



TRABAJO FIN DE MÁSTER
MASTER-AMAIERAKO LANA
FINAL MASTER'S DISSERTATION

Caracterización multi-analítica del material
volcánico de Pompeya y su empleo en nuevos
morteros para la conservación del patrimonio
construido.

Josu Sánchez Chica

2018/2019

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Autorización del director para la presentación del Trabajo fin de máster

El Dr. Kepa Castro Ortiz de Pinedo profesor del máster “Gestión del Paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad” autoriza la presentación del Trabajo fin de máster titulado

Caracterización multi-analítica del material volcánico de Pompeya y su empleo en nuevos morteros para la conservación del patrimonio construido que ha sido realizado por Josu Sánchez Chica bajo su dirección.

En, Leioa, a 06 de Septiembre de 2019



Autorización del director para la presentación del Trabajo fin de máster

El Dr. Marco Veneranda profesor del máster “Gestión del Paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad” autoriza la presentación del Trabajo fin de máster titulado

Caracterización multi-analítica del material volcánico de Pompeya y su empleo en nuevos morteros para la conservación del patrimonio construido que ha sido realizado por Josu Sánchez Chica bajo su dirección.

En, Leioa, a 06 de Septiembre de 2019

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Convenio europeo del Paisaje	1
1.2 Patrimonio cultural.....	2
1.3 Conservación del patrimonio cultural tangible.	5
1.4 El rol de la química analítica en la conservación del patrimonio cultural.....	5
1.4.1 Identificación de los materiales originales	6
1.4.2 Caracterización de los procesos de degradación	7
1.4.3 Desarrollo de nuevos métodos o productos que puedan facilitar la conservación del patrimonio.	9
1.5 Pompeya como caso de estudio.	10
1.5.1 El Parque Arqueológico de Pompeya	10
1.5.2 Morteros y cementos Pompeyanos.	14
1.5.3 Degradación de los morteros y cementos Pompeyanos.....	16
2. Objetivos.....	18
3 - Procedimiento experimental	19
3.1 Materias primas	19
3.1.1 Ceniza volcánica del Vesubio	19
3.1.2 Lapilli blanco y gris del Vesubio.....	20
3.1.3. Cenizas volcánicas de referencia	20
3.1.4 Cal apagada	21
3.1.5 Arena normalizada	21
3.1.6 Agua milliQ.....	21
3.2 Instrumentación	21

3.2.1 Difracción de Rayos X (XRD)	22
3.2.2 Espectroscopía Raman	22
3.2.3 Fluorescencia de Rayos X (ED-XRF)	23
3.2.4 Cromatografía Iónica	23
3.2.5 Ensayos mecánicos	25
4. Resultados y Discusión	27
4.1 Caracterización de las materias primas:	27
4.1.1 Difracción de Rayos X (XRD)	27
4.1.2 Espectroscopia Raman	30
4.1.3 Fluorescencia de Rayos X (ED-XRF)	39
4.2 Preparación de las probetas	40
4.3 Caracterización de las probetas	43
4.3.1 Ensayos mecánicos	43
4.3.2 Difracción de Rayos X (XRD)	46
4.3.3 Espectroscopia Raman	50
4.3.4 Cromatografía iónica	52
5.- Conclusiones	55
6.- Trabajos futuros	57
7.- Bibliografía	58

1. Introducción

1.1 Convenio europeo del Paisaje

Definir el paisaje siempre ha sido una tarea complicada ya que se trata de un término muy amplio y complejo que depende de diversos factores, como pueden ser la disciplina y el pensamiento epistemológico desde el que se enfoque¹. De forma general, solo se tenían en cuenta los elementos culturales y naturales, considerándolos como los elementos más relevantes para su definición. Una forma de ver la evolución que ha tenido el concepto de paisaje son las grandes cantidades de congresos, convenciones, cartas que se han ido elaborando a lo largo del tiempo, cada uno aportando su grano de arena en la búsqueda del concepto de Paisaje. Algunos ejemplos son el Convenio de Benelux (1982)², La Carta del Paisaje Mediterráneo (Sevilla, 1992)³, Directiva Hábitats (1992)⁴ donde se destaca la creación de la Red Natura 2000, promoviendo la conservación de la biodiversidad, protegiendo a las especies y hábitats de toda Europa. Sin embargo, ninguna de estas actuaciones supuso un gran cambio en la manera de entender el paisaje, ni mucho menos en la forma de legislarlo. Pero todo esto cambió cuando, a finales del año 2000, los estados miembros de la Unión Europea se reunieron en la ciudad italiana de Florencia para participar en lo que se conocería como “El Convenio Europeo del Paisaje (CEP)” o “El Convenio de Florencia”. El documento conclusivo elaborado en este convenio supuso un antes y un después en lo que respecta a la definición de paisaje, ya que cambió completamente la forma en la que se percibía y dio nuevas pautas para su protección, gestión y ordenación. Lo más innovador fue la propia definición de Paisaje, entendido como “Cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos”⁵. Con esta definición se dio entrada a la subjetividad, abriendo las puertas para que cualquier zona que nos rodee se le pueda considerar Paisaje. No obstante, la subjetividad es un arma de doble filo, por lo que una misma región del espacio será paisaje y no lo será al mismo tiempo, dependiendo del observador. Por ello, podemos encontrarnos con que “todo” y “nada” es paisaje.

Dentro de la conservación del paisaje, se detalla la conservación del patrimonio cultural y natural. Estos dos tipos de patrimonio son parte del paisaje, proporcionan diversidad y, lo más importante, aportan identidad a un espacio concreto. Este trabajo se centra sobre todo en el patrimonio cultural, por lo que únicamente se definirá dicho término.

1.2 Patrimonio cultural

El término patrimonio cultural es una expresión de las maneras de vivir desarrolladas por una comunidad y traspasadas de generación en generación, incluyendo sus costumbres, prácticas, lugares, objetos, expresiones artísticas y valores⁶. En palabras de la UNESCO, los bienes que lo conforman son “inestimables e irremplazables”, pues representan un testimonio y una simbología histórico-cultural únicos.

Reconociendo la importancia histórica, social y cultural del patrimonio, en las últimas décadas se ha intensificado el debate relativo a su correcta definición y determinación. Uno de los primeros resultados de este debate internacional es representado por la estipula de la *Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural*, aprobada por la UNESCO en el año 1972 en la capital Francesa, París. En dicha convención se acordó que se entenderá como patrimonio cultural⁷:

-Los monumentos: “obras arquitectónicas, de escultura o de pintura monumentales, elementos o estructuras de carácter arqueológico, inscripciones, cavernas y grupos de elementos, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia”.

-Los conjuntos: grupos de construcciones, aisladas o reunidas, cuya arquitectura, unidad e integración en el paisaje les dé un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia.

-los lugares: obras del hombre u obras conjuntas del hombre y la naturaleza así como las zonas, incluidos los lugares arqueológicos que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, estético, etnológico o antropológico.

Por otra parte, también se definió el patrimonio natural:

Los monumentos naturales constituidos por formaciones físicas y biológicas o por grupos de esas formaciones que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista estético o científico,

Las formaciones geológicas y fisiográficas y las zonas estrictamente delimitadas que constituyen el hábitat de especies, animal y vegetal, amenazadas, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista estético o científico,

Los lugares naturales o las zonas naturales estrictamente delimitadas, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la ciencia, de la conservación o de la belleza natural.

Este documento, adoptado por todos los estados miembros de la UNESCO, fue acompañado por la Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial⁸, celebrada en París en el año 2003. En esta convención se hace por primera vez distinción entre patrimonio cultural tangible e intangible. Por un lado el patrimonio cultural tangible incluye los edificios y lugares históricos, monumentos, artefactos, etc., que puedan ser consideradas dignas para la preservación en un futuro⁹. Esto incluye objetos relevantes para la arqueología, arquitectura, ciencia y tecnología de una determinada cultura.

Por el otro lado, el término de patrimonio cultural intangible hace referencia a los usos, representaciones, expresiones, conocimientos y técnicas junto con los instrumentos, objetos, artefactos y espacios culturales que les son inherentes. Que las comunidades, los grupos y en algunos casos los individuos reconozcan como parte integrante de su patrimonio cultural.

Además, junto con el concepto de patrimonio cultural intangible se determinó su unión indisoluble con otro tipo de patrimonios: El cultural y el Natural¹⁰.

Estos dos últimos instrumentos fueron complementados por parte de la UNESCO en el año 2005 con la Convención sobre la Protección y Promoción de la Diversidad de las Expresiones Culturales, que tiene como finalidad proteger la diversidad de las expresiones culturales.

Estas tres convenciones constituyen los principales instrumentos legislativos para el reconocimiento y la protección del patrimonio material e inmaterial. Sin embargo, en los últimos años se han ido añadiendo nuevas declaraciones, tanto a nivel nacional como internacional, para mejorar la preservación del patrimonio cultural. Unos ejemplos son la Convención sobre La Protección del Patrimonio Cultural Subacuático¹¹ y la Declaración de Yamato sobre Enfoques Integrados para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Material e Inmaterial¹²

Como este proyecto se centra principalmente en la importancia del patrimonio cultural tangible, se definirá con mayor profundidad, describiendo la subdivisión existente, centrada en la movilidad de los elementos., conocidos como patrimonio cultural inmueble y mueble.

El primero de ellos hace referencia a los elementos que no pueden ser desplazados, como son los monumentos, los conjuntos de edificios y los propios lugares. Es decir, aquellos lugares que presentan un nexo de unión con el lugar que ocupan y que no pueden ser cambiado. Por la otra parte, el patrimonio cultural mueble hace referencia a los elementos que sí pueden ser transportados, tales como los libros, obras de arte, manuscritos, documentos, instrumentos musicales, objetos arqueológicos (utensilios con valor histórico) entre otros.

Finalmente, en la **Figura 1** se puede observar una clasificación esquemática del patrimonio cultural.

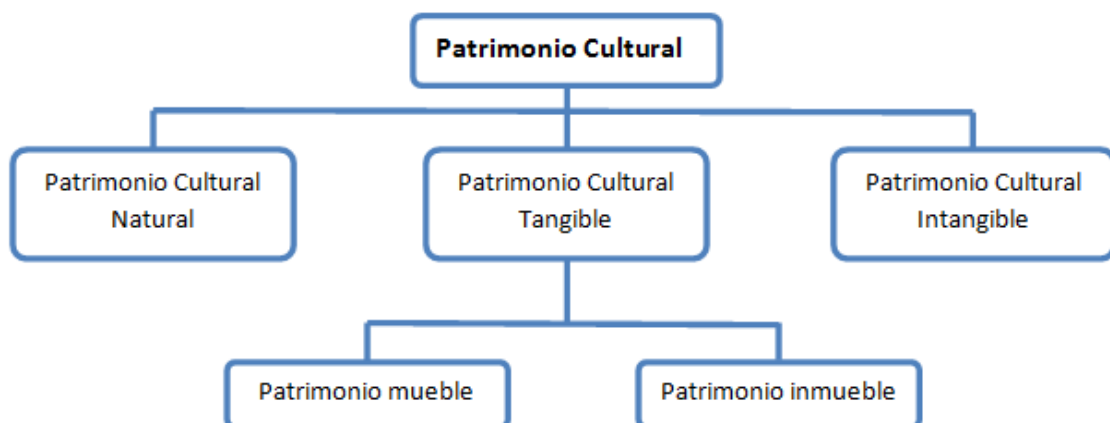


Figura 1 Clasificación esquemática del patrimonio cultural.

1.3 Conservación del patrimonio cultural tangible.

Las convenciones mencionadas anteriormente tienen como objetivo principal salvaguardar y preservar el patrimonio de la degradación y destrucción asegurando la transmisión de sus valores históricos y culturales para las futuras generaciones.

En este ámbito, cabe destacar que las tareas de conservación han ido teniendo distintos enfoques a lo largo de la historia. En un principio eran tareas que buscaban el arreglo de los bienes desgastados por su uso continuado o por su disfrute estético.

A lo largo de los siglos XIX y XX se desarrollaron diferentes teorías sobre la manera óptima de conservar el patrimonio cultural, algunas de las cuales basadas en conceptos y métodos de intervención diametralmente opuestos. Entre ellas, la teoría sobre la cual se basa el moderno concepto de conservación y puesta en valor del patrimonio cultural es conocida como “restauración científica”¹³. Según esta teoría, para una correcta intervención, es necesario conocer el bien a tratar desde distintos puntos de vista, como pueden ser su historia, los materiales que lo componen y, por supuesto, sus correspondientes problemas de conservación. Teniendo en cuenta que los innumerables aspectos a evaluar para la correcta conservación del patrimonio implican la colaboración de expertos en diferentes ámbitos científicos y técnicos, en las últimas décadas se ha ido remarcando la importancia de la colaboración interdisciplinar¹⁴. Distintos profesionales de distintas profesiones: arquitectos, arqueólogos, químicos, biólogos, físicos y geólogos colaborarían con el propósito de determinar y transmitir a los conservadores cuales son los mejores materiales y métodos que hay que aplicar para preservar el patrimonio construido de manera ideal.

1.4 El rol de la química analítica en la conservación del patrimonio cultural

Como se ha mencionado anteriormente, la restauración científica engloba todo tipo de actividades científicas dedicadas al estudio del patrimonio cultural¹⁵. Dichas actividades vienen dadas por una serie de disciplinas científicas, como pueden ser la biología, arquitectura, física, arqueología y la química entre otras.

Todas las disciplinas mencionadas juegan un papel crucial en la preservación del patrimonio cultural. En este caso nos centraremos en la aportación de la química analítica, pudiendo dividirse en tres niveles diferentes:

1.- Identificación de los materiales originales.

2.- Caracterización de los procesos de degradado.

3.-Desarrollo de nuevos métodos o productos que puedan facilitar la conservación del patrimonio.

A continuación, se irá desarrollando la descripción de los distintos niveles.

1.4.1 Identificación de los materiales originales

Conocer la composición original de los materiales es de vital importancia para garantizar la integridad del patrimonio construido¹⁶. La información obtenida a través de los estudios de caracterización de los materiales originales facilita el trabajo de los conservadores y aporta un conocimiento más profundo sobre los orígenes y la historia del edificio en cuestión. Cabe destacar que, cuanto más se conozca sobre ellos, más fácil será determinar las posibles vías de degradación que puedan generarse a raíz de la interacción con el medio ambiente o con otros materiales.

De este conocimiento se pueden extrapolar valiosos datos, como pueden ser las informaciones relacionadas con los materiales y las técnicas productivas empleadas en el pasado, las posibles rutas de comercio establecidas en aquella época (estudios de proveniencia)¹⁷ y la evolución temporal de técnicas y estilos.

Dichos trabajos de caracterización pueden llevarse al cabo mediante el uso de una multitud de técnicas analíticas. Éstas han evolucionado increíblemente en las últimas décadas, ya que en pasado solo existía instrumentación de laboratorio, por lo que era imprescindible el muestreo de las piezas a estudiar, siendo en muchos casos imposible por su alto valor cultural. No obstante, debido a la miniaturización de los aparatos electrónicos, se han realizado grandes avances en el desarrollo de técnicas analíticas portátiles que permiten llevar el propio laboratorio a la zona de estudio.

La instrumentación portátil supuso un gran avance en estos trabajos de caracterización, ya que en muchos casos permite caracterizar los materiales originales sin necesidad de muestrear o dañar los materiales.

Actualmente existen diversas técnicas portátiles según la propia finalidad de los estudios. Para la caracterización mineralógica de los materiales una de las técnicas más empleada es la difracción de rayos X (XRD), aunque su uso suele ser más común a nivel de laboratorio^{18,19}. Para complementar dichos análisis se suelen emplear dos técnicas espectroscópicas. Por un lado, la espectroscopia Raman es una técnica molecular que viene frecuentemente empleada al fin de complementar los análisis mineralógicos^{20,21}. Por el otro lado, la Fluorescencia de Rayos X suele ser empleada para obtener informaciones sobre la composición elemental de los materiales^{22,23}.

1.4.2 Caracterización de los procesos de degradación

El Patrimonio Cultural puede deteriorarse siguiendo múltiples vías de degradación. Por ello, una de las principales tareas de los científicos es caracterizar los productos de degradación e identificar las posibles causas detrás de su formación.

Como ha sido verificado en numerosos casos de estudio, la mayoría de los procesos de alteración suelen generarse a causa de 1) la interacción de los materiales con el ambiente externo y 2) el uso de prácticas de conservación inapropiadas.

En el primer caso, los factores ambientales como pueden ser la temperatura, la humedad, los componentes disueltos en la lluvia, el aire y el viento juegan un rol clave en la aparición de procesos de degradación. Las patologías más comunes son desencadenadas por los contaminantes naturales y antropogénicos. En el caso de las obras de arte, éstas se ven perjudicadas por la materia particulada²⁴ presente en el aire, la cual se deposita en las obras, produciendo pátinas oscuras sobre el mural. Por otro lado, los gases ácidos como son el CO₂, SO_x y NO_x se disuelven en el agua de lluvia, provocando una reacción con los materiales carbonatados de la mayoría de los edificios antiguos, los cuales se disuelven desembocando en la pérdida de material. Por el otro lado, dichas sales pueden cristalizar llevando a la precipitación de sales (eflorescencias y cripto-eflorescencias²⁵) como se puede observar en la **Figura 2**.



Figura 2 Pared mostrando serios daños por la eflorescencia salina.

Actualmente, para la caracterización de estas degradaciones se emplean precisamente las técnicas difractométricas y espectroscópicas mencionadas anteriormente. Por ejemplo, la espectroscopia Raman se emplea para observar los cambios moleculares producidos en los materiales originales, y los productos de degradación generados. Por otra parte, la fluorescencia de rayos X se emplea para determinar cambios en la composición elemental, como puede ser un aumento o disminución en la concentración de alguno de los elementos. Un ejemplo es el estudio llevado a cabo por el grupo de investigación IBeA en Pompeya para la caracterización de la degradación del rojo hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) a magnetita (Fe_3O_4), provocada por la reacción con el SO_2 atmosférico²⁶.

Además de técnicas difractométricas y espectroscópicas, hay numerosos instrumentos que pueden ser empleados para definir los procesos de alteración y su origen. Por ejemplo, la cromatografía iónica se usa para estudiar las sales solubles que contienen los materiales del patrimonio construido y los suelos, con el fin de identificar la naturaleza y el origen de aquellas sales que producen la eflorescencia salina²⁷. U otro ejemplo, sensores de contacto adheridos a las superficies de los elementos patrimoniales pueden ayudar a monitorear parámetros fundamentales como son los valores de humedad y temperatura.

Por la otra parte, los procesos de degradación asociados a las malas prácticas suelen ocurrir de manera inintencionada. A menudo ocurren durante la aplicación de los

trabajos de restauración y están relacionado con el uso materiales inadecuados, siendo incompatibles con los compuestos originales, desencadenando su degradación.

Por ejemplo, algunos polímeros sintéticos (plásticos) que en pasado han sido empleados como consolidantes, a largo plazo han resultado ser la causa de daños estéticos (cambio de color) y químicos (variaciones cromáticas, retención de suciedad y modificaciones en la permeabilidad) muy difícil de sanar²⁸.

1.4.3 Desarrollo de nuevos métodos o productos que puedan facilitar la conservación del patrimonio.

Dentro de la nueva metodología para la restauración, los nuevos puntos de mira están centrados en el desarrollo de nuevos materiales de conservación, más compatibles con los materiales originales y con una mayor eficacia. Por otra parte, debido a la incompatibilidad de algunos materiales de restauración actuales, existen grupos de investigación intentando recuperar las técnicas de producción de materiales antiguos, evitando así este problema.

Donde mayor esfuerzo se ha puesto en este tipo de nuevas técnicas ha sido en la conservación de las pinturas murales. Antiguamente, y en la actualidad en algunos casos, se emplean resinas poliméricas. Sin embargo, algunos de estos materiales producían, a la larga, modificaciones físico-químicas en los materiales originales, especialmente en aquellas de origen inorgánico²⁹. Por ello, en los últimos años se han desarrollado métodos de limpieza dedicados, en especial las soluciones micelares. Estos productos permiten eliminar las resinas mencionadas anteriormente junto con los demás compuestos indeseados.^{30,31}

Por otra parte, en temas relacionados para la conservación de materiales pétreos, donde la gran mayoría de ellas están basadas en carbonato cálcico (muy susceptible de ser atacado por los gases presentes en la atmosfera), se han desarrollado nuevos materiales para su conservación. Entre ellos, cabe destacar el empleo de materiales orgánicos, donde brillan las resinas basadas en el bisfenol-A (opción eco-sostenible) presentando mejores propiedades físicas, térmicas y químicas que sus predecesores por la sinergia existente entre los precursores orgánicos e inorgánicos³². También hay

que añadir resinas con nanopartículas de TiO_2 dispersas, confiriendo propiedades hidrofóbicas y autolimpiantes.

Además, la química analítica también juega un rol clave en la optimización de productos ya existentes. Un ejemplo claro es la optimización de una de las resinas que se emplea en la conservación de pinturas murales: el Paraloid B-72, mediante incorporación de nanopartículas de SiO_2 para acentuar la hidrofobicidad de la resina y evitar la penetración del agua³³.

1.5 Pompeya como caso de estudio.

1.5.1 El Parque Arqueológico de Pompeya

La antigua ciudad de Pompeya (Nápoles, Italia) es uno de los yacimientos arqueológicos más importantes del mundo. La ciudad romana, debido a sus valores históricos, culturales y artísticos fue nombrada Patrimonio de la humanidad por la UNESCO en el año 1997³⁴.

La ciudad fue edificada cerca del mar, concretamente en el valle de río Sarno (**Figura 3**), siendo ésta una posición estratégica desde la cual se podía controlar todas las vías de acceso a la ciudad: las carreteras, el río y el mar. Además, se erigió un importante puerto comercial, aportando riqueza económica a la ciudad.



Figura 3. Mapa de la zona de Campaña y el golfo de Nápoles, mostrando la localización del monte Vesuvio y Pompeya.

Los pueblos que habitaron esta región se remontan al período neolítico, los Opicianos, siendo estos los primeros residentes. Más tarde, la hegemonía de la ciudad se vería

disputada entre los Etruscos y los Griegos, siendo estos últimos los vencedores en la batalla de Cuma en el año 474 a.C. Pero esta dominación duraría únicamente 4 siglos, hasta cuando los Samnitas se apoderaron de la zona gradualmente. Sin embargo, las idas y venidas de pueblos gobernantes no acabarían hasta la llegada de los Romanos, en el siglo IV a.C. Durante este período, Pompeya se vería “romanizada” desarrollándose a nivel cultural, económico y político como ciudad.

La zona donde se erigió Pompeya se encuentra ubicada en una zona tectónicamente activa. En el año 62 d.C. ocurrió un terremoto que destruyó gran parte de la ciudad, dando pie a la reconstrucción de la misma con un completo estilo romano, el cual se puede observar a día de hoy. Sin embargo, 17 años después de este evento tendría lugar la erupción que enterraría la ciudad hasta nuestros días.

La erupción del Monte Vesubio tuvo lugar en agosto de 79 d.C, aunque recientes descubrimientos determinan la fecha en las primeras semanas de noviembre. Toneladas de ceniza, lapilli y escombros fueron expulsados por el volcán, ocasionando el enterramiento de la ciudad bajo varios metros de material volcánico³⁵. Sin embargo, de las catástrofes surgen las mejores condiciones para la conservación. El material volcánico ha jugado un rol clave en la preservación de la ciudad, sellando la ciudad y actuando de escudo a los factores de degradación provenientes del exterior.

El proceso por el cual el material volcánico actuó como material protector fue mediante el proceso de cementación³⁶ que sufrió la capa superior de material volcánico al estar en contacto con el exterior, lo que dió lugar a la formación de un estrato solido denominado “tuono”.

Las primeras excavaciones de la ciudad datan de 1748³⁷ (**Figura 4**) desde entonces se han desenterrado más de 2/3 de la ciudad, permitiendo comprender a los investigadores la arquitectura, el arte y la sociedad romana desde primera mano, sin necesidad de basarse en documentos.

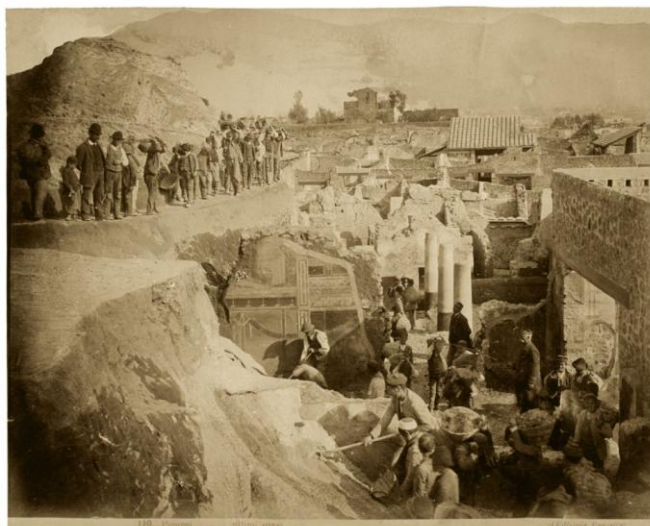


Figura 4 Primeros documentos gráficos de las excavaciones de Pompeya.

Sin embargo, como se ha mencionado, el material volcánico era el encargado de proteger la ciudad de los factores externos, sin el, la ciudad comenzó a sufrir serios procesos de deterioro, provocados por el contacto entre los materiales originales y una de las atmosferas más contaminadas de Europa, la bahía de Nápoles. Por ejemplo, en los últimos 270 años las pinturas murales de Pompeya han sufrido diversos procesos de degradación. Entre ellos se encuentran las reacciones ácido-base entre los gases atmosféricos y los materiales de la pared, erosión por parte de la lluvia y el viento, eflorescencia salina de las sales solubles y la acción de agentes biológicos³⁸.

A nivel de investigación IBeA es, basándonos en la “Scopus citation database”, el grupo de investigación con mayor número de artículos científicos que tratan sobre el estudio analítico del patrimonio pompeyano y de sus problemas de conservación, siendo unos ejemplos el proceso de ennegrecimiento de los pigmentos^{39,40} y el deterioro de los únicos espejos encontrados en la ciudad de Pompeya (En la casa de Gilded Cupids, Regio VI, insula 16,7,38)⁴¹, entre otros⁴².

Por otra parte, a pesar de que 1/3 de la ciudad sigue bajo el material volcánico, los graves problemas de conservación que presentan las áreas excavadas han hecho que en las últimas décadas, la dirección del parque haya destinado la mayoría de sus fondos hacia la financiación de proyectos de conservación en vez de en la realización de nuevas excavaciones arqueológicas.

Sin embargo, las obras que hoy en día se están llevando a cabo para reducir la inestabilidad del frente de excavación, ha desembocado en el descubrimiento de nuevas pinturas murales. La monitorización del estado de conservación de dichas pinturas demuestra de manera clara la rapidez con la cual los procesos de degradación pueden causar el deterioro de los materiales originales. Un ejemplo evidente es proporcionado por el fresco de “Leda y el Cisne” (encontrado en la región inexplorada V de Pompeya, en noviembre de 2018) donde, como se enseña en la comparación de **Figura 5**, eflorescencia salinas han recubierto la superficie del fresco a los pocos días de ser excavado.



Figura 5 Fresco de “Leda y el Cisne” con visibles marcas de eflorescencia salina tras varios días al contacto con el exterior.

Por último, cabe destacar que estudios anteriores demuestran que hay numerosos casos en los cuales el cemento portland ha sido empleado en la conservación de pinturas murales Pompeyanas. Sin embargo, ha sido demostrado que los resultados no fueron los esperados, obteniendo más trabas que soluciones. Esto es debido principalmente a la diferencia en la composición de los morteros. Estas diferencias se basaban en factores físico-mecánicos, como por ejemplo: la dureza, la resistencia mecánica y la expansión térmica. Además, presenta un elevado contenido en sales, traduciéndose en una alta tendencia a promover la eflorescencia de las mismas⁴³, y en

su uso en exteriores no ha sido lo más efectivo, dejando claro que su viabilidad en esta tarea queda descartada.

1.5.2 Morteros y cementos Pompeyanos.

Para solventar los problemas de restauración observados en la ciudad arqueológica de Pompeya surgieron diversos proyectos de índole internacional, entre ellos el proyecto Analytica Pompeiana Universitatis Vasconicae (APUV), surgido tras la firma del convenio, en el año 2015, del grupo de investigación IBeA con el Parque Arqueológico de Pompeya. Dentro de este proyecto existen diversas líneas de actuación. Por una parte, la caracterización, para su catalogación y puesta en valor, de la colección de los pigmentos y colorantes conservados en Pompeya. Por la otra, el planteamiento de un proyecto de investigación conjunto destinado a la caracterización y diagnóstico de los materiales de construcción, de las pinturas y de los mosaicos que decoran las casas Pompeyanas. Sin embargo, debido al continuo deterioro observado en la ciudad, se abrió una nueva línea de investigación a la cual me estoy dedicando: Desarrollar nuevos morteros para la restauración empleando el material volcánico del Vesubio como material puzolánico, e inspirándose a la receta del “opus caementicium” Vitruviano.

El término general de mortero puede definirse como la mezcla obtenida mediante la combinación de un conglomerante inorgánico (cal, cemento, yeso, arcillas...) árido y agua en las correctas proporciones, permitiendo que la masa resultante sea trabajable cuando está fresca, con unas propiedades físico-químicas aceptables (resistencia a la rotura, deformabilidad, adherencia, porosidad y permeabilidad al agua, entre otras) y que tras el proceso de endurecimiento, presente cierta resistencia en función del trabajo a desarrollar⁴⁴.

Los morteros empleados en albañilería, desde la antigüedad hasta el comienzo del siglo XX, han sido materiales basados en constituyentes naturales como la cal y las arenas naturales⁴⁵. Históricamente, uno de los primeros ejemplos de estos materiales fue el opus caementicium (cemento romano). un material inventado por los Romanos y cuyo proceso de fraguado se realizaba mediante la reacción puzolánica entre ceniza

volcánica (CV), hidróxido de calcio y agua. El método de preparado se expone en el libro “Tratado de Arquitectura” el cual expone lo siguiente: (una unidad de cal/tres de arena; dos unidades de cal/cinco de arena, dependiendo el tipo de arena) “Si la arena fuese de mina, a tres pares de ella se pondrá una de cal, incorporándolo todo bien; y si fuese de río ó mar, á dos partes de arena, una de cal: esta regla es la que debe seguirse en la composición del mortero” (Libro II Cap. VI).⁴⁶

Por ello, debido al rol clave que desempeñan los cementos y morteros en la estabilidad de las estructuras Pompeyanas y de las pinturas murales que en ellas se conservan, diversos grupos de investigación han dedicado sus esfuerzos en la caracterización de los materiales originales empleados en el parque Arqueológico. Los resultados de los mismos han confirmado que, efectivamente, el material puzolánico empleado en la elaboración de cementos y morteros Pompeyanos corresponde a la ceniza volcánica procedente del monte Vesubio⁴⁷.

Por otra parte, trabajos de arqueología experimental han demostrado que los cementos romanos que usan ceniza volcánica como material puzolánico presentan excelentes propiedades mecánicas, que a veces superan las del cemento Portland moderno (material de construcción por excelencia actualmente). En dichos trabajos, cabe destacar los trabajos de M.J. Jackson, los cuales han determinado que la gran longevidad de los cementos romanos son fruto de un aglutinante de calcio, aluminio y silicato de calcio hidratado (C-A-S-H) (reacción entre el material volcánico y el agua) en la matriz de cementación del mortero, el secuestro de iones cloruro y sulfato dentro de la microestructuras cristalinas de la matriz, y por último, la cristalización de minerales de zeolita y Al-tobermorita⁴⁸.

Gracias a estos estudios es posible deducir que, tras una detallada optimización basada en datos analíticos y experimentales, se podría plantear la re-proposición del antiguo cemento romano como producto a emplear en la consolidación y conservación de las estructuras Pompeyanas.

1.5.3 Degradación de los morteros y cementos Pompeyanos.

Como se ha mencionado anteriormente, tras la retirada del material volcánico la ciudad empezó a padecer los primeros síntomas de deterioro y degradación. Dichos problemas están directamente relacionados con los materiales de construcción, en este caso los cementos y los morteros.

De nuevo, cabe remarcar que el deterioro observado en Pompeya viene dado por procesos tanto físicos como químicos, entre los que se destacan los ya mencionados erosión provocada por las lluvia y el viento, el incremento de la humedad, la precipitación de sales, la acción de agentes biológicos y la atmósfera contaminada de la bahía de Nápoles, rica en gases de efecto invernadero como son los SO_x , CO_2 y NO_x , que a su vez, promueven la eflorescencia de carbonatos, nitratos y sulfatos (indicadores de degradación). Además, estos gases también interactúan con los pigmentos de los murales en un proceso de cambio de color, degradación y pérdida del pigmento⁴⁹

El conjunto de factores mencionados causa la progresiva alteración de los morteros y cementos pompeyanos, lo que puede llevar al desprendimiento de los frescos y la pérdida de la integridad estructural de los edificios donde se albergan. En algunos casos, dichas alteraciones han sido tan intensas como para inducir al derrumbe de las casas, tal y como ocurrió en el año 2010, en el edificio conocido como *Schola Armatorum* (lugar donde los gladiadores se reunían tras la batalla). (Figura 6) y más recientemente, en 2013, con la caída de un muro en la llamada casa 21.



Figura 6 Restos de la casa *Schola Armatorum*

Por ello, los trabajos de restauración y conservación de la ciudad se han incrementado en los últimos años, en un intento de evitar casos como los anteriores.

Uno de los grandes proyectos que enfocan la conservación de los edificios propensos a su caída es el conocido como: “El Proyecto Gran Pompeya”⁵⁰. Surgiendo de una iniciativa del gobierno Italiano, que promulgó en 2011 un Decreto Ley con el objetivo de mejorar la eficacia de las acciones e intervenciones para proteger el área arqueológica de Pompeya mediante el desarrollo de un programa especial urgente de conservación, mantenimiento y restauración.

Presenta financiación a nivel europeo, con más de 105 millones provenientes del FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo regional) junto con fondos a nivel nacional. El proyecto presenta como objetivo los siguientes puntos: i) Reducción del riesgo hidrogeológico al asegurar los terraplenes no excavados; ii) La seguridad de las insulae (edificios) para evitar los derrumbamientos; iii) Consolidación y restauración de la mampostería y de las superficies decoradas; v) Protección de los edificios contra las inclemencias del tiempo y por último, vi) refuerzo del sistema de videovigilancia.

Considerando que el uso de cemento Portland queda descartado por su incompatibilidad con los materiales originales, la solución adoptada por el parque arqueológico consiste en hacer uso de cementos puzolánicos similares a los de los romanos, empleando ceniza volcánica comercial.

2. Objetivos

En lo relacionado con el material volcánico de Pompeya, he realizado una caracterización analítica (mediante Raman, XRD, XRF e ICP) de la ceniza y de una antigua estratigrafía de Pompeya durante la realización del último curso académico del grado en Química, como trabajo fin de Grado. Comparando el conjunto de datos recolectados con los estudios analíticos presentes en bibliografía, fue posible determinar que la composición mineralógica del material volcánico que sepultó Pompeya es muy similar al material puzolánico empleado por los romanos en la fabricación de los cementos y morteros Pompeyanos.

Por otra parte, como ha sido mencionado anteriormente, cabe destacar que hoy en día se está llevando al cabo la reforma del frente de las excavaciones, lo que está generando la excavación y acumulación de toneladas de material volcánico.

Teniendo en cuenta estos dos aspectos, este proyecto tiene el fin de averiguar la empleabilidad del material volcánico que sepultó la ciudad de Pompeya como materia prima en el desarrollo de nuevos morteros de conservación compatibles con estructuras de época Romana.

Para ello, los objetivos parciales planteados en este proyecto son los siguientes:

- 1.- Estudiar el material volcánico de Pompeya mediante técnicas espectroscópicas (Raman, EDXRF) y diffractométricas (XRD) y comparar sus composición con la de dos cenizas volcánicas comerciales.
- 2.- Emplear la ceniza volcánica del Vesubio, los lapilli del Vesubio y las dos cenizas comerciales en la creación de probetas de mortero inspiradas a la antigua formulación Romana descrita por Vitruvio.
- 3- Caracterizar y comparar la composición mineralógica, el contenido de sales solubles y la resistencia mecánica de las probetas.

3 - Procedimiento experimental

3.1 Materias primas

En este apartado se realizará una descriptiva de los materiales empleados en la elaboración del proyecto.

3.1.1 Ceniza volcánica del Vesubio

El muestreo de la ceniza volcánica se llevó a cabo en la Regio V de la ciudad de Pompeya, junto a la casa de Amorini Dorati, por el grupo de investigación IBeA. La zona de muestreo en cuestión se corresponde con un área donde, justo en estos años, se están llevando a cabo las excavaciones relacionadas con la modificación de la pendiente del frente de excavación mencionado anteriormente. Por ello, esto nos permite acceder al material volcánico que nunca había sido expuesto al ambiente externo. Para ser más concretos, el material se recogió por debajo del “tuono”, es decir, por debajo del material cementificado que protegió Pompeya de los procesos de degradación procedentes del exterior. Considerando que presenta un grado de alteración mínimo, este material ha sido seleccionado como el ideal para comprobar la empleabilidad de la ceniza volcánica Vesubiana en la formulación de cementos y morteros.

Para eliminar la humedad presente en la muestra, se ha aplicado un proceso de secado. Para ello, se ha introducido el material en una estufa a 90 °C durante 24 horas.

Como demuestran trabajos previos, el tamaño de partícula tiene un rol fundamental en el carácter puzolánico del material⁵¹⁻⁵³. De hecho, como se explica en el trabajo de Walker et al⁵⁴, al disminuir el tamaño de partícula aumenta la superficie de contacto entre la fase sólida y líquida, siendo esto un factor determinante para optimizar la resistencia final de las probetas. Teniendo en consideración este factor, se procedió a la molienda de la ceniza mediante un molino de bolas (Pulverisette 6 Fritsch) que se empleó a 415 revoluciones por minuto (rpm) durante 20 minutos, en dos tandas, para permitir el buen movimiento de las bolas.

Una vez terminada la molienda, la ceniza fue tamizada empleando un tamizador (Octagon Digital, Endecotts) durante 30 minutos con amplitud 9. En este caso, se recogió el material más fino accesible, siendo menor a 75 micras.

3.1.2 Lapilli blanco y gris del Vesubio

Se muestrearon dos tonalidades distintas de lapilli, una de un color blanquecino y otra más oscura, de color grisáceo. Ambas tonalidades pertenecen a dos estratos distintos de pómez, las cuales presentan un cambio progresivo de color. Esto se debe a que durante la erupción se produjo el vaciado de una cámara de magma con distintas composiciones, siendo de carácter sálico en la parte superior (correspondiéndose al estrato inferior) y máfico en la inferior (dando la última fracción erupcionada)⁵⁵.

El muestreo de ambos tipos de lapilli se realizó en la misma área descrita anteriormente (Regio V, junto a la casa de Amorini Dorati).

Por otra parte, debido al evidente cambio de color en ambos materiales volcánicos, se procedió a realizar su análisis mediante un equipo portátil de XRD⁵⁶. Los resultados obtenidos permitieron determinar que la composición mineralógica entre los dos tipos de lapilli difería exclusivamente por la presencia minoritaria de augita en el material más oscuro.

Actualmente, durante las modificaciones del frente de excavación, los lapilli recuperados se almacenan en el mismo depósito, mezclándose. Por ello, para evaluar el potencial uso del material conservado en dichos depósitos como material de construcción, se decidió emplear los dos tipos de lapilli de manera conjunta para la elaboración de las probetas.

Los lapilli se secaron, molieron y tamizaron en las mismas condiciones que la ceniza volcánica, asegurándonos el menor tamaño de partícula con el fin de obtener la mayor resistencia mecánica final.

3.1.3. Cenizas volcánicas de referencia

Las cenizas volcánicas de referencia, la negra y roja, se obtuvieron de la compañía C.T.S. ESPAÑA, productos y equipos para la restauración (Madrid, España). Así como se

detalla en la ficha técnica de los dos productos, ambos presentan una granulometría muy fina, siendo al 100% $<75\mu\text{m}$.

Siendo materiales comercializados con la finalidad de ser empleados en la formulación de morteros para la conservación del patrimonio, las dos cenizas se consideran como medio ideal para evaluar, mediante comparativa, la posible empleabilidad de las cenizas y lapilli del Vesubio en la formulación de morteros “Romanos”.

3.1.4 Cal apagada

La cal apagada en forma de pasta se obtuvo de la compañía C.T.S. ESPAÑA productos y equipos para la restauración (Madrid, España). Se decidió por este producto en vez de una cal hidráulica natural (NHL), ya que estos últimos contienen arcillas, aportando a la cal propiedades hidráulicas. Por ello, como uno de los objetivos de este estudio es determinar las propiedades hidráulicas de las cenizas, se decidió eliminar dicha contribución mediante el empleo de cal apagada, es decir, cal pura.

3.1.5 Arena normalizada

La arena empleada en la preparación de los morteros se obtuvo del instituto Eduardo Torroja (Madrid, España). Se trata de una arena normalizada destinada a la elaboración de morteros y cementos de construcción a ensayar según la normativa UNE 196-1. Como se describe en la ficha técnica del producto, el material presenta una granulometría entre 2.00 y 0.08 mm y su composición se compone al 98% de cuarzo.

3.1.6 Agua milliQ

Para la elaboración de las probetas y los análisis de cromatografía iónica se empleó agua de tipo I, es decir, de calidad ultra pura (modelo MilliQ, Millipore).

3.2 Instrumentación

En este apartado se describirán las distintas técnicas empleadas para la elaboración del proyecto.

3.2.1 Difracción de Rayos X (XRD)

La difracción de Rayos X (XRD) es una de las técnicas más empleadas en la caracterización de morteros, cementos y de las materias primas correspondientes, pudiendo investigarse las siguientes propiedades: Identificación y cuantificación de fases cristalinas, determinación del grado de cristalinidad de las fases, estructura cristalográfica, orientación y textura de los cristales, análisis de tensiones residuales, etc^{57,58}.

Para este estudio se empleó el difractómetro PANalytical Xpert PRO ubicado en servicios generales de la universidad del País Vasco. El instrumento está equipado con un tubo de cobre ($\lambda_{CuK\alpha_{media}}=1,5418\text{Å}$, $\lambda_{CuK\alpha_1}=1,54060\text{ Å}$ y $\lambda_{CuK\alpha_2}=1,54439\text{ Å}$), goniómetro vertical (geometría Bragg-Brentano), rendija programable de divergencia, intercambiador automático de muestras, monocromador secundario de grafito y detector PixCel. Las condiciones de medida han sido 40 KV y 4 0mA, con un barrido comprendido entre 5 y 90 °2theta.

3.2.2 Espectroscopía Raman

Se ha empleado la espectroscopia Raman como técnica complementaria a la difracción de rayos X, con la finalidad de detectar la eventual presencia de minerales minoritarios adicionales que no se pueden observar por XRD^{59,60}, cuyo límite de detección es entre un 5 y 10% según el tipo de muestra y las propias condiciones de medidas.

En lo referente a los análisis llevados a cabo mediante espectroscopia Raman, se empleó el espectrofotómetro confocal micro-Raman inVia Renishaw (Renishaw, RU). El equipo está acoplado a un microscopio DMLM Leica que incluye objetivos de 5x, 10x, 20x, 50x y 100x, siendo los más empleados el de 50x y 100x. El instrumento implementa varios láseres de excitación (514, 785 y 1064 nm), y un detector de CCD (charge-coupled device).

La interpretación de los espectros se llevó a cabo mediante comparativa con la base de datos RRUFF y empleando los softwares Omnic V.7.2 (Nicolet,EEUU) y WiRE V.4.2 (Renishaw, RU).

Las medidas se llevaron a cabo mediante el láser de 785 nm para evitar el fenómeno de la luminiscencia. El equipo ha sido empleado hasta un 10% de su potencia nominal (< 10 mW) para evitar el quemado de la muestra y posibles fotodegradaciones que darían lugar a cambios de fases. Las condiciones de medida aplicada en este estudio son las siguientes: tiempo de integración entre 1 y 30 segundos, número de acumulaciones (scans), entre 1 y 50 para mejorar la relación señal ruido y rango espectral de análisis entre 100 y 1500 cm^{-1} (zona donde se acumulan las bandas principales de los compuestos relevantes a estudio).

La calibración de los espectrofotómetros Raman se comprobó mediante la banda dada por una placa de silicio metálico ultrapuro (pico principal en 520.5 cm^{-1}).

3.2.3 Fluorescencia de Rayos X (ED-XRF)

La técnica de fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva (ED-XRF) ha sido empleada para complementar los análisis mineralógicos y moleculares con datos de tipos elemental.

Para ello, se ha hecho uso de un espectrofotómetro M4-300+ TORNADO de fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva (ED-XRF, Bruker Nano GmbH, Berlín, Alemania). El instrumento incorpora un tubo de rayos X de rodio (Rh) como fuente emisora de la radiación, lentes policapilares y un detector de deriva de silicio XFlash®. La calibración del equipo se evaluó mediante el análisis de una pieza de zirconio (Zr) de referencia.

Las medidas se realizaron bajo vacío (20 mbar), para facilitar la detección de los elementos más ligeros, ($Z < 11$), empleando para ello una bomba de membrana (MV 10 NT VARIO, Vacuubrand). Los resultados se trataron mediante el software M4TORNADO (Bruker Nano GmbH, Berlín, Alemania).

3.2.4 Cromatografía Iónica

En este estudio se decidió llevar a cabo el estudio de las sales solubles presentes en las probetas de morteros mediante cromatografía iónica, instrumentación que permite

identificar y determinar la concentración de los aniones y cationes solubles en la muestra.

Actualmente no existe ninguna normativa que regule con claridad cuál es la cantidad máxima de sales solubles que un mortero o cemento puede contener. Sin embargo, hay estudios que presentan unos rangos de valores que ayudan a evaluar el estado de contaminación salina de la muestra y los problemas que conlleva. Por ejemplo, si el contenido de cloruros y sulfatos es menor al 0.10%, el material bajo estudio se considera limpio (0.05% tratándose de nitratos), y no existiría riesgo alguno para su conservación. Una concentración entre 0.20 y 0.50% (0.06-0.10%) se considera contaminación ligera, lo que proporciona un riesgo bajo de degradación. Entre 0.60 y 1.50% (0.10-1.50%), es una contaminación media puede producir daños visibles. Entre 1.60 y 3% de las 3 sales se le considera contaminación alta, y existe un riesgo alto de deterioro. Por último, si la concentración de los mismos es superior al 3% el grado de contaminación es grave, pudiendo llegar a la destrucción total del material.

Para llevar a cabo los análisis, fue necesario realizar la extracción previa de las sales solubles. Para ello, se empleó el método de extracción de sales solubles optimizado por el grupo de investigación IBeA⁶¹ como alternativa de las normas europeas UNI 11087/2003 y EN 16455/2014. Concretamente, se pulverizó una parte de los morteros y se recogieron 0.1 g de muestra, se vertieron 90 mL de agua destilada y se facilitó la extracción de las sales solubles mediante baño de ultrasonidos (Ultrasons-H, P-Selecta, Barcelona, España) como se puede observar en la **Figura 7**. Para ello, se aplicó una frecuencia de 40 kHz (1000 W) durante un período de 2h.



Figura 7 Extracción de sales solubles en ultrasonidos.

Terminada la extracción se procedió a filtrar las muestras con filtros de disco $0.45\ \mu\text{m}$ (PVDF, OlimPeak), que posteriormente se enrasaron en 100 mL con agua destilada. Por último, las muestras se guardaron en tubos Falcon de 50 mL a una temperatura de $4\ ^\circ\text{C}$ hasta su análisis.

La medida de sales solubles se llevó a cabo mediante un cromatógrafo iónico 930 Compact IC Flex dual (Metrohm, Madrid, España), pudiendo medir cationes y aniones simultáneamente. Para realizar la separación cromatográfica de aniones se empleó la columna Metrosep A supp 7, utilizando como eluyente una disolución $3.6\ \text{mM}$ de Na_2CO_3 a un flujo de $0.8\ \text{mL/mm}$. Además, se empleó el supresor químico MSM supresor (Módulo de Supresión Metrohm) y una microcámara de vacío para eliminar el CO_2 obteniendo una línea base de $2\ \mu\text{S}$, aumentando la sensibilidad de los análisis. En el caso de los cationes, se empleó una columna Metrosep C6, con fase móvil de HNO_3 $1.7\ \text{mM}$ /ácido dipicolínico $1.7\ \text{mM}$, con un flujo de $1\ \text{mL/min}$.

Tanto los aniones como los cationes se analizaron simultáneamente, realizando una única inyección. Para ello, se empleó un automuestreador 815 Robotic USB Sample Processor XL.

3.2.5 Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos permiten conocer la respuesta de los materiales de construcción a las distintas fuerzas que se verá sometido en un futuro. En este caso, se

llevaron a cabo las dos pruebas básicas en este tipo de ensayos, es decir la evaluación de resistencia a compresión y flexotracción.

Para llevarlas a cabo, se empleó una máquina de ensayo CIB-200-MDA (SAE Ibertest España) según la normativa UNE-EN 196:1 2005. Para ello, en un primer lugar se midieron las secciones de las probetas (**Figura 8**). Posteriormente, los ensayos de flexotracción a 3 puntos se realizaron a una velocidad de ensayo de 0.05 kN/s, mientras que para los ensayos de compresión se aplicó una velocidad de 2.4 kN/s.

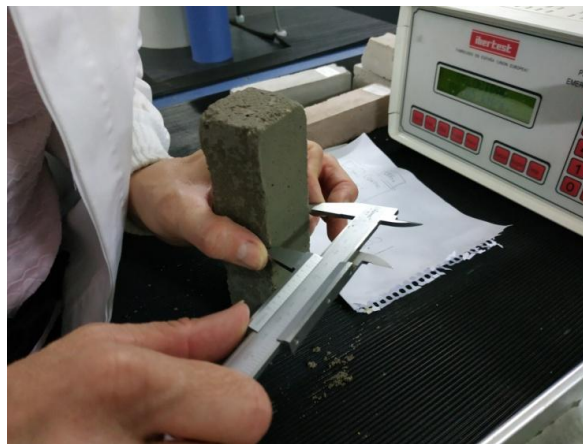


Figura 8 Medida de las secciones de las probetas.

4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización de las materias primas:

En esta sección se procederá a la exposición de los resultados en lo referente a la caracterización multi-analítica de las materias primas a emplear en la elaboración de las probetas.

4.1.1 Difracción de Rayos X (XRD)

En primer lugar, la composición mineralógica de las materias primas descritas en el apartado 3.1 se determinó mediante la interpretación de los difractogramas correspondientes.

4.1.1.1 Ceniza volcánica del Vesubio

La identificación de los minerales presentes en la muestra se realizó a través de la interpretación del difractograma visible en la **Figura 9**.

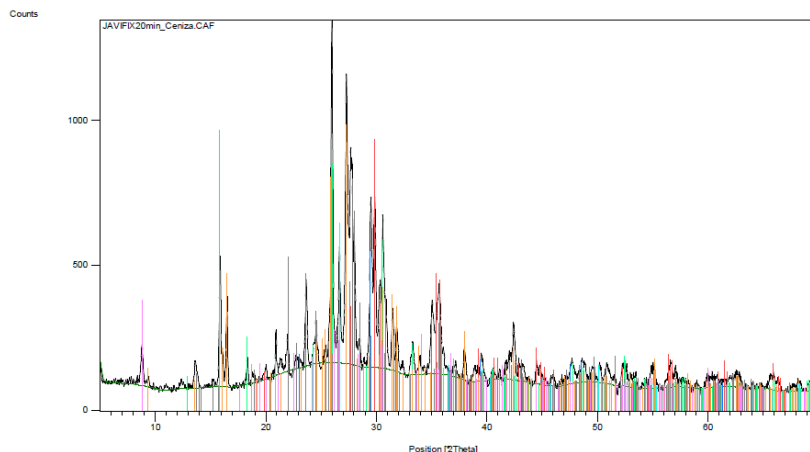


Figura 9. Difractograma de la ceniza volcánica del Vesubio.

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos calcita (pico principal en 29.44°), augita (29.87°), labradorita (28.80°), leucita (27.30°), cuarzo (26.66°), analcima (25.95°) y biotita (8.74°).

4.1.1.2 Lapilli blanco y negro del Vesubio

De la misma manera que en el caso anterior, se interpretaron los resultados correspondientes al difractograma de la **Figura 10**

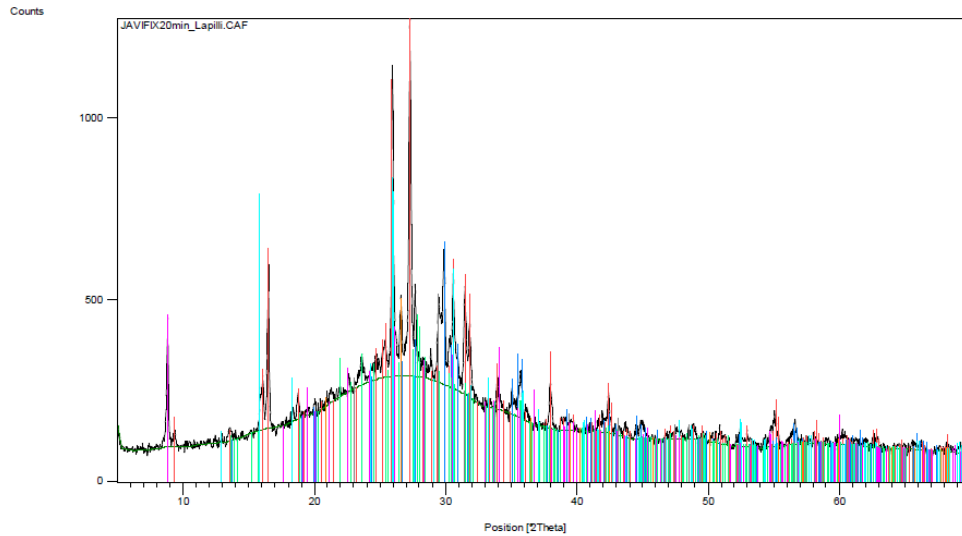


Figura 10 Difractograma de los lapilli del Vesubio.

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos leucita (27.30 °), augita (29.87 °), labradorita (28.80 °), analcima (25.95 °), biotita (8.74 °), calcita (29.44 °) y cuarzo (26.66 °).

Comparando con el difractograma anterior, en este caso se puede observar un claro incremento en la concentración de material amorfo, detectable gracias a la marcada elevación del fondo del difractograma en la región 20-35 °.

4.1.1.3 Ceniza comercial roja

En **Figura 11** se representa el difractograma obtenido en el estudio de la muestra de ceniza comercial roja.

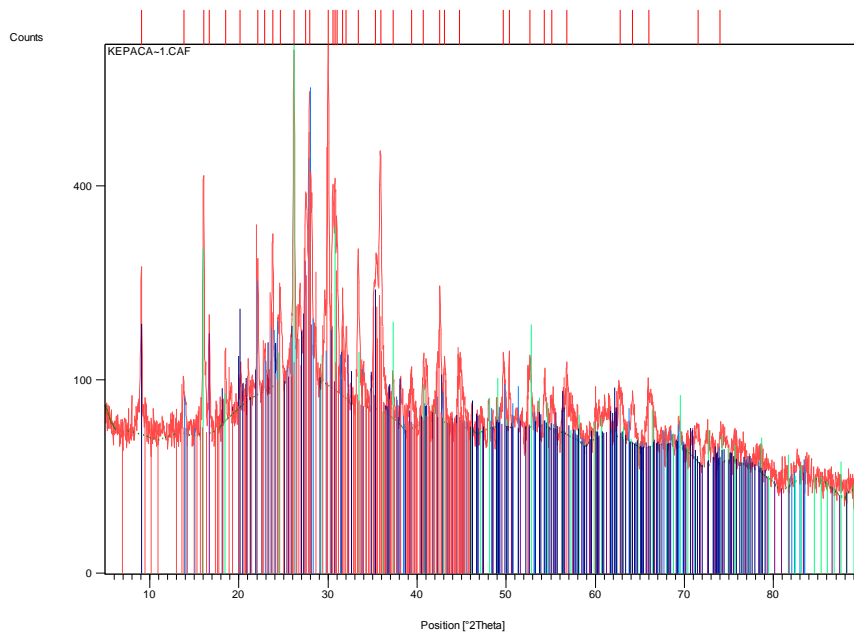


Figura 11 Difractograma de la ceniza de referencia Roja

Mediante comparación con difractogramas de minerales puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos diopsido (29.88 °), albita (27.93 °), leucita (27.30 °), moscovita (35.03 °) y anortita (27.34 °). De la misma manera que antes, se observa la presencia de material amorfo.

4.1.1.4 Ceniza comercial negra

De la misma manera que en el caso anterior, el difractograma se puede observar en la **Figura 12**

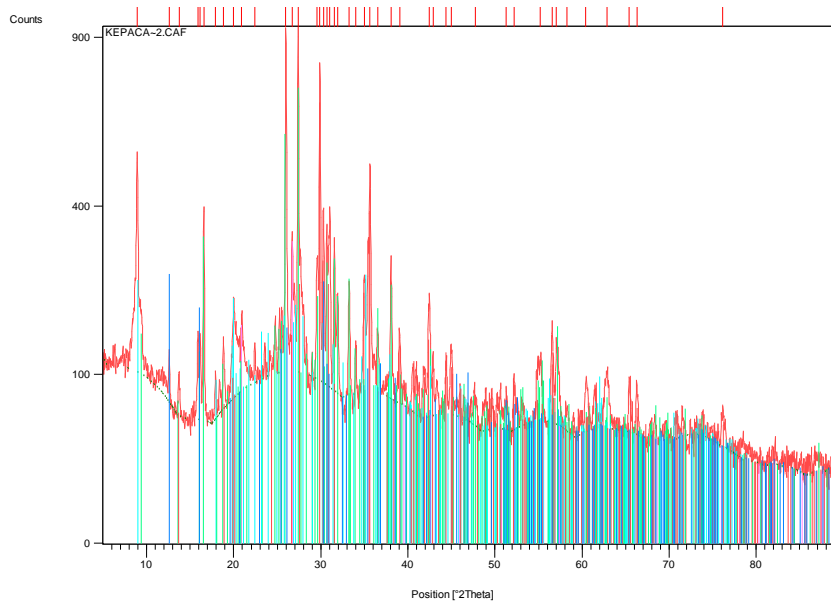


Figura 12 Difractograma de la ceniza de referencia Negra

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos leucita (27.30 °), moscovita (35.03 °), cuarzo (26.66 °), diopsido (29.88 °), rasvumita (5.83 °) y andradita (33.21 °).

4.1.2 Espectroscopia Raman

La caracterización Raman tanto de la ceniza volcánica como del lapilli se explica en mi trabajo previo, correspondiente a “La ciudad arqueológica de Pompeya Vista desde la Química Analítica” por lo que para ambos casos se procederá a presentar un breve resumen de los minerales determinados.

4.1.2.1 Ceniza volcánica del Vesubio

En la **Figura 13** aparecen recogidos los espectros Raman de la ceniza volcánica. En el espectro a) se pueden observar bandas a 156, 282, 713 y 1086 cm^{-1} , correspondiente al mineral de la calcita, una de las formas minerales del carbonato cálcico (CaCO_3). En el espectro b) se observa la sustitución del calcio en la calcita por un elemento del mismo grupo, el magnesio (Mg), observándose un desplazamiento de la banda a 1086 cm^{-1} a números de onda más elevados. En el espectro c) se observa la presencia de la anatasa, una forma mineral del TiO_2 , cuya banda principal aparece a 147 cm^{-1} . En el espectro d) se determinó la presencia de cuarzo (SiO_2) de forma aislada, con banda

principal en 461 cm^{-1} . En el espectro e) se observó la presencia del mineral pigeonita, con fórmula molecular $(\text{Mg,Fe,Ca})\text{SiO}_3$, cuyas bandas características son $324, 391, 665$ y 1011 cm^{-1} . En el espectro f) con banda a 496 cm^{-1} con un ligero hombro a 527 cm^{-1} , se corresponde al mineral leucita. Por último, en el espectro g) con bandas a $161, 283, 472$ y 513 cm^{-1} , se observó la presencia de sanidina.

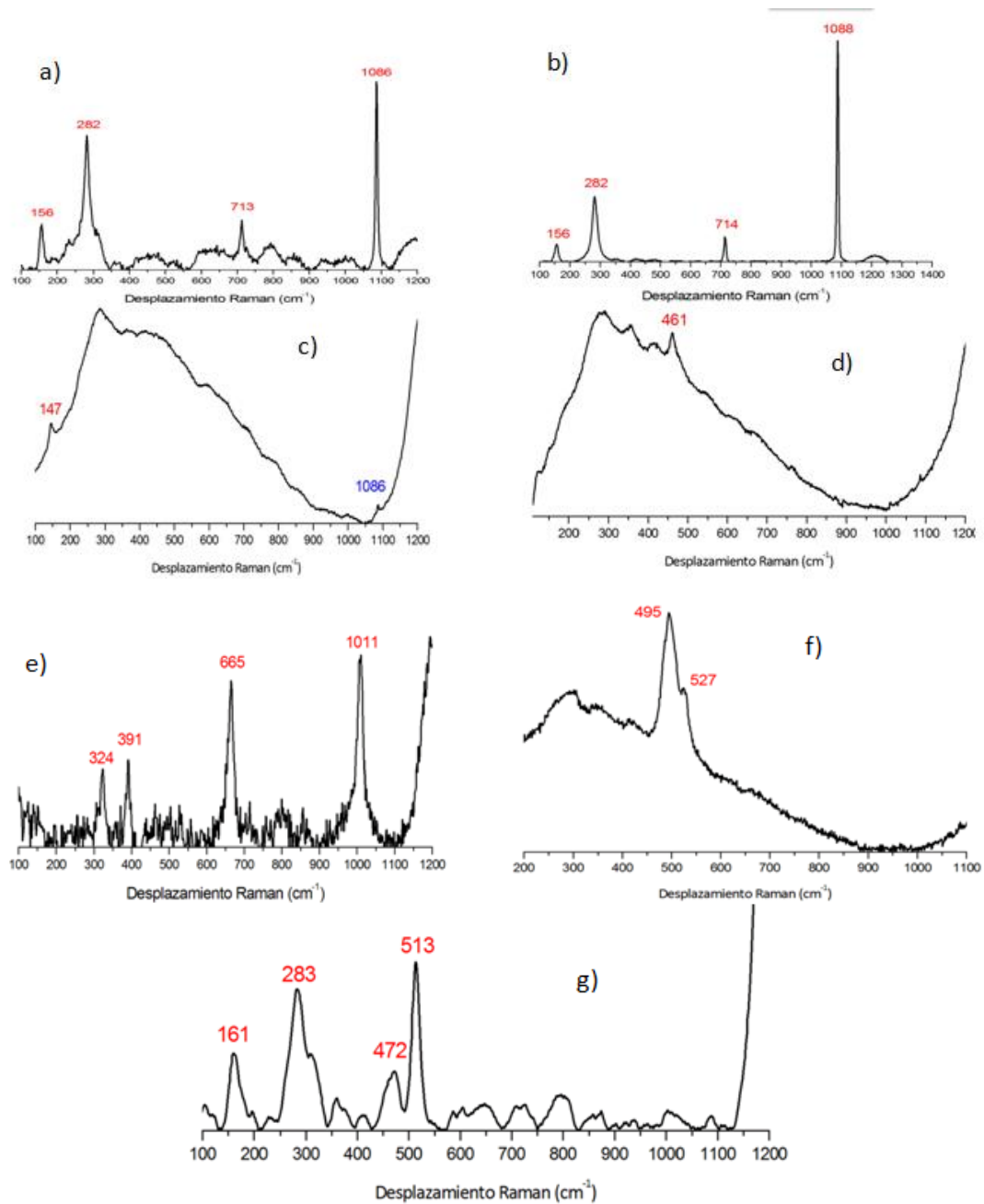
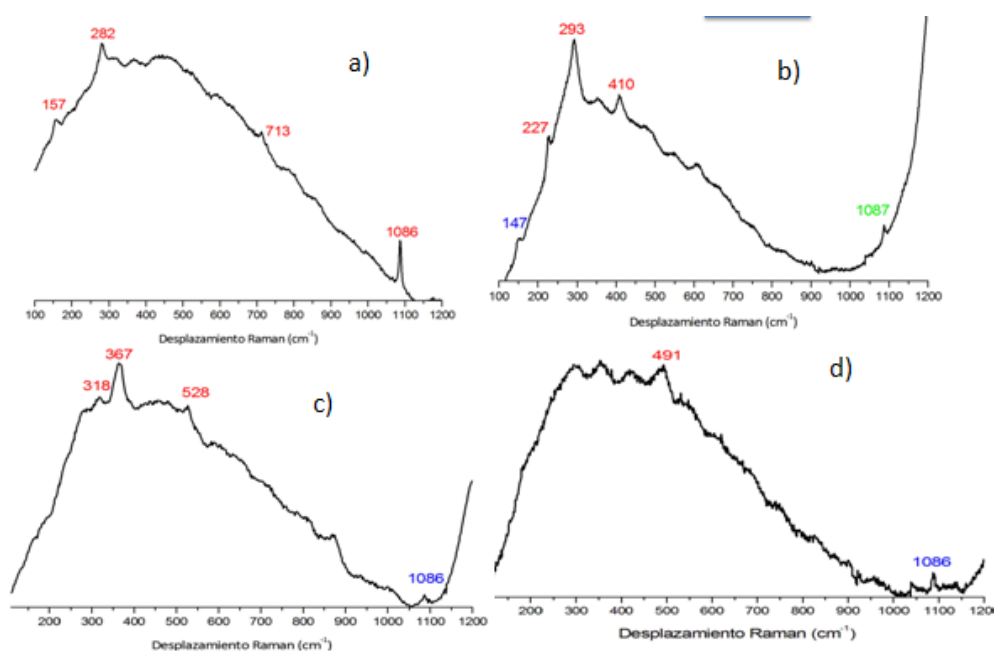


Figura 13 Espectro de los minerales caracterizados en la ceniza volcánica a) calcita b) calcita sustituida con magnesio; C) anatasa y calcita; D) cuarzo; E) pigeonita; F) leucita; G) sanidina.

4.1.2.2 Lapilli blanco y gris del Vesubio.

En la **Figura 14** aparecen recogidos los espectros Raman de la ceniza volcánica. En esta muestra también se detectaron los compuestos calcita (Figura 13a), anatasa (Figura 12b, banda azul) y leucita (Figura 13h). Además, en el espectro b) se puede observar la presencia de bandas a 227,293 y 410 cm^{-1} , correspondientes al mineral hematita (una de las formas minerales del óxido de hierro Fe_2O_3). En el espectro c) con bandas a 318, 367 y 528 cm^{-1} , se identificó la presencia del mineral goethita (oxihidróxido de hierro, $\alpha\text{-FeOOH}$). En el espectro d) con banda a 491, se encuentra la mezcla de dos minerales, analcima y leucita. En el espectro e) con bandas a 310, 385, 660 y 1003 cm^{-1} , se determinó la presencia de un piroxeno, en concreto de la augita. En el espectro f) con bandas a 820 y 851 cm^{-1} , son asignadas al olivino denominado forsterita, el cual se trata de un silicato de magnesio (Mg_2SiO_4). En el espectro g) se puede observar nuevamente a la augita, pero con las bandas desplazadas por un cambio en la relación de los elementos que lo conforman. En el espectro i) con bandas a 474 y 514 cm^{-1} se corresponde con la labradorita. Por último, el espectro j) con bandas a 174, 295 y 1097 cm^{-1} se determinó la presencia del mineral dolomita, un carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).



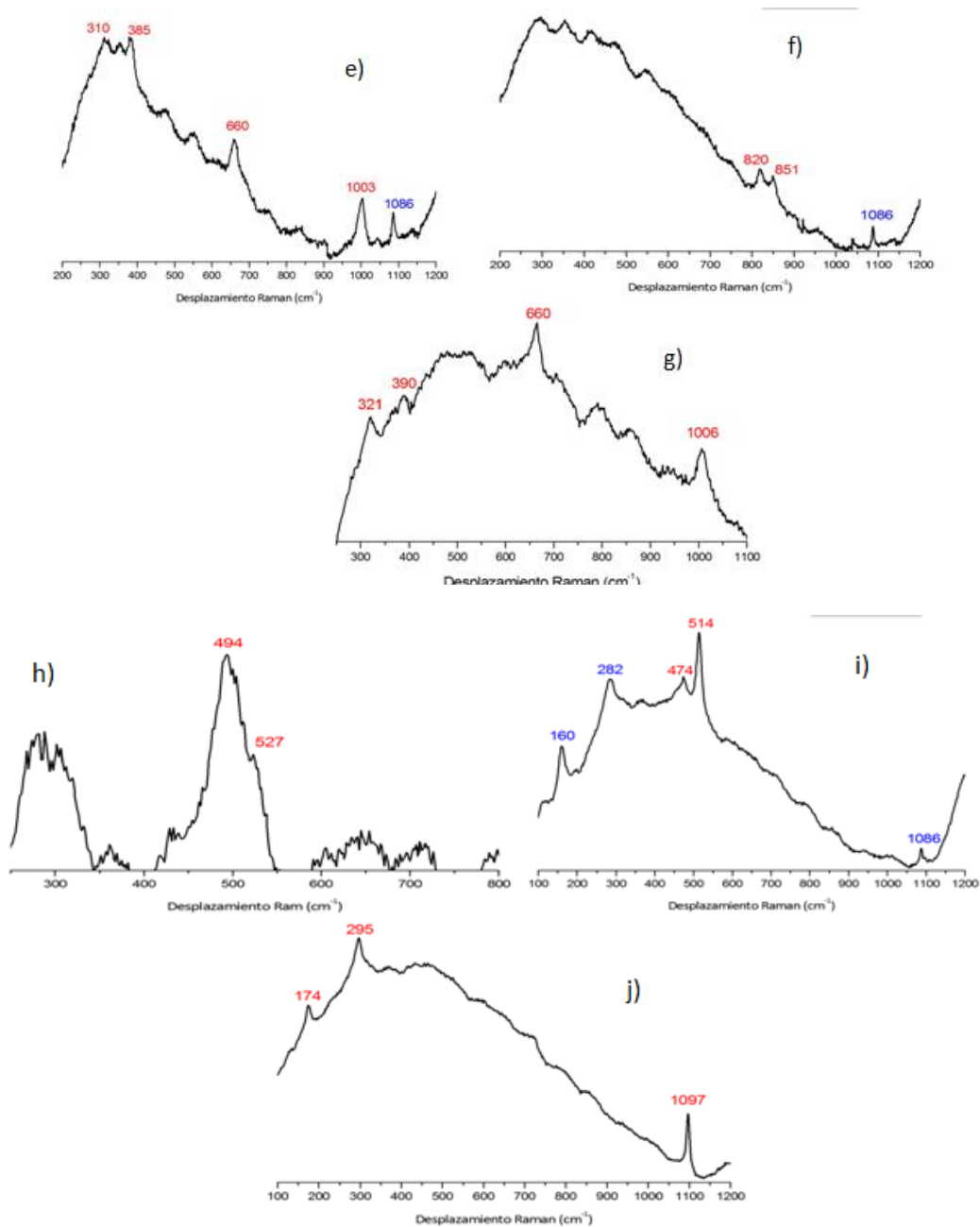


Figura 14 Espectro de los minerales caracterizados en los lapilli: A) calcita; B) hematita, anatasa, calcita; C) goethita y calcita; D) analcima, leucita, calcita; E) augita y calcita; F) forsterita y calcita; G) augita ; H) leucita; I) labradorita y calcita; J) dolomita.

4.1.2.3 Ceniza comercial negra

En primer lugar, en la **Figura 15** se puede observar el espectro con una banda a 1086 cm^{-1} , correspondiente al mineral calcita.

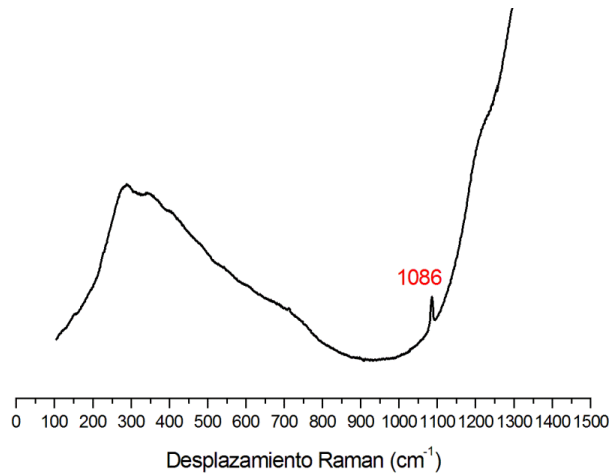


Figura 15 Espectro Raman del carbonato cálcico (CaCO₃) en su forma mineral de calcita

En la **Figura 16** se puede observar una banda a 496 cm⁻¹ con un ligero hombro. Para una mejor interpretación del mismo fue necesario la descomposición de la banda en gaussianas y lorentzianas mediante el software WiRE 4.2TM, observándose una segunda banda a 527 cm⁻¹. Estas bandas se corresponden al mineral leucita.

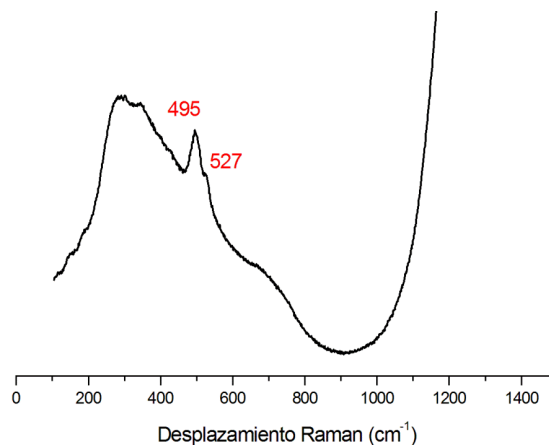


Figura 16 Espectro Raman de la leucita, observándose la banda principal y un ligero hombro.

La leucita, dentro de las rocas volcánicas, se encuentra clasificada como un aluminosilicato potásico, con fórmula K(Si₂Al)O₆.

Como se ha mencionado en los resultados de EDXRF, la muestra presenta una elevada concentración de hierro, lo que se puede corroborar con la presencia de las bandas a 222, 287 y 402 cm⁻¹ correspondientes al mineral de hematita (**Figura 17**).

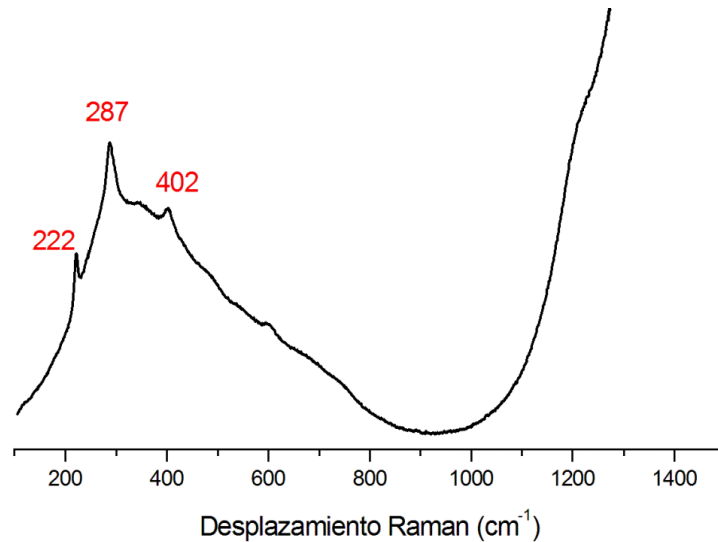


Figura 17 Espectro Raman de la hematita (Fe₂O₃)

La presencia de Fe₂O₃ es muy común en las rocas volcánicas, especialmente cuando la muestra contiene silicatos ferromagnesianos. Además, el hierro, al ser uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre es habitual encontrar óxidos de este metal.

Junto con los óxidos de hierro se suele encontrar también los de titanio, en este caso el correspondiente a la forma mineral anatasa, con su banda característica a 148 cm⁻¹. Además, junto a este mineral se encontró la presencia de cuarzo, con banda principal a 464 cm⁻¹. Ambos minerales se pueden observar en la **Figura 18**.

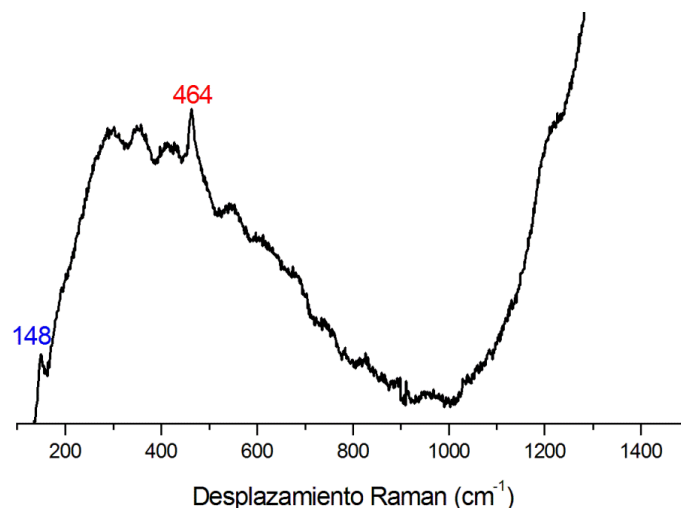


Figura 18 Espectro Raman del óxido de titanio en forma de anatasa (azul) y el cuarzo, SiO₂ (rojo)

El cuarzo es uno de los minerales más comunes de la corteza terrestre, encontrándose en los tres tipos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias. Sin embargo, la presencia de cuarzo en rocas volcánicas es generalmente incompatible con la presencia de feldespatos. Esto se debe, principalmente, a diferencias en las condiciones de precipitación: los feldespatoideos requieren un medio con escasa concentración de sílice, mientras que la cristalización de cuarzo requiere un exceso de sílice. Asumiendo que los dos compuestos no sean de origen secundario, la detección conjunta de cuarzo y feldespatos en el material volcánico Vesubiano podría relacionarse con variaciones en la composición elemental del magma ocurridas a lo largo de la fase eruptiva.

4.1.2.4 Ceniza comercial roja

En la **Figura 19** se puede observar las bandas a 478 y 507 cm^{-1} , correspondientes al mineral albita, con fórmula molecular $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$.

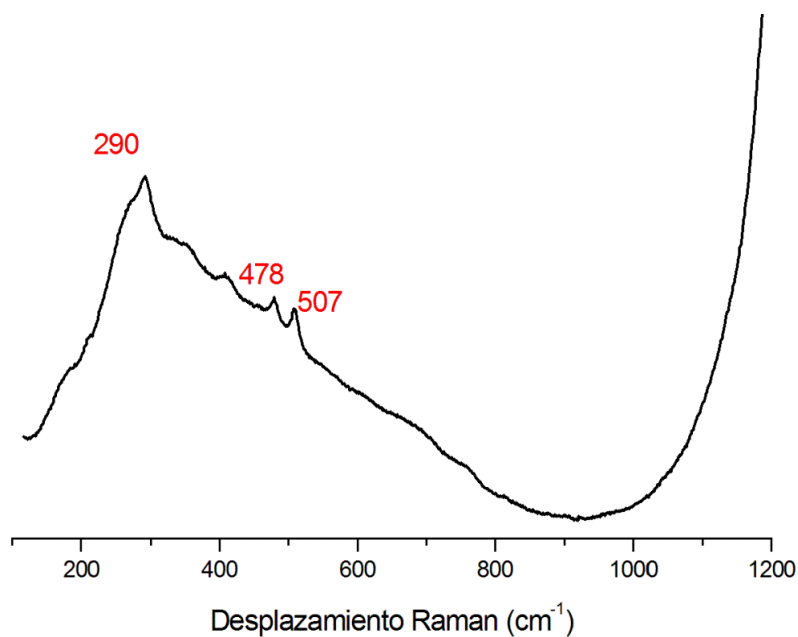


Figura 19 Espectro Raman de la albita ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)

En la **Figura 20**, las bandas a 391, 664 y 1006 cm^{-1} se corresponden al mineral augita, perteneciente al grupo de los piroxenos. Esta clase de minerales son frecuentes en el material volcánico. La augita, con fórmula molecular $(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$, se

encuentra ubicada en el grupo de los clinopiroxenos, es decir, cristaliza en el sistema monoclinico.

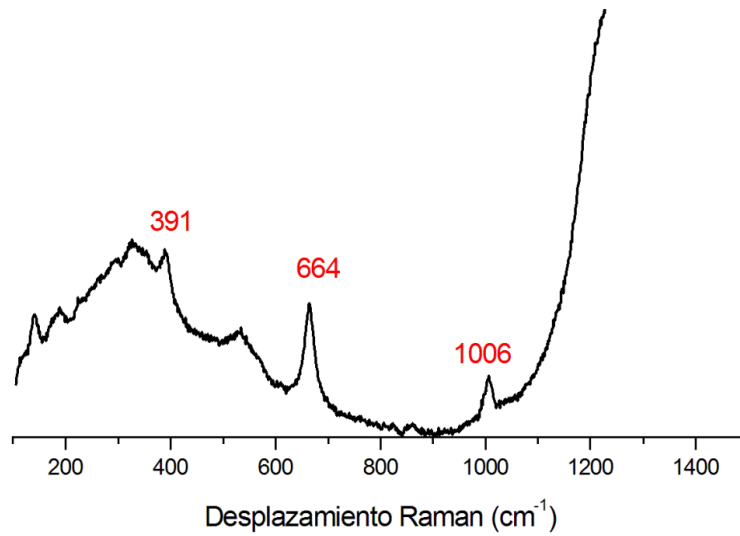


Figura 20 Espectro Raman de la augita ((Ca, Mg, Fe)₂(Si, Al)₂O₆)

También se determinaron la presencia de leucita, calcita y cuarzo, tal y como se ha explicado en el caso de la puzolana negra.

4.1.2.5 Resumen de la caracterización mineralógica

En este apartado se expondrán los minerales obtenidos para cada materia prima, tanto por espectroscopia Raman como por XRD. Dichos resultados se pueden observar en la

Tabla 1

Tabla 1 Minerales en cada uno de los materiales volcánicos a emplear en el desarrollo de los morteros. Los minerales con color azul se determinaron únicamente por XRD, en verde, por Raman y en naranja por ambas técnicas.

Material	Minerales
Ceniza volcánica	<p>Calcita (CaCO₃), anatasa (TiO₂), cuarzo (SiO₂), pigeonita(Mg,Fe,Ca)SiO₃,leucita(K(Si₂Al)O₆), labradorita(Ca,Na)(Si,Al)₄O₈, sanidina(K,Na)(Si,Al)₄O₈, augita(K,Na)(Si,Al)₄O₈, analcima(Na(Si₂Al)O₆·H₂O), biotita K(Mg,Fe)₃AlSi₃O₁₀(OH, F)₂</p>
Lapilli	<p>Calcita, augita, analcima, leucita, forsterita(Mg₂SiO₄), hematita(Fe₂O₃), goethita(α-FeOOH), dolomita(CaMg(CO₃)₂), labradorita, y biotita.</p>
Ceniza comercial negra	<p>Leucita, hematita, anatasa, cuarzo, moscovita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂), diópsido (CaMgSi₂O₆), Rasvumita(KFe₂S₃), Andradita (Ca₃Fe₂(SiO₄)₃)</p>
Ceniza comercial roja	<p>Calcita, leucita, cuarzo, albita, augita, diópsido, moscovita y anortita.(CaAl₂Si₂O₈)</p>

Se observan diferencias en la composición mineralógica entre los materiales de referencia y las puzolanas naturales. Por otra parte, la técnica de XRD nos ha permitido identificar una clara diferencia en el contenido de material amorfo entre las 4 muestras, siendo en el caso del lapilli el con la mayor concentración. Este hecho es interesante debido que altas concentraciones de material amorfo influye positivamente el carácter puzolánico de un material.

4.1.3 Fluorescencia de Rayos X (ED-XRF)

En primer lugar, se compararán los resultados obtenidos mediante la caracterización por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva, observando las diferencias de concentración semicuantitativa entre los distintos elementos.

En **Tabla 2** se exponen los resultados en porcentaje en masa sin normalizar. Sin embargo, cabe destacar que los resultados aportados en el caso del lapilli se llevaron a cabo en el estudio de los estratos de Porta Marina, realizándose la media aritmética de los valores de concentración obtenidos en cada uno de ellos.

Tabla 2 Resultados de EDXRF de los distintos materiales volcánicos en porcentaje de masa sin normalizar.

Elementos	Al	Si	P	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Zn	Rb	Sr	Zr
Ceniza	0.38	1.05	-	0.60	1.01	0.059	-	0.019	0.84	0.0025	0.019	0.055	0.014
Ceniza comercial roja	0.43	1.16	0.011	0.42	0.75	0.092	0.0045	0.0220	1.60	0.0035	0.029	0.104	0.024
Ceniza comercial negra	0.32	0.74	-	0.33	0.50	0.056	0.0040	0.020	0.89	0.0026	0.013	0.087	0.022
Lapilli	6.8	17.6	0.132	6.693	12.347	0.670	-	0.187	8.177	0.015	0.061	0.188	0.044

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos, los elementos principales de los materiales volcánicos son el aluminio, el silicio, el hierro y los elementos alcalinos de sodio y potasio. Como se describe en el artículo de J.L. Costafreda Mustelier⁶², además que por su granulometría y composición mineralógica, el carácter puzolánico de un material depende también de su composición química, y más específicamente de su contenido de SiO₂ y Al₂O₃.

Los elementos detectados son concordes con los resultados Raman y XRD, que detectaron silicatos, aluminatos y aluminosilicatos como compuestos mayoritarios de las muestras analizadas (a veces acompañados por óxidos de hierro).

En los espectros XRF también se observaban las bandas correspondientes al Pb o As, sin embargo, al no poder apreciar las bandas secundarias no se puede confirmar la presencia de uno de los elementos, por lo que no se incluyeron en la semicuantitativa.

4.2 Preparación de las probetas

Los morteros fueron preparados en una relación conglomerante (cal/material volcánico 1:3)/árido de 1:3. Se empleó agua destilada en una relación agua/conglomerante de 0.5. Pesando, por lo tanto, 450g (112.5 g de cal y 337.5 g de puzolana), 1350 g de arena y 225 g de agua.

La preparación de las mezclas y su curado se realizó de acuerdo al estándar de la UNI-EN 196-1:2005. Para ello, se procedió de la siguiente manera:

1. Se vierte el agua y el conglomerante dentro del recipiente, teniendo cuidado para evitar pérdidas de agua o de conglomerante.
2. Inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el conglomerante, se pone en marcha la amasadora (Hobart) a velocidad lenta. Después de 30s de amasado, se añade regularmente la arena durante los 30 s siguientes. Se pone la amasadora a velocidad rápida y se continúa el amasado durante otros 30 s.
3. Se para la amasadora durante 90 s. En los primeros 30 s, se retira por medio de una espátula de goma todo el mortero adherido a las paredes laterales.
4. Se continúa el amasado durante 60s.

Tras esto, la masa resultante se pasa a los moldes, previamente engrasados con aceite para evitar que el mortero se pegue a las paredes. La compactación de los morteros se realiza en 2 tandas, golpeando los moldes 60 veces en un minuto, mediante el uso de una compactadora (Ibertest) **(Figura 21)**.



Figura 21 Amasado, compactado y resultado final de las probetas.

Según la propia normativa UNE 196-1, el desmolde de las probetas debe realizarse pasadas 24h tras su preparación. Sin embargo, considerando que la reacción puzolánica en probetas a base de material volcánico es más lenta con respecto a la de cementos convencionales (a base de portland) se decidió esperar una semana para el desmoldeo.

Pasado una semana, algunas probetas sufrieron fracturas al ser desmoldadas. Las que se mantuvieron perfectamente se introdujeron en un baño de agua a 22 °C durante 28 días (**Figura 22**) El motivo de la introducción de las probetas en el baño es corroborar si el material es capaz de fraguar bajo el agua, es decir, si ha obtenido propiedades hidráulicas gracias al material volcánico (siendo esta una característica típica de los cementos Romanos). Por ello, como he mencionado anteriormente, se decidió emplear cal apagada en cambio de la hidráulica NHL.



Figura 22 Curado de las probetas en agua durante 28 días (izquierda)

A continuación, se describen las probetas obtenidas:

- 2 probetas de ceniza húmedas (la tercera se rompió y no se dispuso de ella).
- 1 probeta lapilli húmeda y 1 probeta secada al aire rota (endurecida con contacto al aire los 28 días).
- 2 probetas de puzolana negra húmedas y 1 probeta secada al aire entera.
- 1 probeta de puzolana húmeda, 1 probeta secada al aire entera y 1 probeta secada al aire rota.

En la **Figura 23** se pueden observar las endurecidas en contacto con el agua.



Ceniza
Mezcla de Lapilli
Puzolana Negra
Puzolana Roja

Figura 23 Probetas endurecidas en agua durante 28 días

4.3 Caracterización de las probetas

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en la caracterización de las probetas mencionadas anteriormente.

4.3.1 Ensayos mecánicos

4.3.1.1 Ensayos de flexotracción a 3 puntos

Los ensayos de flexotracción no son concluyentes ya que las probetas no estaban lo suficientemente endurecidas y presentaban resistencias muy bajas, donde la probeta se fracturaba mucho antes de que la maquina fuera capaz de dar un valor realista. En otras ocasiones, al quedarse fragmentos en el camino de la prensa, estos oponían resistencia dando valores irreales. Por ello, el único resultado que se puede extrapolar de esta prueba es el tipo de fractura producida en las distintas probetas, que se pueden observar en la **Figura 24**.

La obtención de resistencias tan bajas se debe, como se ha explicado anteriormente, a que el fraguado de estos materiales es más lento que los basados en cemento Portland, por lo cual, a los 28 días que indica la normativa (pensada para evaluar el cemento portland) no han sido suficientes para que se completase la reacción puzolánica.



Figura 24. Morteros tras el ensayo de flexotracción, se puede observar la cantidad de polvo desprendido por cada uno de ellos debido a su fragilidad.

Como se pueden apreciar, en la mayoría de las probetas no se produjo una fractura como tal, sino que donde la prensa produjo el contacto, se dividió en dos partes desprendiendo gran cantidad de materia particulado.

Finalmente, con los fragmentos obtenidos tras esta prueba, se procedió a los ensayos de compresión.

4.3.1.2 Ensayos de compresión

Para los ensayos de compresión se cambió la placa inferior de los ensayos por una metálica de 4x4 cm y las probetas se dispusieron de tal manera que ocuparan la totalidad de la placa, tal y como se observa en la **Figura 25**.

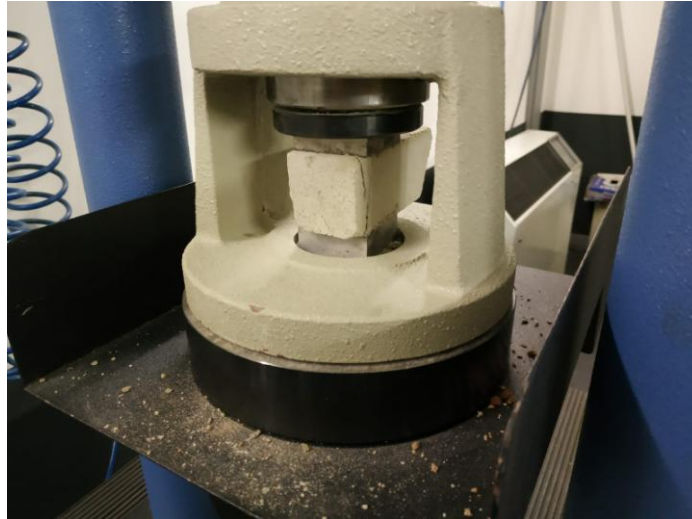


Figura 25. Ensayo de compresión de uno de los morteros.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión se empleó la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1\ 600}$$

donde

R_c es la resistencia a compresión (en megapascuales);

F_c es la carga máxima de rotura (en newtons);

1 600 = 40 mm x 40 mm, es la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados).

Los resultados obtenidos para las distintas probetas se pueden observar en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Valores de Carga máxima y resistencia a la compresión de cada una de las probetas analizadas.

Probeta	F _c (Newtons)	R _c (MPa)
Ceniza 1	3240	2.03
Ceniza 2	2440	1.53
Ceniza 3	3300	2.06
Ceniza 4	3500	2.19
Lapilli Húmedo 1	4050	2.53
Lapilli Húmedo 2	4450	2.79
Lapilli Seco 1	3200	2
Lapilli Seco 2	3400	2.13
Ceniza comercial negra Húmeda 1	1820	1.14

Ceniza comercial negra 2	1860	1.16
Ceniza comercial negra 3	1990	1.24
Ceniza comercial negra 4	2040	1.28
Ceniza comercial negra Seca 1	1140	0.71
Ceniza comercial negra 2	1050	0.65
Ceniza comercial roja Húmeda 1	2940	1.84
Ceniza comercial roja Húmeda 2	3560	2.23
Ceniza comercial roja Seca 1	960	0.6
Ceniza comercial roja Seca 2	1440	0.9
Ceniza comercial roja Seca 3	1140	0.71
(rota)		
Ceniza comercial roja Seca 4	1060	0.66
(rota)		

Como se detalla en **Tabla 7**, la resistencia mecánica de las probetas endurecidas bajo el agua es mayor respecto a las que se han endurecido únicamente con contacto al aire. Considerando que se ha empleado cal apagada en cambio de NHL, estos resultados confirman que todos los materiales vulcanices empleados en la formulación de morteros tiene propiedad hidráulica.

Por otra parte, puede observarse que en el caso de la puzolana negra comercial se han obtenido las menores resistencias. Este hecho se encuentra relacionado con los resultados obtenidos en la caracterización por ED-XRF, donde los valores de concentración de aluminio y silicio eran los más bajos, además de presentar la menor concentración de fases amorfas de entre todos los materiales empleados.

Por el otro lado, el material que mayor resistencia presenta se corresponde con la mezcla de lapilli. Esto es debido a, como ya se ha mencionado varias veces, el contenido en material amorfo juega un rol clave en la resistencia final de los morteros y es en el caso del lapilli donde se encuentra la mayor concentración de los mismos.

4.3.2 Difracción de Rayos X (XRD)

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos en la caracterización mineralógica de las probetas tras más de 28 días de endurecimiento.

4.3.2.1 Ceniza del Vesubio

En la **Figura 26** se puede observar el difractograma correspondiente a los minerales determinados en la probeta.

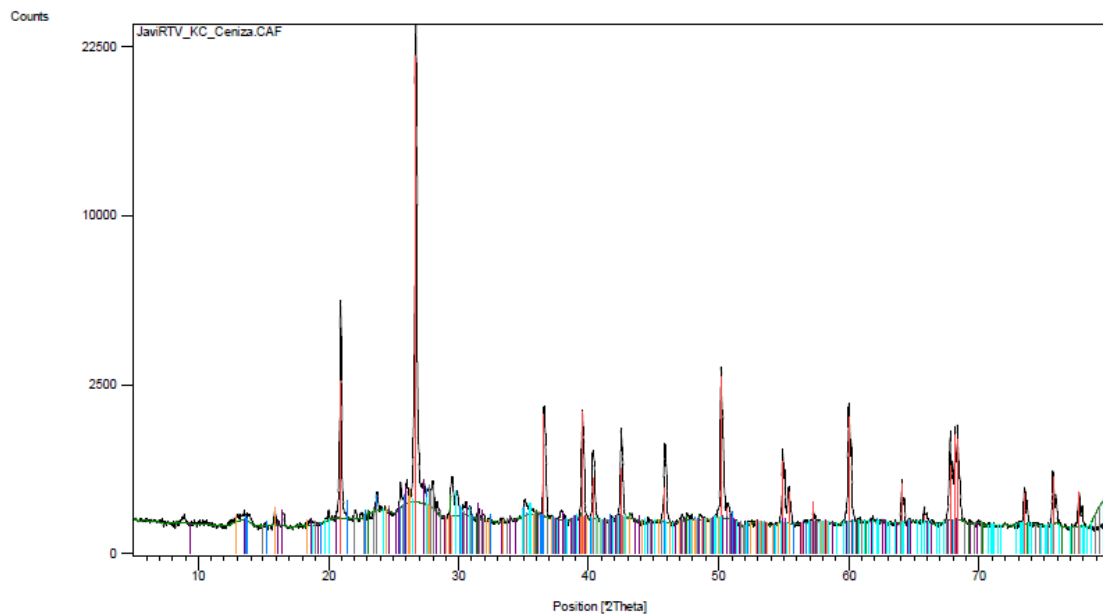


Figura 26 Difractograma correspondiente a las probetas realizadas con Ceniza del Vesubio.

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos cuarzo (26.66 °), sanidina (27.02 °), calcita (29.44 °), anortita (27.34 °), diopside (29.88 °), leucita (27.30 °) y wairakita (26.33 °) y un pequeño pico en 8.8 ° que indica la presencia de micas.

De entre los minerales anteriores cabe destacar la presencia de wairakita, un mineral procedente de la hidratación de los aluminosilicatos presentes en el material volcánico⁶³. La detección de este mineral es muy importante para los objetivos propuestos en este proyecto, ya que se trata de uno de los compuestos cuya cristalización confirma que ha ocurrido la reacción puzolánica entre los materiales empleados en la formulación del mortero.

Por otra parte, destacar la presencia de señales muy intensas de cuarzo, dificultando la identificación de otros minerales. Dicho cuarzo proviene principalmente del empleo de arena normalizada, cuya ficha técnica determina que al menos el 98% de la misma es SiO₂.

4.3.2.2 Mezcla de lapilli del Vesubio

En la **Figura 27** se puede observar el difractograma correspondiente a los morteros procedentes de la mezcla de lapilli.

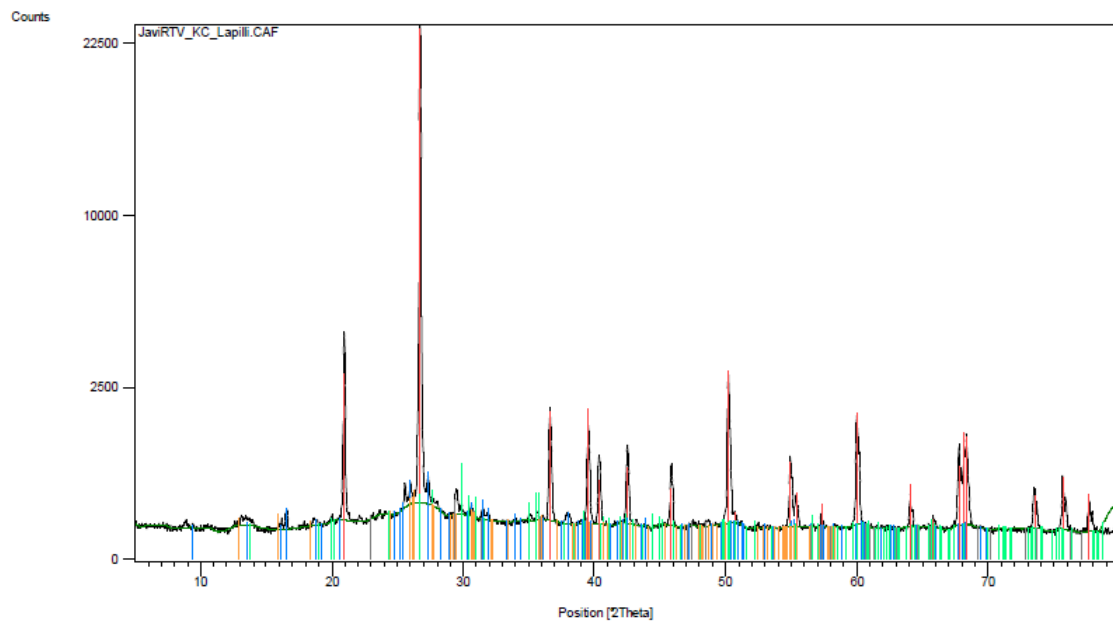


Figura 27 Difractograma correspondiente a las probetas realizadas con la mezcla de lapillis

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos cuarzo (26.66 °), leucita (27.30 °), diopsido (29.88 °), calcita (29.44 °), sanidina (27.02 °), wairakita (26.33 °). y un pequeño pico en 8.8 ° que indica la presencia de micas.

De nuevo, destacar la presencia del mineral de wairakita. La mayor intensidad de su pico característico induce a pensar que este compuesto se haya formado en mayor cantidad que en el resto de los casos, lo que explicaría la mayor resistencia mecánica de los morteros a base de mezcla de lapilli.

4.3.2.3 Ceniza comercial negra

En la Figura 28 se puede observar el difractograma correspondiente a los morteros realizados en base del material volcánico de referencia negro.

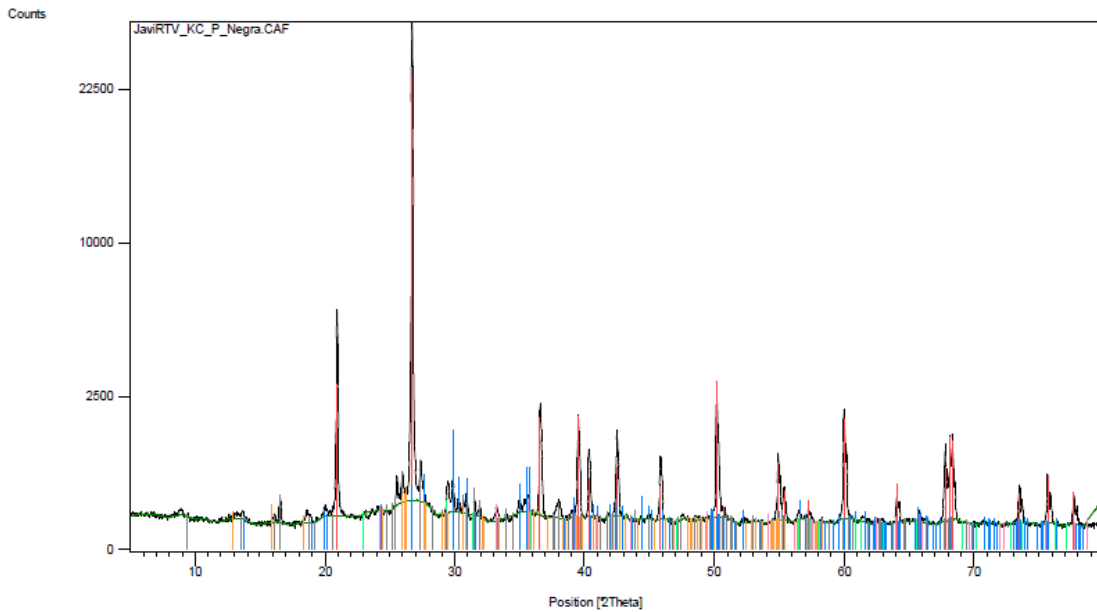


Figura 28 Difractograma correspondiente a las probetas realizadas con el material de referencia Negro

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos cuarzo (26.66 °) como mineral mayoritario, debido a los granos procedentes de la arena normalizada, diopsido (29.88 °), calcita (29.44 °) leucita (27.30°), wairakita (26.33 °), micas (8.8 °) y algo de hematita (32.2 °).

4.3.2.4 Ceniza comercial roja

Por último, se expone el difractograma correspondiente al material de referencia roja en la **Figura 29**.

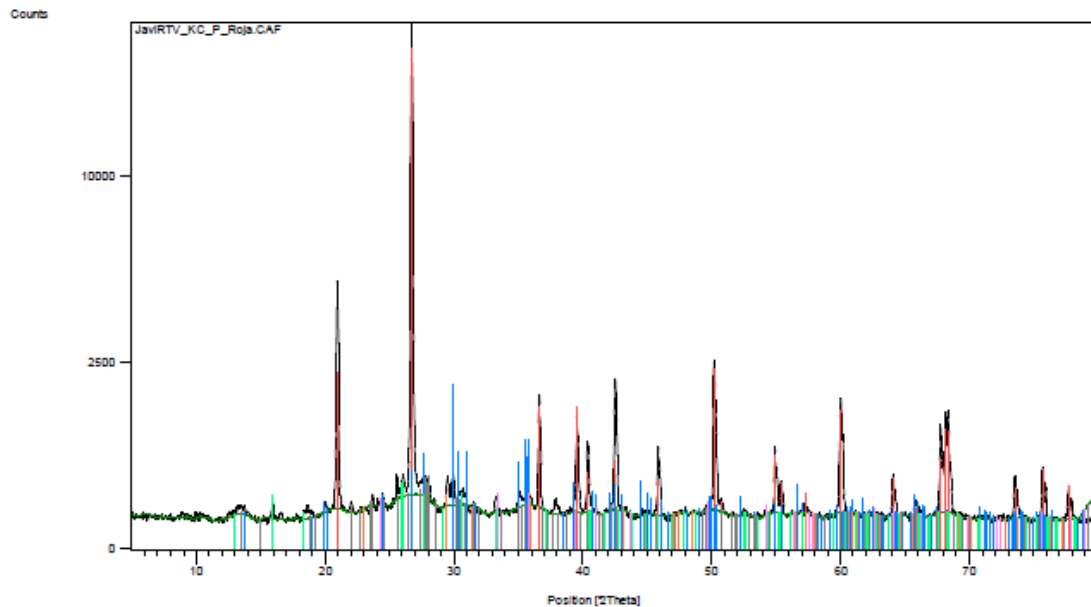


Figura 29 Difractograma correspondiente a las probetas realizadas con el material de referencia Roja

Mediante comparación con difractogramas puros ha sido posible identificar la presencia de los compuestos cuarzo (26.66 °) como mineral mayoritario, debido a los granos procedentes de la arena normalizada, diopsido (29.88 °), analcima(25.95 °), calcita (29.44 °), leucita (27.30 °), wairakita (26.33 °), micas (8.8 °) y hematita (32.2 °).

En este caso cabe destacar la ausencia del mineral de wairakita, pudiendo deberse o bien por su no formación en el tiempo correspondiente o bien que se haya formado, pero en concentración por debajo del límite de detección de la técnica empleada (< 5-10%).

4.3.3 Espectroscopia Raman

Pasados los 28 días de fraguado bajo el agua, se procedió a la caracterización Raman de los morteros con el fin de buscar los aluminosilicatos hidratados producidos a raíz de la reacción puzolánica. Sin embargo, a pesar de las numerosas áreas de interés analizadas, en la mayoría de los casos solo se detectó cuarzo con banda principal a 467 cm^{-1} , siendo esto el mineral mayoritario de los morteros (Figura 30).

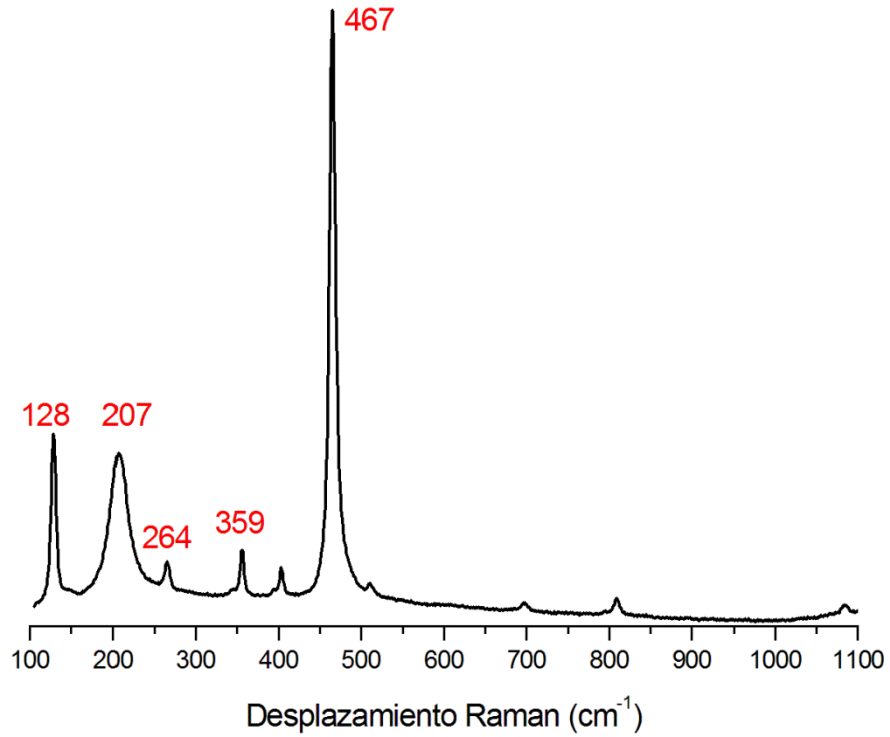


Figura 30. Espectro Raman de cuarzo en el mortero a base de lapilli.

Por otra parte, cabe destacar que, en el caso del mortero de la ceniza volcánica, también se determinó la presencia de los minerales forsterita y hematita tal y como se puede observar en la **Figura 31**.

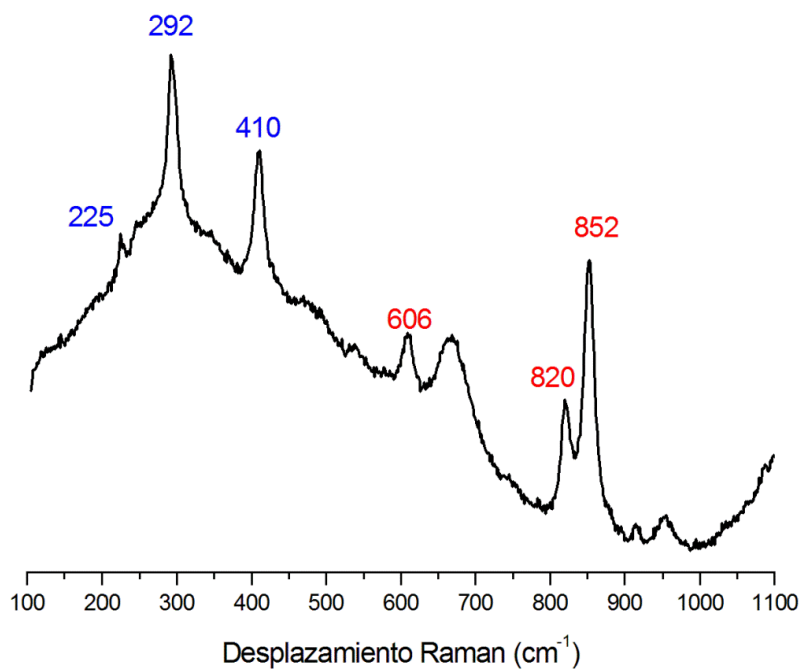


Figura 31. Espectro Raman de la Forsterita (rojo) y hematita (azul).

Sin embargo, a diferencia de los análisis XRD, mediante espectroscopia Raman no ha sido posible detectar la presencia de minerales derivados de la hidratación de los aluminosilicatos, como podría ser la wairakita.

4.3.4 Cromatografía iónica

Teniendo en cuenta los procesos de degradación que podrían generarse a raíz de la presencia de un exceso de sales solubles en los morteros, el cromatógrafo iónico se empleó para llevar al cabo el análisis cuantitativo de los aniones (**Tabla 4**) y cationes (**Tabla 5**) en las probetas preparadas.

Tabla 4 Concentración de los aniones presentes en los morteros

Probeta/Iones (mg/kg)	Fluoruro	Cloruro	Nitrito	Bromuro	Nitrato	Fosfato	Sulfato
Ceniza comercial roja	8 ±5	33 ±27	65 ±19	0.9 ±0.9	56 ±4	11 ±6	57 ±11
Ceniza comercial negra	24 ±14	1005 ±49	91 ±13	1.4 ±0.7	1096 ±40	148 ±217	941 ±47
Lapilli	31 ±4	155 ±89	107 ±165	0.9 ±1.3	165±134	4 ±3	84 ±29
Ceniza	18.6 ±0.8	18 ± 22	16±11	3 ±2	23 ±6	5 ±2	64 ±9

Tabla 5 Concentración de los cationes presentes en los morteros

Probeta/Iones (mg/kg)	Sodio	Amonio	Potasio	Calcio	Magnesio
Ceniza comercial roja	82 ±18	13.5 ±0.7	337±48	4288±1274	170±92
Ceniza comercial negra	120±20	----	1082±79	4297±719	195±64
Lapilli	134±34	7.4±3	360±45	4037±389	797±185
Ceniza	84±5	208±20	494±44	4170±293	445±9

Como explicado anteriormente, para determinar si un mortero se considera “limpio” en términos de sales solubles, el porcentaje de cloruros y sulfatos debe ser inferior al 0.1% del peso de la muestra. De manera similar, la concentración de nitratos debe ser inferior al 0.05%. Se calcularon dichos porcentajes y los resultados se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6 Porcentaje de las sales cloruro, nitrato y sulfato en cada uno de los morteros analizados

Material	Ceniza comercial roja	Ceniza comercial negra	Lapilli Vesubio	Ceniza Vesubio
%Cloruro + Sulfato	0.009	0.2	0.02	0.002
% Nitrato	0.006	0.11	0.017	0.00003

Se puede observar que todos los morteros se encuentran por debajo del límite necesario para ser considerados limpios, a excepción de la ceniza comercial negra.

5.- Conclusiones

La caracterización del material volcánico ha sido significativa con el objetivo de determinar la viabilidad de la ceniza y de los lapilli del Vesubio muestreados en el Parque Arqueológico de Pompeya como materia prima a emplear en la elaboración de nuevos morteros de conservación. Comparando los datos XRD, Raman y XRF de los materiales volcánicos del Vesubio con los de las dos puzolanas de referencia, ha sido posible determinar que su composición mineralógica (calcita, leucita, cuarzo y augita) y elemental (silicio, calcio, aluminio y hierro) es muy similar a la de los materiales volcánicos comercializados como productos de conservación para el patrimonio cultural. La mayor diferencia radica en el caso del lapilli, el cual presenta la mayor concentración de materiales amorfos de entre los cuatro materiales puestos a estudio.

La preparación de las primeras probetas de mortero en base caliza ha permitido obtener un conocimiento más profundo de las propiedades hidráulicas y de la puzolanidad del material volcánico de Pompeya. En concreto, el lapilli ha aportado la mayor resistencia mecánica de entre todas las probetas. Esto se debe probablemente a la alta concentración de materiales amorfos, los cuales juegan un rol clave en las propiedades finales de los morteros, ya que cuanto mayor sea la concentración, mayor es la resistencia mecánica final. La caracterización mineralógica de las probetas, llevadas al cabo después de 28 días de fraguado, ha permitido detectar wairakita, siendo esto un producto de la hidratación de los minerales aluminosilicatados del material volcánico. Por ello, se deduce que el endurecimiento de estas se produce tanto por la carbonatación de la cal, como por una reacción puzolánica, tal y como ocurría en los morteros romanos antiguos.

Por otro lado, se ha observado, tras 28 días de fraguado, resistencias de compresión inferiores a los cementos actuales. Esto es debido a que el proceso de fraguado de morteros a base de material volcánico es más lento respecto aquellos a base de cemento portland.

Por otra parte, hace falta considerar que en algunos casos no ha sido posible llevar al cabo réplicas de los ensayos mecánicos (debido al hecho que algunas probetas se

dañaron durante el proceso de desmolde) por lo que los valores de resistencia a compresión se pueden tomar como orientativos y no como resultados definitivos.

Por último, cabe destacar que el contenido de sales solubles de las probetas realizadas con material volcánico del Vesubio es inferior al 0.1%, por lo cual se pueden considerar limpias. Considerando que dichas probetas han proporcionado valores de resistencia mecánica mejores y un contenido de sales solubles menor respecto a las producidas con ceniza comercial se deduce que, tras una oportuna optimización, el material volcánico de Pompeya podría ser empleado en la elaboración de morteros y cementos de conservación.

6.- Trabajos futuros

Con la finalidad de perfeccionar la preparación de los morteros se buscaría la correcta formulación de los mismos, optimizando las distintas variables como pueden ser la relación conglomerante/árido, el tamaño de partícula y las posibles mezclas entre ceniza y lapilli, para buscar la máxima resistencia mecánica y optimizar el tiempo de fraguado. Relacionado con los estudios de dureza a lo largo del tiempo, una vez determinada la formulación idónea para el futuro, realizar ensayos a distintas edades para observar la evolución, caracterizándose mediante espectroscopia Raman, XRD y XRF para observar los cambios producidos durante el endurecimiento.

Así mismo, cabe destacar que el material volcánico supone una gran oportunidad dentro de los materiales cementantes, ya que, basándose en últimas evaluaciones sobre la huella de carbono de los materiales cementantes, este material asegura la mejor eco-compatibilidad. Hay que tener en cuenta que, en la producción del cemento portland, se emite del 6-8% del CO₂ a la atmósfera. De hecho, además de reducir estas emisiones, los estudios demuestran que, mediante el uso de cenizas volcánicas, es posible disminuir un 16% el contenido energético del hormigón (energía consumida desde la extracción de materias primas hasta la puesta en obra). Es decir, la ceniza volcánica no es solamente un conglomerante ideal para la preparación de productos de conservación, sino que también representa un material prometedor en el ámbito del desarrollo de nuevos cementos y hormigones eco-sostenibles para la industria de la construcción moderna.

Por ello, más allá de desarrollar morteros de conservación compatibles con los edificios de época romana, el material volcánico del Vesubio podría ser empleado como material cementante suplementario que, sustituyendo el portland, ayudaría a disminuir los costes energéticos y el CO₂ emitido por la industria de la construcción.

7.- Bibliografía

- (1) Castillo-Poveda, M. A. Contextualización Histórica Del Concepto de Paisaje, Sus Implicaciones Filosóficas y Científicas. *Rev. Filos. Univ. Costa Rica* **2016**, 143, 11–14.
- (2) Benelux Convention On Nature Conservation And Landscape Protection. Benelux, Bélgica, 1982
- (3) *Carta Del Paisaje Mediterráneo*; Sevilla, España 1992.
- (4) *Directiva Relativa a La Conservación de La Fauna y Flora Silvestres*; 1992.
- (5) Consejo de Europa. Convenio Europeo Del Paisaje. *Florenia* **2000**, 8.
- (6) Jokilehto, J. Definition of Cultural Heritage: References to Documents in History. *ICCROM Work. Gr. 'Heritage Soc.* **2005**, No. January, 4–8.
- (7) Convención Sobre La Protección Del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural. *Apunt. Rev. Estud. sobre Patrim. Cult.* **1974**, 0 (0).
- (8) . U. Convención Para La Salvaguardia Del Patrimonio Cultural Inmaterial. "PATRIMONIO" *Econ. Cult. Y Educ. PARA LA PAZ* **2012**, 2 (2), 150–168.
- (9) Ahmad, Y. The Scope and Definitions of Heritage: From Tangible to Intangible. *Int. J. Herit. Stud.* **2006**, 12 (3), 292–300.
- (10) *Records of the General Conference. Twenty-Sixth Session. Paris, 15 October to 7 November. Resolutions*; 1991.
- (11) Convención Sobre La Protección y Promoción de La Diversidad de Las Expresiones Culturales. París, 2005. "PATRIMONIO" *Econ. Cult. Y Educ. PARA LA PAZ* **2016**, 2 (10 (5)).
- (12) (Japan), A. for C. A.; International Conference on the Safeguarding of Tangible and Intangible Cultural heritage: Towards an Integrated Approach Japan 2004, N. International Conference on the Safeguarding of Tangible and Intangible Cultural Heritage: Towards an Integrated Approach: Proceedings.
- (13) Salmerón Escobar, P. La Restauración Del Patrimonio Cultural Inmueble Desde La Ciencia y La Técnica. *Eu-topías Rev. Intercult. Comun. y Estud. Eur.* **2013**, No. 6, 9–34.
- (14) *Carta de Atenas Para La Restauración de Monumentos Históricos*; Atenas, 1931.
- (15) Artioli, G. *Scientific Methods and Cultural Heritage*; 2010.
- (16) Varella, E. A. *Conservation Science for the Cultural Heritage : Applications of Instrumental Analysis*, Springer.; Berlin, 2013.
- (17) *Conservation Science: Heritage Materials*; May, E., Mark, J., Eds.; Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2006.
- (18) Morillas, H.; Maguregui, M.; Trebolazabala, J.; Madariaga, J. M. Nature and Origin of White Efflorescence on Bricks, Artificial Stones, and Joint Mortars of

- Modern Houses Evaluated by Portable Raman Spectroscopy and Laboratory Analyses. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2015**, *136* (PB), 1195–1203.
- (19) Morillas, H.; Maguregui, M.; Bastante, J.; Huallparimachi, G.; Marcaida, I.; García-Florentino, C.; Astete, F.; Madariaga, J. M. Characterization of the Inkaterra Rock Shelter Paintings Exposed to Tropical Climate (Machupicchu, Peru). *Microchem. J.* **2018**, *137*, 422–428.
- (20) Morillas, H.; García-Galan, J.; Maguregui, M.; García-Florentino, C.; Marcaida, I.; Carrero, J. A.; Madariaga, J. M. In-Situ Multianalytical Methodology to Evaluate the Conservation State of the Entrance Arch of La Galea Fortress (Getxo, North of Spain). *Microchem. J.* **2016**, *128*, 288–296.
- (21) Pérez-Alonso, M.; Castro, K.; Madariaga, J. M. Investigation of Degradation Mechanisms by Portable Raman Spectroscopy and Thermodynamic Speciation: The Wall Painting of Santa María de Lemoniz (Basque Country, North of Spain). *Anal. Chim. Acta* **2006**, *571* (1), 121–128.
- (22) Morillas, H.; García-Florentino, C.; Marcaida, I.; Maguregui, M.; Arana, G.; Silva, L. F. O.; Madariaga, J. M. In-Situ Analytical Study of Bricks Exposed to Marine Environment Using Hand-Held X-Ray Fluorescence Spectrometry and Related Laboratory Techniques. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* **2018**, *146*, 28–35.
- (23) Morillas, H.; Maguregui, M.; Huallparimachi, G.; Marcaida, I.; García-Florentino, C.; Lumbreras, L.; Astete, F.; Madariaga, J. M. Multianalytical Approach to Evaluate Deterioration Products on Cement Used as Consolidant on Lithic Material: The Case of Tello Obelisk, Lima (Peru). *Microchem. J.* **2018**, *139*, 42–49.
- (24) Romero-Pastor, J.; Duran, A.; Rodríguez-Navarro, A. B.; Van Grieken, R.; Cardell, C. Compositional and Quantitative Microtextural Characterization of Historic Paintings by Micro-X-Ray Diffraction and Raman Microscopy. *Anal. Chem.* **2011**, *83* (22), 8420–8428.
- (25) Prieto-Taboada, N.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Veneranda, M.; Marcaida, I.; Morillas, H.; Maguregui, M.; Castro, K.; De Carolis, E.; Osanna, M.; Madariaga, J. M. Study of the Soluble Salts Formation in a Recently Restored House of Pompeii by In-Situ Raman Spectroscopy. *Sci. Rep.* **2018**, *8* (1), 1613.
- (26) Maguregui, M.; Knuutinen, U.; Martínez-Arkarazo, I.; Giakoumaki, A.; Castro, K.; Madariaga, J. M. Field Raman Analysis to Diagnose the Conservation State of Excavated Walls and Wall Paintings in the Archaeological Site of Pompeii (Italy). In *Journal of Raman Spectroscopy*; 2012; Vol. 43, pp 1747–1753.
- (27) Veneranda, M.; Prieto-Taboada, N.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Maguregui, M.; Morillas, H.; Marcaida, I.; Castro, K.; Garcia-Diego, F. J.; Osanna, M.; Madariaga, J. M. In-Situ Multianalytical Approach to Analyze and Compare the Degradation Pathways Jeopardizing Two Murals Exposed to Different Environments (Ariadne House, Pompeii, Italy). *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2018**, *203*, 201–209.

- (28) Svahn Garreau, H.; *Removal of Damaging Conservation Treatments on Mural Paintings a Research and Development Report from the Workshop November 2 & 3 2007, Österbybruk, Uppland Sweden*; Swedish National Heritage Board, 2010.
- (29) Giorgi, R.; Baglioni, M.; Berti, D.; Baglioni, P. New Methodologies for the Conservation of Cultural Heritage: Micellar Solutions, Microemulsions, and Hydroxide Nanoparticles. *Acc. Chem. Res.* **2010**, *43* (6), 695–704.
- (30) Baglioni, M.; Rengstl, D.; Berti, D.; Bonini, M.; Giorgi, R.; Baglioni, P. Removal of Acrylic Coatings from Works of Art by Means of Nanofluids: Understanding the Mechanism at the Nanoscale. *Nanoscale* **2010**, *2* (9), 1723–1732.
- (31) Baglioni, P.; Berti, D.; Bonini, M.; Carretti, E.; Dei, L.; Fratini, E.; Giorgi, R. Micelle, Microemulsions, and Gels for the Conservation of Cultural Heritage. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2014.
- (32) Gómez-Laserna, O.; Lando, G.; Kortazar, L.; Martínez-Arkarazo, I.; Monterrubio, I.; Sevillano, E.; Cardiano, P.; Olazabal, M. Á. Eco-Friendly Nanocomposite Products Based on BPA-Free Epoxy–Silica Hybrid Materials for Stone Conservation. *Archaeol. Anthropol. Sci.* **2019**.
- (33) Ntelia, E.; Karapanagiotis, I. Superhydrophobic Paraloid B72. *Prog. Org. Coatings* **2019**, 105224.
- (34) Veneranda, M. *Development of Novel Procedures for the Preservation of Archaeological Irons and Mural Paintings*; 2017.
- (35) Giacomelli, L.; Perrotta, A.; Scandone, R.; Scarpati, C. The Eruption of Vesuvius of 79 AD and Its Impact on Human Environment in Pompeii. *Episodes* **2003**, *26* (3), 235–238.
- (36) Montgomery, D. R.; Zabowski, D.; Ugolini, F. C.; Hallberg, R. O.; Spaltenstein, H. 8 Soils, Watershed Processes, and Marine Sediments. In *International Geophysics*; Academic Press, 2000; Vol. 72.
- (37) Özgenel, L. In Search For Ancient Pompeii And Herculaneum. *METU Journal of the Faculty of Architecture* **2008**, *25* (1), 1-25
- (38) Veneranda, M.; Prieto-Taboada, N.; de Vallejuelo, S. F. O.; Maguregui, M.; Morillas, H.; Marcaida, I.; Castro, K.; Madariaga, J. M.; Osanna, M. Biodeterioration of Pompeian Mural Paintings: Fungal Colonization Favoured by the Presence of Volcanic Material Residues. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2017**, *24* (24), 19599–19608.
- (39) Marcaida, I.; Maguregui, M.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Morillas, H.; Prieto-Taboada, N.; Veneranda, M.; Castro, K.; Madariaga, J. M. In Situ X-Ray Fluorescence-Based Method to Differentiate among Red Ochre Pigments and Yellow Ochre Pigments Thermally Transformed to Red Pigments of Wall Paintings from Pompeii. *Anal. Bioanal. Chem.* **2017**, *409* (15), 3853–3860.
- (40) Maguregui, M.; Castro, K.; Morillas, H.; Trebolazabala, J.; Knuutinen, U.; Wiesinger, R.; Schreiner, M.; Madariaga, J. M. Multianalytical Approach to Explain the Darkening Process of Hematite Pigment in Paintings from Ancient

- Pompeii after Accelerated Weathering Experiments. *Anal. Methods* **2014**, *6* (2), 372–378.
- (41) Veneranda, M.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Prieto-Taboada, N.; Maguregui, M.; Marcaida, I.; Morillas, H.; Martellone, A.; de Nigris, B.; Osanna, M.; Castro, K.; et al. In-Situ Multi-Analytical Characterization of Original and Decay Materials from Unique Wall Mirrors in the House of Gilded Cupids, Pompeii. *Herit. Sci.* **2018**, *6* (1).
- (42) Veneranda, M.; Prieto-Taboada, N.; de Vallejuelo, S. F. O.; Maguregui, M.; Morillas, H.; Marcaida, I.; Castro, K.; Madariaga, J. M.; Osanna, M. Biodeterioration of Pompeian Mural Paintings: Fungal Colonization Favoured by the Presence of Volcanic Material Residues. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2017**, *24* (24), 19599–19608.
- (43) Pérez, M. C.; García-Diego, F. J.; Merello, P.; D’Antoni, P.; Fernández-Navajas, A.; Ribera i Lacomba, A.; Ferrazza, L.; Pérez-Miralles, J.; Baró, J.-L.; Merce, P.; et al. Pinturas Murales de La Casa de Ariadna (Pompeya, Italia): Un Estudio Multidisciplinar de Su Estado Actual Enfocado a Una Futura Restauración y Conservación Preventiva. *Mater. Construcción* **2013**, *63* (311), 449–467.
- (44) Fusade, L.; Viles, H. A. A Comparison of Standard and Realistic Curing Conditions of Natural Hydraulic Lime Repointing Mortar for Damp Masonry: Impact on Laboratory Evaluation. *J. Cult. Herit.* **2019**, *37*, 82–93.
- (45) Elsen, J. Microscopy of Historic Mortars—a Review. *Cem. Concr. Res.* **2006**, *36* (8), 1416–1424.
- (46) Mas i Barberà, X. Study and Characterization of Composite Mortars for Use in Sealed Interventions, Replacements and Retort of Stone Sculptural-Ornamental Elements (In Spanish). **2006**, 1–413.
- (47) Miriello, D.; Bloise, A.; Crisci, G. M.; De Luca, R.; De Nigris, B.; Martellone, A.; Osanna, M.; Pace, R.; Pecci, A.; Ruggieri, N. New Compositional Data on Ancient Mortars and Plasters from Pompeii (Campania – Southern Italy): Archaeometric Results and Considerations about Their Time Evolution. *Mater. Charact.* **2018**, *146*, 189–203.
- (48) Jackson, M. D.; Mulcahy, S. R.; Chen, H.; Li, Y.; Li, Q.; Cappelletti, P.; Wenk, H. R. Phillipsite and Al-Tobermorite Mineral Cements Produced through Low-Temperature Water-Rock Reactions in Roman Marine Concrete. *Am. Mineral.* **2017**, *102* (7), 1435–1450.
- (49) Maguregui, M.; Knuutinen, U.; Castro, K.; Madariaga, J. M. Raman Spectroscopy as a Tool to Diagnose the Impact and Conservation State of Pompeian Second and Fourth Style Wall Paintings Exposed to Diverse Environments (House of Marcus Lucretius). *J. Raman Spectrosc.* **2010**, *41* (11), 1400–1409.
- (50) Great Pompeii Project. 2012. (<http://pompeii.org/en/the-great-pompeii-project/>) Visitado 1/09/2019
- (51) Hong, L.; Gu, X.; Lin, F. Influence of Aggregate Surface Roughness on Mechanical

- Properties of Interface and Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 338–349.
- (52) Meddah, M. S.; Zitouni, S.; Belâabes, S. Effect of Content and Particle Size Distribution of Coarse Aggregate on the Compressive Strength of Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2010**, *24* (4), 505–512.
- (53) Rahhal, V.; Talero, R. Calorimetry of Portland Cement with Silica Fume, Diatomite and Quartz Additions. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23* (11), 3367–3374.
- (54) Walker, R.; Pavía, S. Physical Properties and Reactivity of Pozzolans, and Their Influence on the Properties of Lime-Pozzolan Pastes. *Mater. Struct. Constr.* **2011**, *44* (6), 1139–1150.
- (55) Lirer, L.; Pescatore, T.; Booth, B.; Walker, G. P. L. Two Plinian Pumice-Fall Deposits from Somma-Vesuvius, Italy. *Bull. Geol. Soc. Am.* **1973**, *84* (3), 759–772.
- (56) Terra XRD Portable System: Mineralogical Characterization of Volcanic Materials from the Archeological Site of Pompeii (Italy). 2019.
- (57) Lalla, E. A.; Lopez-Reyes, G.; Sansano, A.; Sanz-Arranz, A.; Martínez-Frías, J.; Medina, J.; Rull-Pérez, F. Raman-IR Vibrational and XRD Characterization of Ancient and Modern Mineralogy from Volcanic Eruption in Tenerife Island: Implication for Mars. *Geosci. Front.* **2016**, *7* (4), 673–681.
- (58) Ergenç, D.; Fort, R. Multi-Technical Characterization of Roman Mortars from Complutum, Spain. *Measurement* **2019**, *147*, 106876..
- (59) Portillo, H.; Zuluaga, M. C.; Ortega, L. A.; Alonso-Olazabal, A.; Murelaga, X.; Martinez-Salcedo, A. XRD, SEM/EDX and Micro-Raman Spectroscopy for Mineralogical and Chemical Characterization of Iron Slags from the Roman Archaeological Site of Forua (Biscay, North Spain). *Microchem. J.* **2018**, *138*, 246–254.
- (60) Castriota, M.; Cosco, V.; Barone, T.; De Santo, G.; Carafa, P.; Cazzanelli, E. Micro-Raman Characterizations of Pompei's mortars. *J. Raman Spectrosc.* **2008**, *39* (2), 295–301.
- (61) Prieto-Taboada, N.; Gómez-Laserna, O.; Martínez-Arkarazo, I.; Olazabal, M. A.; Madariaga, J. M. Optimization of Two Methods Based on Ultrasound Energy as Alternative to European Standards for Soluble Salts Extraction from Building Materials. *Ultrason. Sonochem.* **2012**, *19* (6), 1260–1265.
- (62) Luis Costafreda Mustelier, J. GRANULOMETRÍA Y REACCIÓN PUZOLÁNICA.
- (63) Peng, M. X.; Wang, Z. H.; Xiao, Q. G.; Song, F.; Xie, W.; Yu, L. C.; Huang, H. W.; Yi, S. J. Effects of Alkali on One-Part Alkali-Activated Cement Synthesized by Calcining Bentonite with Dolomite and Na_2CO_3 . *Appl. Clay Sci.* **2017**, *139*, 64–71.



Resumen

El paisaje ha cobrado mayor importancia en los últimos años, claro ejemplo son las numerosas convenciones y congresos que se realizan al respecto, con el objetivo primario de conservar y preservar los elementos que lo componen. En especial, el objetivo principal es lo de salvaguardar y preservar los elementos arquitectónicos de los procesos de degradación y destrucción, asegurando sus valores históricos y culturales para las futuras generaciones. Los edificios Romanos conservados en la ciudad arqueológica de Pompeya presentan numerosas formas de degradación que, en algunos casos, han sido tratados haciendo uso de materiales inapropiados. Teniendo en cuenta que estudios previos han demostrado los problemas relacionados con el uso de morteros de conservación incompatibles con los materiales originales, el presente trabajo tiene el objetivo de evaluar el posible empleo del material volcánico del Vesubio como materia prima en la formulación de morteros “Romanos”. Para ello, se prepararon probetas de mortero y, mediante técnicas destructivas y no destructivas, se compararon sus características químico/físicas con las de probetas de referencia. Los resultados espectroscópicos y difractométricos determinan poca variación tanto en la composición mineralógica como elemental entre las probetas. Sin embargo, los morteros preparados con material volcánico del Vesubio han demostrado proporcionar mejores resultados en términos de contenido de sales solubles y resistencia mecánica a compresión con respecto a las cenizas comerciales. Estos resultados preliminares indican que, tras una oportuna optimización, el material volcánico de Pompeya podría ser empleado en la elaboración de morteros y cementos de conservación.

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea