid, Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética, 2011. [www.madrid.org](http://www.madrid.org).
- [26] D.L. Balageas, Termografía Infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END), n.d. <https://www.ndt.net/?id=4721>.
- [27] I. Garrido, S. Lagüela, P. Arias, Infrared thermography's application to infrastructure inspections, *Infrastructures (Basel)* 3 (2018). <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030035>.

- [28] Academia Testo, Radiación infrarroja en el espectro de ondas, (n.d.). <https://www.academiatesto.com.ar/cms/radiacion-infrarroja-en-el-espectro-de-ondas-2> (accessed April 3, 2024).
- [29] D.J. Titman, Applications of thermography in non-destructive testing of structures, n.d. [www.elsevier.com/locate/ndteint](http://www.elsevier.com/locate/ndteint).
- [30] Arrebol Estudio, Análisis termográfico en la rehabilitación energética, (n.d.). <https://www.arrebolestudio.com/analisis-termografico-en-la-rehabilitacion-energetica/> (accessed February 24, 2024).
- [31] ATRIA Innovation, Termografía, qué es y para qué se usa, (n.d.). <https://www.atriainnovation.com/termografia-que-es-para-que-se-usa/> (accessed February 24, 2024).
- [32] C. Thomachot-Schneider, M. Gommeaux, N. Lelarge, A. Conreux, K. Mouhoubi, J.L. Bodnar, P. Vázquez, Relationship between Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentration and thermal response of reconstituted stone in the laboratory and on site, *Environ Earth Sci* 75 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5388-9>.
- [33] C. Thomachot-Schneider, P. Vázquez, M. Gommeaux, N. Lelarge, A. Conreux, X. Drothière, K. Mouhoubi, J.L. Bodnar, Thermal response of building stones contaminated with salts, *Constr Build Mater* 226 (2019) 331–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.127>.
- [34] M. Delgado Calvo-Flores, La inteligencia artificial: realidad de un mito moderno, (1996). <https://digibug.ugr.es/handle/10481/1270> (accessed March 21, 2024).
- [35] W.J. Murdoch, C. Singh, K. Kumbier, R. Abbasi-Asl, B. Yu, Interpretable machine learning: definitions, methods, and applications, *Proc Natl Acad Sci U S A* 116 (2019) 22071–22080. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900654116>.
- [36] G. Chassagnon, M. Vakalopoulou, N. Paragios, M.P. Revel, Deep learning: definition and perspectives for thoracic imaging, *Eur Radiol* 30 (2020) 2021–2030. <https://doi.org/10.1007/S00330-019-06564-3/METRICS>.
- [37] P.P. Shinde, S. Shah, A Review of Machine Learning and Deep Learning Applications, *Proceedings - 2018 4th International Conference on Computing, Communication Control and Automation, ICCUBEA 2018* (2018). <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2018.8697857>.
- [38] K. Cho, B. Van Merriënboer, C. Gulcehre, D. Bahdanau, F. Bougares, H. Schwenk, Y. Bengio, Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation, *EMNLP 2014 - 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Proceedings of the Conference* (2014) 1724–1734. <https://doi.org/10.3115/v1/d14-1179>.
- [39] L. Ventol, M. Vendrell, P. Giraldez, L. Merino, Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics, *Constr Build Mater* 25 (2011) 3313–3318. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.03.020>.
- [40] ASTM C144-04, Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar, (1974).
- [41] M. Gómez Heras, Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico, (2005). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=17229&info=resumen&idioma=SPA> (accessed March 5, 2024).
- [42] B. Lubelli, R. van Hees, C. Groot, The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry, *Constr Build Mater* 18 (2004) 119–124.

- <https://research.tudelft.nl/en/publications/the-role-of-sea-salts-in-the-occurrence-of-different-damage-mecha> (accessed March 5, 2024).
- [43] N. Tsui, R.J. Flatt, G.W. Scherer, Crystallization damage by sodium sulfate, *J Cult Herit* 4 (2003) 109–115. [https://www.academia.edu/20063706/Crystallization\\_damage\\_by\\_sodium\\_sulfate](https://www.academia.edu/20063706/Crystallization_damage_by_sodium_sulfate) (accessed March 5, 2024).
- [44] A.E. Charola, J. Pühringer, M. Steiger, Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials, *Environmental Geology* 52 (2007) 207–220. <https://doi.org/10.1007/S00254-006-0566-9>.
- [45] X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Thermal characterization of nitrates and nitrates/expanded graphite mixture phase change materials for solar energy storage, *Energy Convers Manag* 73 (2013) 86–94. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2013.04.007>.
- [46] P.A.M. Williams, E. Gloria Ferrer, Determinación experimental de la densidad del NaCl: un trabajo práctico para aplicar conceptos previamente adquiridos sobre los sistemas cristalinos y las propiedades de los cristales, (n.d.). <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1557/2133> (accessed March 19, 2024).
- [47] J. Luddey Marulanda, B.A. Posada, D. Gamboa B., Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico, (n.d.). <https://moodle2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5007/2637> (accessed March 19, 2024).
- [48] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 615–628. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.10.015>.
- [49] FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD SODIO SULFATO ANHIDRO, (n.d.).
- [50] L. Cisternas, Diagrama de fases y su aplicación, (n.d.). [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=UYfyDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=solubilidad+NaNO3+20%C2%BAC&ots=VEvsoiqpwG&sig=kOjvuF8zjltL1N-4Rlt\\_TpBo6Yg#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=UYfyDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=solubilidad+NaNO3+20%C2%BAC&ots=VEvsoiqpwG&sig=kOjvuF8zjltL1N-4Rlt_TpBo6Yg#v=onepage&q&f=false) (accessed March 19, 2024).
- [51] UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para piedra natural. Determ..., (n.d.). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038621> (accessed March 20, 2024).
- [52] UNE-EN 1015-10:2000/A1:2007 Métodos de ensayo de los morteros ..., (n.d.). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039472> (accessed March 20, 2024).
- [53] UNE-EN 1925:1999 Métodos de ensayo para piedra natural. Determ..., (n.d.). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0010084> (accessed March 11, 2024).
- [54] UNE-EN 14579:2005 Métodos de ensayo para piedra natural: Deter..., (n.d.). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034000> (accessed March 12, 2024).
- [55] E. Santos, J. Yenque, O. Rojas, V. Rosales, Notas científicas acerca del ensayo de dureza, (n.d.).
- [56] F. Calle Ernesto Patricio, P. Suarez Jhenifer Cristina, La resistividad de rocas y su relación con la resistencia de compresión simple en mina, *CIENCIA y TECNOLOGÍA* 21 (2017) 61–67.
- [57] User's manual FLIR Exx series, n.d.

- [58] Teledyne FLIR, Support for FLIR E85 - Discontinued, (n.d.). <https://www.flir.es/support/products/e85/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions#Overview> (accessed April 1, 2024).
- [59] T. Bauer, D. Laing, R. Tamme, Characterization of sodium nitrate as phase change material, *Int J Thermophys* 33 (2012) 91–104. <https://doi.org/10.1007/S10765-011-1113-9>/METRICS.
- [60] A. Gholami, M. Gorji, Experimental study for the use of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O as a PCM with fixed blades for temperature and efficiency parameters of photovoltaic panel, *Case Studies in Thermal Engineering* 49 (2023) 103219. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103219>.
- [61] FLIR, Specifications FLIR Exx-Series, n.d. [www.flir.com/Exx-Electrical](http://www.flir.com/Exx-Electrical).
- [62] LABSYS evo, LABSYS evo TGA STA DTA / DSC, n.d. [www.setaram.com](http://www.setaram.com)!

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

- **Implicaciones sociales:**

Durante la investigación, se ha observado que el desarrollo de la técnica de detección de sales mediante termografía puede mejorar significativamente la calidad de vida de las personas. La aplicación de esta técnica no invasiva para la detección de sales es, además de discreta, poco intrusiva, lo que reduce la incomodidad para los residentes en edificios o viviendas en los cuales se esté haciendo el estudio, promoviendo una convivencia más agradable.

La termografía infrarroja, al ser una técnica no invasiva, posibilita la detección de sales para su posterior tratamiento sin necesidad de recurrir a técnicas destructivas que ocasionen una pérdida estructural o estética del material.

Otro punto a favor del uso de la termografía infrarroja como método de detección de sales, es la capacidad de medición en zonas poco accesibles. Esto evita posibles accidentes laborales debido al uso de grúas o andamios para acceder a grandes alturas.

- **Implicaciones ambientales:**

Otro factor relevante a considerar es el impacto medioambiental de la técnica de análisis mediante termografía infrarroja. Al no utilizarse productos químicos nocivos y contaminantes, y al no generarse polvo para su detección, el análisis termográfico se presenta como una alternativa respetuosa con el medio ambiente, reduciendo así el riesgo de contaminación del suelo, el aire y las aguas subterráneas.

Por último, esta técnica tiene un impacto directo y positivo en la salud pública, dado que la presencia de ciertas sales en los materiales de construcción puede ocasionar, debido a su higroscopicidad, problemas de salud relacionados con la presencia de humedad y con el crecimiento de microorganismos como el moho. De esta forma, se pueden prevenir estos problemas, protegiendo la salud de los seres vivos que habiten en lugares susceptibles a ellos.

- **Implicaciones económicas:**

Entre las diferentes implicaciones económicas relacionadas con el empleo de la termografía infrarroja como técnica de detección de sales, destaca su uso como herramienta de mantenimiento preventivo, ya que la pronta detección de estas sales permitirá llevar a cabo labores de mantenimiento o rehabilitación en lugar de labores de reconstrucción las cuales implican un mayor coste.

Además, entender cómo las sales afectan a la respuesta termográfica puede ayudar a desarrollar materiales de construcción más eficientes en términos energéticos, dando como resultado un ahorro en costos de calefacción y refrigeración.

Asimismo, cabe destacar el coste asociado que supone el empleo de técnicas destructivas. Un ejemplo es el que se realizó para este trabajo de investigación, en el cual se efectuó un análisis de detección de un ion. El precio de estos análisis supuso alrededor de 180€, además de invertir tiempo en perforación, preparación de la extracción acuosa, y posterior filtración. Por último, mencionar los gastos asociados a consumibles como son el agua ultrapura, los filtros y las herramientas. Mediante la termografía infrarroja se reduce el coste de análisis, incluyendo el procesamiento de datos, y el tiempo de trabajo, lo que supone menor coste de personal, y más si se integra en un sistema automatizado el procesado de los datos, como se hizo en este caso mediante el uso de modelos de *Deep Learning*.

## ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El propósito de este anexo es reflexionar sobre los aspectos que, gracias al desarrollo de este estudio, pueden ser aplicados de manera práctica para mejorar la calidad de vida de las personas y prevenir tempranamente diversos procesos perjudiciales para la salud humana.

En primer lugar, y tal y como se ha mencionado en el Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales, la prevención de la degradación de los edificios es un factor muy importante y que ha afecta a todos los seres humanos. Sin un correcto análisis preventivo de estas estructuras, pueden suceder desastres como el sucedido en la Figura 2-3. Por lo tanto, existe una responsabilidad ética y social para garantizar la salud pública y minimizar los accidentes por derrumbamiento.

Por otro lado, el uso de la técnica de la termografía infrarroja junto con el procesado automatizado de sus datos mediante modelos de *Deep Learning* supone un avance en la preservación de monumentos, los cuales, al ser sometidos a técnicas de análisis destructivas pierden material original y acaban sufriendo procesos de restauración.

Por último, las grandes empresas de construcción y restauración al incluir este método automatizado de detección de sales mediante termografía infrarroja generan un ambiente de trabajo seguro. Esto se debe a que, como se ha comentado anteriormente, los trabajadores deben alcanzar lugares poco accesibles y utilizar herramientas de gran peso o compuestos nocivos para el ser humano.

## ANEXO III: ESPECIFICACIONES FLIR E85

| Features By Camera                    | E75                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | E85                                                                                                     | E95                                                                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IR Resolution                         | 320 x 240                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 384 x 288                                                                                               | 464 x 348                                                                                               |
| Object Temperature Range              | -20°C to 120°C (-4°F to 248°F)<br>0°C to 650°C (32°F to 1200°F)<br>Optional 300°C to 1000°C<br>(572°F to 1830°F)                                                                                                                                                                                                                                                | -20°C to 120°C (-4°F to 248°F)<br>0°C to 650°C (32°F to 1200°F)<br>300°C to 1200°C<br>(572°F to 2192°F) | -20°C to 120°C (-4°F to 248°F)<br>0°C to 650°C (32°F to 1200°F)<br>300°C to 1500°C<br>(572°F to 2732°F) |
| Time-lapse (Infrared)                 | No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | No                                                                                                      | 10 sec to 24 hours                                                                                      |
| Measurement Features by Camera        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Area Measurement Information          | No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Yes                                                                                                     | Yes                                                                                                     |
| Spotmeter                             | 1 in live mode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3 in live mode                                                                                          | 3 in live mode                                                                                          |
| Area                                  | No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3 in live mode                                                                                          | 3 in live mode                                                                                          |
| Common Features                       | Exx-Series                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Detector Type and Pitch               | Uncooled microbolometer, 17 µm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Thermal Sensitivity/NETD              | < 0.03°C @ 30°C (86°F)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Spectral Range                        | 7.5 - 14.0 µm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Image Frequency                       | 30 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Field of View (FOV)                   | 24° x 18° (17 mm lens), 42° x 32° (10 mm lens), 14° x 10° (29 mm lens)                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                         |                                                                                                         |
| F-Number                              | f/1.3, f/1.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Lens Identification                   | Automatic                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Focus                                 | Continuous, one-shot laser distance meter (LDM), one-shot contrast, manual                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Digital Zoom                          | 1-4x continuous                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Image Presentation and Modes          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Display                               | 4", 640 x 480 optically-bonded PCAP touchscreen, with 400 cd/m² surface brightness                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Digital Camera                        | 5 MP, 53° x 41° FOV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Color Palettes                        | Iron, Gray, Rainbow, Arctic, Lava, Rainbow HC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Image Modes                           | Infrared, visual, MSX®, Picture-in-Picture                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Picture-in-Picture                    | Resizable and movable                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                         |                                                                                                         |
| MSX®                                  | Embosses visual details on full resolution thermal image                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                         |                                                                                                         |
| UltraMax™                             | Super-resolution process quadruples pixel count, activated in FLIR Tools+                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Measurement and Analysis              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Accuracy                              | ±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading for ambient temperature 15°C to 35°C (59°F to 95°F) and object temperature above 0°C (32°F)                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Alarms                                | Moisture alarm, insulation alarm, measurement alarms                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Color Alarm (Isotherm)                | Above/below/interval/condensation/insulation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Laser Distance Measurement            | Yes, on-screen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Measurement Presets                   | No measurement, center spot, hot spot, cold spot, User Preset 1, User Preset 2                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Compass, GPS                          | Yes; automatic GPS image tagging                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                         |                                                                                                         |
| METERLINK®                            | Yes; several readings                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Image Storage                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Storage Media                         | Removable SD card (8 GB)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Image File Format                     | Standard radiometric JPEG, measurement data included                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Video Recording and Streaming         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Radiometric IR Video Recording        | Real-time radiometric recording (.csq)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Non-Radiometric IR or Visual Video    | H.264 to memory card                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Radiometric IR Video Streaming        | Yes, over UVC or Wi-Fi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Non-Radiometric IR Video Streaming    | H.264 or MPEG-4 over Wi-Fi<br>MJPEG over UVC or Wi-Fi                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Communication Interfaces              | USB 2.0, Bluetooth, Wi-Fi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Video Out                             | DisplayPort over USB Type-C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Additional Data                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Battery Type                          | Li-ion battery, charged in camera or on separate charger                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Battery Operating Time                | Approx. 2.5 hours at 25°C (77°F) ambient temperature and typical use                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Operating Temperature Range           | -15°C to 50°C (5°F to 122°F)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Storage Temperature Range             | -40°C to 70°C (-40°F to 158°F)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Shock/Vibration/Encapsulation; Safety | 25 g / IEC 60068-2-27, 2 g / IEC 60068-2-6, IP 54 / IEC 60529; EN/UL/CSA/PSE 60950-1                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Weight/Dimensions w/o Lens            | 1 kg (2.2 lbs), 27.8 x 11.6 x 11.3 cm (11.0 x 4.6 x 4.4 in)                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Box Contents                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                         |                                                                                                         |
| Packaging                             | Infrared camera with lens, battery (2 ea), battery charger with power supply, front lens and light protection, straps (hand and wrist), lanyards, lens caps (front and rear), lens cleaning cloth, 15 W/3 A power supply, printed documentation, 8 GB SD card, Torx screwdriver, cables (USB 2.0 A to USB Type-C, USB Type-C to HDMI, USB Type-C to USB Type-C) |                                                                                                         |                                                                                                         |

Specifications are subject to change without notice.

For the most up-to-date specs, go to [www.support.flir.com](http://www.support.flir.com)

**Figura A3-1. Especificaciones cámaras termográficas FLIR Exx-Series. Las especificaciones sobre la cámara utilizada en este proyecto (FLIR E85) se encuentran en la columna central [61]**

## ANEXO IV: PROCEDIMIENTO PARA EL USO DE FLIR E85

### Quick start guide

---

Follow this procedure:

1. Put a battery into the battery compartment.
2. Connect the USB battery charger to the USB connector at the top of the camera.
3. Charge the battery for 2 hours before starting the camera for the first time.
4. Insert a memory card into the card slot at the top of the camera.

**Note** Empty or use a memory card that has not previously been used in another type of camera. The cameras may organize files differently on the memory card. There is therefore a risk of losing data if the same memory card is used in different types of cameras.

5. Push the on/off button  to turn on the camera.
6. Follow the instructions on the camera screen to configure your camera. You can, for example, select the language, units, and date and time formats.

You can also set up the camera to upload images for storage online. To enable upload of images, you need to connect the camera to a Wi-Fi network and pair the camera with a FLIR Ignite account. Use a computer or other device with internet access and follow the instructions on the camera screen.

**Note** You can do all the settings as a part of the initial setup of the camera or later at any time via the Settings menu.

7. To enable automatic upload of images, select  (Settings), sign in to FLIR Ignite, and set the Auto upload switch to On.
8. Aim the camera toward the object of interest.
9. Adjust the infrared camera focus by rotating the focus ring.

**Note** It is very important to adjust the focus correctly. Incorrect focus adjustment affects how the image modes work. It also affects the temperature measurement.

10. Pull the trigger to save an image.
11. If automatic upload is enabled, new images will automatically be uploaded to your FLIR Ignite account when the camera is connected to the internet. You can also upload images manually. To access your FLIR Ignite account, go to <https://ignite.flir.com>. You can also move images from the camera using the USB cable or the memory card.

12. Import the images into a FLIR Thermography software and create an inspection report.

## To keep in mind

---

- Adjust the focus first. When the camera is out of focus, the measurement will be wrong.
- By default, most cameras adapt the scale automatically. Use this mode first, but do not hesitate to set the scale manually.
- A thermal camera has a resolution limit. This depends on the size of the detector, the lens, and the distance to the target. Use the center of the spot tool as a guide to the minimum possible object size, and get closer if necessary. Make sure to stay away from dangerous areas and live electrical components.
- Be careful when holding the camera perpendicular to the target. Be observant of reflections, especially at low emissivities—you, the camera, or the surroundings may become the main source of reflection.
- Select a zone of high emissivity, e.g., an area with a matte surface, to perform a measurement.
- Blank objects, i.e., those with low emissivities, may appear warm or cold in the camera, because they mainly reflect the environment.
- Avoid direct sunlight on the details that you are inspecting.
- Correctly analyzing an infrared image requires professional knowledge about the application.
- Various types of faults, e.g., those in a building's construction, may result in the same type of thermal pattern.

[57]

## ANEXO V: SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO EQUIPO LABSYS EVO

El dispositivo a tratar está equipado con un módulo que se puede mover tanto hacia arriba como hacia abajo, y que aloja los crisoles. Una vez encendido, para desplazar este módulo, se debe presionar el botón ubicado en el lado izquierdo del equipo y, al mismo tiempo y sin soltar el primero, pulsar el botón correspondiente en el lado derecho: hacia arriba para elevar el módulo y hacia abajo para descenderlo [62].

De forma general, la secuencia para realizar un ensayo termogravimétrico es la siguiente:

1. **Preparación de la muestra:** Se prepara la muestra sólida y se coloca en un recipiente adecuado que se introduce en el equipo.
2. **Calibración del equipo:** Antes de comenzar las pruebas, es crucial calibrar el equipo para asegurar mediciones precisas de temperatura y cambios de masa.
3. **Establecimiento de parámetros:** Se establecen los parámetros de la prueba, como la velocidad de calentamiento y el rango de temperatura deseado.
4. **Inicio de la prueba:** Una vez que se han configurado los parámetros, se inicia la prueba y el equipo comienza a calentar la muestra gradualmente.
5. **Registro de datos:** Durante la prueba, el equipo registra continuamente la temperatura y la masa de la muestra. Estos datos se utilizan para trazar curvas termogravimétricas, que muestran cómo cambia la masa de la muestra con respecto a la temperatura.
6. **Análisis de resultados:** Después de completar la prueba, se analizan los datos recopilados para identificar cambios de fase o cualquier otro evento relevante en la muestra.
7. **Interpretación y conclusiones:** Se interpretan los resultados obtenidos y se sacan conclusiones sobre la estabilidad térmica, la composición de la muestra y otros aspectos.

Una vez finalizada la prueba y realizadas las evaluaciones pertinentes, se debe limpiar el equipo y apagarse correctamente para su próximo uso.