



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización físico - química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)

Juan David Cañón Bermúdez
Ingeniero Físico

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química
Manizales, Colombia
2012



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Physical, chemical and mineralogical characterization of lime mortars used in historic bridges of brick arch in the region of the upper Cauca (Colombia)

Juan David Cañón Bermúdez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química

Manizales, Colombia

2012

Caracterización físico - química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)

Juan David Cañón Bermúdez

Tesis presentada como requisito para optar al título de: Magister en Ciencias – Física

Director:

Físico, Pedro Jose Arango Arango

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química

Manizales, Colombia

2012

Physical, chemical and mineralogical characterization of lime mortars used in historic bridges of brick arch in the region of the upper Cauca (Colombia)

Juan David Cañón Bermúdez

Tesis presentada como requisito para optar al título de: Magister en Ciencias – Física

Director:

Físico, Pedro Jose Arango Arango

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química

Manizales, Colombia

2012

Resumen

Este estudio presenta los resultados de la caracterización mineralógica de los morteros, de los puentes Cauca en la ciudad de Popayán y Ortiz en Cali; mediante las técnicas de Difracción de Rayos X (XRD), Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Electrónica de Barrido (ESEM), Ensayo de Compresión y Distribución del Tamaño de Grano. Los resultados convergen para revelar la naturaleza calcítica de los morteros utilizados en ambos puentes. Otras asociaciones mineralógicas se encontraron en las muestras tales como el cuarzo y minerales arcillosos, que solo varían en sus proporciones en cada muestra, siendo mayor en los morteros del puente Cauca en Popayán. Se elaboraron 9 tipos diferentes de morteros, y se seleccionaron los más compatibles para cada mortero, apoyado en la caracterización de los materiales, seleccionando los más similares.

Palabras Clave: Mortero, difracción, calorimetría, espectroscopia, cal.

Abstract

This study presents the results of the mineralogical characterization of original mortars of two historical bridges over the Cauca River located in Colombia's South West. We used techniques like X-ray diffraction (XRD), differential scanning calorimetry (DSC), Fourier transformed infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), compression test and grain size distribution. The results contribute to revealing the calcitic nature of the mortars used in both bridges. Other mineralogical associations were found in the samples, such as quartz and clay minerals, which only vary in their proportions in each sample. Nine different types of mortars were elaborated, and the most compatible were selected for each mortar from each bridge, supported on the materials characterization.

Keywords: Mortar, diffraction, calorimetry, spectroscopy, lime

Contenido

PÁG.

LISTA DE FIGURAS	8
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	3
General	3
Específicos	3
CAPÍTULO 1	4
GENERALIDADES ACERCA DE LOS MORTEROS DE CAL	4
1.1. Ciclo de la cal	6
1.2. Composición genérica de los tipos de cal	9
1.3. Desgaste de morteros	12
1.3.1. Proceso de deterioro mecánico	13
1.3.2. Proceso de deterioro químico	14
CAPÍTULO 2	16
DETALLE EXPERIMENTAL	16
2.1. Metodología de caracterización y diseño de morteros compatibles	16
2.2. Caracterización de morteros	19
2.2.1. Técnicas de caracterización de morteros	20
CAPÍTULO 3	30
DESARROLLO EXPERIMENTAL	30
3.1. Descripción de los puentes de arco	30
3.1.1. Puente sobre el río Cauca, en Popayán	30
3.1.2. Puente Ortiz en Cali	32
3.2. Toma de muestras	33
3.2.1. Muestras en el puente de Popayán sobre el río Cauca	33
3.2.2. Muestras en el puente Ortiz, en Cali	35
3.3. Caracterización de las muestras de mortero de cal	37
3.3.1. Mortero de pega del puente sobre el río Cauca en Popayán	37
3.3.2. Mortero de revoque del puente Cauca en Popayán PCMR-01	47
3.3.3. Mortero de pega del puente Ortiz en Cali POMP	55
3.3.4. Mortero de revoque del puente Ortiz en Cali POMR	63
3.4. Análisis comparativo de los morteros antiguos	71
3.4.1. Proporción aglomerante/agregado	71
3.4.2. Distribución de tamaño de grano	72
3.4.3. Difracción de rayos X	75
3.4.4. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier	76
3.4.5. Calorimetría diferencial de barrido	78
3.5. Aproximación a la formulación de morteros compatibles	80

3.6. Caracterización de morteros de restauración	81
3.6.1. Difracción de rayos X	81
3.6.2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.....	83
3.6.3. Ensayo de Compresion de morteros nuevos	85
3.7. Selección de morteros compatibles con los antiguos.....	86
CAPÍTULO 4.....	88
CONCLUSIONES	88
REFERENCIAS.....	90

Lista de figuras

Ilustración 1. Interior de una bóveda romana donde se aprecian ladrillos pegados con mortero de cal y enlucido a base del mismo material. Foto cedida por J. Galindo (2008)	4
Ilustración 2. Imagen de un horno para el cocido de la cal en Vijes (Valle del Cauca).....	7
Ilustración 3. Ciclo de la Cal (Dullinger, 2011)	8
Ilustración 4. Diagrama de transformaciones mineralógicas en una calcita rica en arcilla por calentamiento (Trindade, Dias, Coroado, & Rocha, 2009).....	10
Ilustración 5. Desgaste de morteros en el puente de El Humilladero, en Popayán.....	13
Ilustración 6. Desgaste de morteros	14
Ilustración 7. Procedimiento general para el análisis de morteros antiguos y formulación de morteros de restauración.....	19
Ilustración 8. Equipo de Difracción de Rayos X (Politecnica, 2011)	21
Ilustración 9. Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.....	22
Ilustración 10. Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.....	23
Ilustración 11. Microscopio Electrónico de Barrido de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.....	25
Ilustración 12. Agitador Magnético del Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.....	27
Ilustración 13. Tamices utilizados en el análisis de Distribución de Tamaño de Grano	28
Ilustración 14. Prensa Multiusos Sistematizada PS-27-1, de funcionamiento electromecánico, con pistón de carga de 2,8” de diámetro, a una velocidad de 1,4224 mm/min.	29
Ilustración 15. Alzada y fotografía del puente sobre el río Cauca, en Popayán.	31
Ilustración 16. Alzada y fotografía del puente Ortiz, en Cali	33
Ilustración 17. Extracción de núcleos del puente Cauca.	34
Ilustración 18. Muestras obtenidas del puente sobre el río Cauca, en Popayán.	34
Ilustración 19. Sitio de extracción de muestras de mortero de revoque del puente sobre el río Cauca, en Popayán.	35
Ilustración 20. Extracción de muestras de mortero de pega del puente Ortiz.....	36
Ilustración 21. Muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán.....	37
Ilustración 22. Proporción aglomerante/agregado de la muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán	38
Ilustración 23. Distribución del tamaño de grano del mortero PCMP-03	39
Ilustración 24. Difracción de rayos X de la muestra PCMP-02	40
Ilustración 25. Espectroscopia del mortero de pega PCMP.....	42
Ilustración 26. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra PCMP-05.....	43
Ilustración 27. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMP-03	45
Ilustración 28. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMP-03	46
Ilustración 29. Muestra del mortero PCMR-01	47
Ilustración 30. Proporción aglomerante/agregado de la muestra PCMR-01	48

Ilustración 31. Distribución del tamaño de grano de la muestra PCMR-01	49
Ilustración 32. Difracción de Rayos X de la muestra PCMR-01	50
Ilustración 33. Espectroscopia de la muestra PCMR-01	51
Ilustración 34. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra PCMR-01	52
Ilustración 35. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMR-01	53
Ilustración 36. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMR-01	54
Ilustración 37. Muestra del mortero de pega del puente Ortiz en Cali (POMP)	55
Ilustración 38. Proporción aglomerante/agregado de la muestra POMP-03	56
Ilustración 39. Distribución del tamaño de grano de la muestra POMP-03	57
Ilustración 40. Difracción de rayos X de la muestra POMP-02	58
Ilustración 41. Espectroscopia de la muestra POMP-03	59
Ilustración 42. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra POMP-03	60
Ilustración 43. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMP-03	62
Ilustración 44. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMP-03	63
Ilustración 45. Muestra del mortero de revoque del puente Ortiz en Cali	64
Ilustración 46. Proporción aglomerante/agregado de la muestra POMR-02	64
Ilustración 47. Distribución del tamaño de grano de la muestra POMR-02	65
Ilustración 48. Difracción de rayos X de la muestra POMR-01	66
Ilustración 49. Espectroscopia de la muestra POMR-02	68
Ilustración 50. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra POMR-02	69
Ilustración 51. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMR-02	70
Ilustración 52. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMR-02	71
Ilustración 53. Curva granulométrica del agregado de los morteros antiguos	73
Ilustración 54. Compacidad de las arenas	73
Ilustración 55. Espectroscopia de los morteros antiguos	77
Ilustración 56. Calorimetría diferencial de barrido de las muestras de morteros antiguos	79
Ilustración 57. Difracción de Rayos X de las muestras de morteros de restauración	82
Ilustración 58. Espectroscopia de las muestras de morteros de restauración	84

Introducción

El mortero puede definirse como la mezcla de un material aglomerante, un material de relleno llamado agregado, agua y -en algunas ocasiones- adiciones y otras materias primas, formando así una mezcla que al endurecerse presenta propiedades similares a las del cemento, lo que lo convierte en un material muy utilizado para pegar piezas de mampostería y en el revoque de superficies. Cuando la cal es el compuesto aglomerante, el producto final se denomina “mortero de cal”, de uso generalizado en civilizaciones antiguas, aunque hayan sido los romanos los primeros en usarlo ampliamente en todo tipo de obras, desarrollando métodos para su elaboración.

En Colombia las construcciones elaboradas con mortero de cal son numerosas y abarcan prácticamente todo el período de la Colonia e incluso muchas décadas de la República. Entre tales construcciones se cuentan muchos puentes de arco de ladrillo que se ubican a lo largo y ancho del país. Se trata de estructuras que se han deteriorado por las inclemencias del entorno y que por su condición paradigmática serán objeto de estudio en esta investigación, que busca caracterizar los morteros de cal con que fueron construidos mediante la aplicación de principios rigurosos que sirvan para la especificación de materiales de restauración, siempre teniendo en cuenta la compatibilidad química y mecánica.

Las prácticas de restauración de construcciones antiguas han originado varias anomalías debido a la incompatibilidad funcional entre los nuevos y antiguos materiales (Carneiro & Costa, 2001) provocando un detrimento del factor histórico y estético de la construcción. Como consecuencia las construcciones originales sobrevivientes han adquirido mayor valor patrimonial, lo cual obliga a nuevas formas de intervención.

Por tal razón existe la necesidad de aumentar el conocimiento de este tipo de materiales antiguos: conocer el tipo de aglomerante, tipo de agregado, el comportamiento mecánico, etc (Elsen, 2006). Todo lo anterior apuntando a desarrollar una metodología para abordar la formulación de morteros compatibles con los materiales preexistentes utilizando técnicas de caracterización avanzadas.

Para este estudio se escogieron 2 casos de una muestra de 23 puentes de arco de ladrillo construidos en el sur occidente de Colombia. El primero de estos casos de estudio es el Puente Ortiz, situado en la ciudad de Cali; el segundo es el puente que sobre el río Cauca existe en la ciudad de Popayán. En cada uno de ellos se pretende conocer las características químicas, físicas y mecánicas de los morteros de cal con que fueron construidos e intentar formular un mortero compatible, aunque este último objetivo pueda llegar a ser relativamente complejo.

Objetivos

General

Caracterizar física, química y mecánicamente los morteros de pega y de revoque pertenecientes a los puentes Cauca en Popayán y Ortiz en Cali, con el propósito de dar una nueva perspectiva sobre la actividad de la construcción histórica en Colombia; y recomendar un mortero compatible con cada mortero analizado, susceptible de ser usado en futuros trabajos de restauración para la conservación del bien cultural.

Específicos

- Determinar la proporción aglomerante/agregado del mortero y la distribución del tamaño de grano del agregado usado en la elaboración de los morteros de cal de los casos objeto de estudio.
- Determinar mediante la técnica de *Difracción de Rayos X* las estructuras cristalinas presentes en las muestras de mortero de cal obtenidas de los monumentos arquitectónicos.
- Analizar mediante *Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier* las fases no cristalinas tales como arcillas amorfas presentes en los morteros de cal.
- Conocer mediante *Microscopía Electrónica de Barrido* la morfología de los morteros antiguos para entender su microestructura y realizar correlaciones con las propiedades mecánicas.
- Con base en los resultados de la caracterización, formular morteros compatibles con los morteros preexistentes, teniendo en cuenta criterios de selección apropiados.

Capítulo 1

Generalidades acerca de los morteros de cal

La inmensa mayoría del patrimonio arquitectónico de la humanidad se construyó a partir del uso de morteros de cal, uno de los principales materiales constructivos empleados a lo largo de la historia. Sus aplicaciones y usos son y han sido muy diversos, abarcando desde funciones estructurales hasta meramente decorativas.



Ilustración 1. Interior de una bóveda romana donde se aprecian ladrillos pegados con mortero de cal y enlucido a base del mismo material. Foto cedida por J. Galindo (2008)

Los morteros de cal fueron utilizados en muchas de las grandes estructuras por civilizaciones tempranas, pero los romanos fueron los primeros en usarlos ampliamente, desarrollando métodos de fabricación adecuados (Galvan & Velazquez, 2011). A través de los siglos los morteros de cal han demostrado su gran calidad y durabilidad (Ilustración 1).

Los morteros reciben su nombre en función del aglomerante utilizado para prepararlos. Así hay morteros de yeso, morteros de cal, morteros de cemento o morteros mixtos (de cal y cemento). Para preparar un mortero se deberán dosificar sus componentes, es decir, establecer qué cantidad, en peso o en volumen, interviene cada componente en la mezcla. La dosificación se indica con dos números, el primero indica las partes del aglomerante y el segundo las partes del agregado.

El desarrollo del cemento Portland desde el s. XIX, ha provocado desde entonces la utilización indiscriminada de los morteros de cemento en obras de restauración del patrimonio arquitectónico, rompiéndose con la técnica milenaria de la cal. Las propiedades y cualidades del cemento prometen un magnifico comportamiento y gran durabilidad; su uso suponía incluso acabar con las tareas periódicas de mantenimiento de los morteros tradicionales de cal (Cruz, 1996). Sin embargo, su utilización o ha demostrado que sus características para su empleo en la construcción moderna, lo hacen desaconsejable cuando se trata de intervenir en el patrimonio histórico arquitectónico.

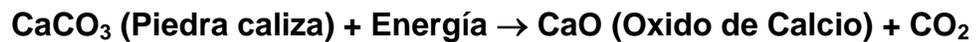
Las características propias de estos morteros de cemento hacen que no puedan sustituir a los morteros de cal tradicionales ya que fraguan rápido y resultan agresivos con la mampostería original. Muchas veces en la restauración, la utilización de materiales no adecuados, reducen la durabilidad, producen lesiones y resultados fuertemente antiestéticos. Ha sido entonces desde finales del siglo pasado cuando el mortero de cal ha vuelto a tener cierta presencia en la restauración del patrimonio arquitectónico.

En el ámbito colombiano, también se ha observado gran deterioro de las estructuras construidas a base de cal, como monumentos arquitectónicos y específicamente en los puentes de arco de ladrillo, dos de los cuales serán el objeto de estudio. Estos puentes, que datan de más de 100 años de

antigüedad, fueron construidos con el propósito de abrir camino entre ambos lados del río Cauca y actualmente presentan un fuerte desgaste por las condiciones ambientales normales de la región y de manera especial por su alta humedad. En este desgaste significativo del material aparece la necesidad de restauración teniendo en cuenta la importancia que han ganado estos puentes como patrimonio arquitectónico nacional.

1.1. Ciclo de la cal

Para entender la elaboración de los morteros de cal es necesario entender antes el ciclo de la cal. La producción de la cal se logra a partir de la calcinación de piedras caliza a altas temperaturas (por encima de 900°C), lo que produce la siguiente reacción:



Las técnicas de producción artesanal sitúan los bloques de piedra caliza molida en grandes hornos hechos de muros de ladrillos de arcilla (Ilustración 2) para someterlos dentro de ellos a un proceso de calcinación constante por períodos de 8 a 12 días, usando como combustible trozos de madera. El resultado de la calcinación de la piedra caliza produce mayoritariamente óxido de calcio [CaO], también llamada cal viva (NTC-5163, 2003).

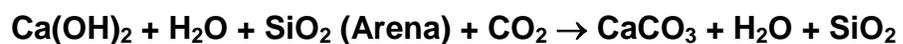


Ilustración 2. Imagen de un horno para el cocido de la cal en Vijes (Valle del Cauca)

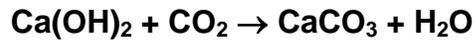
Cuando el proceso termina, la cal viva resultante es molida nuevamente y vaciada en pozos de piedra en donde se apaga con agua. Se produce entonces una segunda reacción química que convierte la cal viva en hidróxido cálcico o cal apagada (Bores, 1998):



Posteriormente para obtener el mortero de cal, la cal hidratada se mezcla con arena y agua en diferentes proporciones de tal manera que el hidróxido de cal después de dispuesto en la construcción reacciona con el CO_2 de la atmósfera, se carbonata y adquiere endurecimiento. En este proceso la reacción se indica de la siguiente manera:



Con esta última mezcla de hidróxido de cal con arena y agua se obtiene el mortero de cal. El mortero fragua cuando el exceso de agua se seca, y se endurece debido a la acción del dióxido de carbono de la atmosfera, proceso conocido como carbonización (Brostow, 1981), que se muestra en la siguiente reacción:



De esta forma se completa el ciclo de la cal (Ilustración 3) el cual inicia y termina con el carbonato de calcio [CaCO₃].

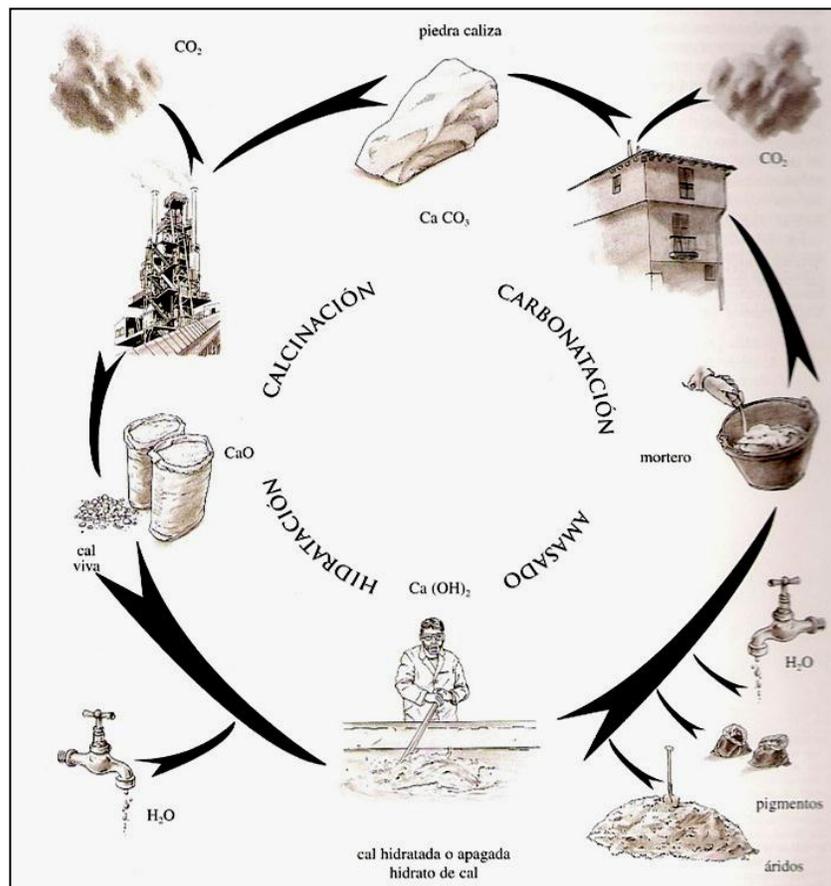


Ilustración 3. Ciclo de la Cal (Dullinger, 2011)

La reacción de carbonatación es muy lenta, pues empieza a las veinticuatro horas de amasar la pasta y termina al cabo de los seis meses, por lo que las obras en que se emplean los morteros de cal tardan mucho en secarse y adquirir la solidez definitiva.

1.2. Composición genérica de los tipos de cal

La cal común utilizada en construcción es la cal apagada pero existen diversas variantes de cal en función del grado de pureza de la roca caliza utilizada en su fabricación. Estas rocas no solo contienen calcita, en su composición también intervienen otro tipo de materiales (arcilla, óxido de magnesio, óxido de hierro y materias orgánicas) que hacen que la cal resultante tenga propiedades diferentes (CEAC, 2007). Entre los principales tipos de cal se encuentran: La cal aérea y la cal hidráulica.

Cal aérea (L): son aquellas que tienen la propiedad de endurecer mediante el contacto con el aire. Se obtienen a partir de rocas calizas con un máximo de 5% de arcillas y hasta un 5% como máximo del total de otras materias (CEAC, 2007). El otro 90% se compone de calcita. La cal aérea es más fina y fácil de trabajar pero también menos resistente a la acción del agua (AFAM, 2003); por eso casi siempre se usa para acabados. La cal aérea en sitios húmedos permanece indefinidamente blanda y en el agua termina por disolverse. A esta categoría pertenecen la cal cálcica y la cal dolomítica.

Cal hidráulica: La cal hidráulica se obtiene por calcinación de calizas con contenidos de arcillas aproximadamente entre el 5% y el 25%, resultando un compuesto aglomerante que, además de cal viva, contiene silicatos y aluminatos (Barbero, 1998). Debido a esas "impurezas", sólo una temperatura mayor a la de la calcinación tradicional de los hornos de leña (1200°C), la podría convertir en cal viva. La cal hidráulica aparte de buena trabajabilidad adquiere mayor resistencia a la compresión y una mayor resistencia inicial

estructura cristalina colapse y se forme una estructura de silicato de alúmina amorfo desarrollando mejores propiedades mecánicas en el mortero.

La primera transformación durante la cocción es la desaparición de la goethita a 300°C. La goethita se descompone en forma de hematita de acuerdo con la reacción $2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Aunque la hematita bien cristalizada se encuentra a 900°C. Caolinita se descompone en metacaolinita amorfa a 500°C por la eliminación de los grupos hidroxilo de la red de silicato, de acuerdo con la reacción $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$. Anatasa desaparece después de 700°C. A 700°C, CaCO_3 se empieza a descomponer produciendo CaO , con liberación de CO_2 .

La descomposición y la desaparición de todas las fases contribuyen a la formación de una fase vítrea. En esta etapa la arcilla es esencialmente un material amorfo con algunos granos residuales de calcita y cuarzo, de hematita y de neoformados. A 900°C nuclean nuevas fases cristalinas y crecen a partir del material vitrificado produciendo la gehlenita, wollastonita, larnite, que se mantienen entre 900°C y 1100°C. Después de 700°C el CaO libre reacciona con sílice y alúmina derivados de la descomposición de la Illita, formando **Gehlenita** de acuerdo con la siguiente reacción: $3\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (mezcla amorfa) + $6\text{CaO} \rightarrow 3\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (Gehlenita). Wollastonita (CaSiO_3) es otra fase abundante, formado por la reacción siguiente: $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$. Por lo general, wollastonita y gehlenita se consideran compuestos intermedios, que se vuelven inestables en presencia de SiO_2 y reaccionan para dar **Anortita** ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Larnite (Ca_2SiO_4) también se formó como una fase de menor importancia de la reacción entre la cal y cuarzo: $2\text{CaO} + \text{SiO}_2$ amorfa $\rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4$.

- **Cales hidráulicas artificiales (HL):** tienen hidraulicidad algo superiores a la de las cales hidráulicas naturales, contienen sustancias añadidas antes o después de la cocción, como: polvo de roca volcánica, cenizas volantes de la combustión de petróleo, escorias siderúrgicas, fragmentos de ladrillos o de cerámica que reaccionan con el hidróxido de calcio (Genestar, Pons, & Más, 2006) a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes (Martinez & Montes, 2007). Los materiales hidráulicos producen un incremento de las resistencias mecánicas de los morteros y una reducción de su permeabilidad, gracias a la mayor cohesión entre el aglomerante y el árido (Arizzi & Cultrone, 2009).

1.3. Desgaste de morteros

A pesar de que el mortero representa un pequeño porcentaje de la mampostería, su influencia en el comportamiento estructural es significativa, su calidad y comportamiento es tan fundamental como la calidad de los ladrillos. Como todos los materiales, los morteros sufren algún tipo de desgaste en el tiempo. Existe multiplicidad de factores que intervienen en la degradación de los morteros (mecánico, térmico, químico, incluso biológico). Los patrones de deterioro visibles más comunes son los huecos amplios y la pérdida de material del mortero de unión (Ilustración 5).



Ilustración 5. Desgaste de morteros en el puente de El Humilladero, en Popayán

1.3.1. Proceso de deterioro mecánico

Cuando el mortero de cal se encuentra entre los ladrillos, se pueden producir fatigas compresoras, que pueden llegar a ser muy grandes, originando en el mortero esfuerzos que sobrepasen el límite de elasticidad y aun el de ruptura. El proceso de rotura por fatiga se caracteriza por tres etapas distintas: **(1)** iniciación de la grieta, en la cual se forma una grieta en algún punto de alta concentración de esfuerzos; **(2)** propagación de la grieta, durante la cual la grieta avanza de manera incremental, y **(3)** rotura final, la cual ocurre una vez que la grieta ha alcanzado un tamaño crítico. (Ilustración 6).

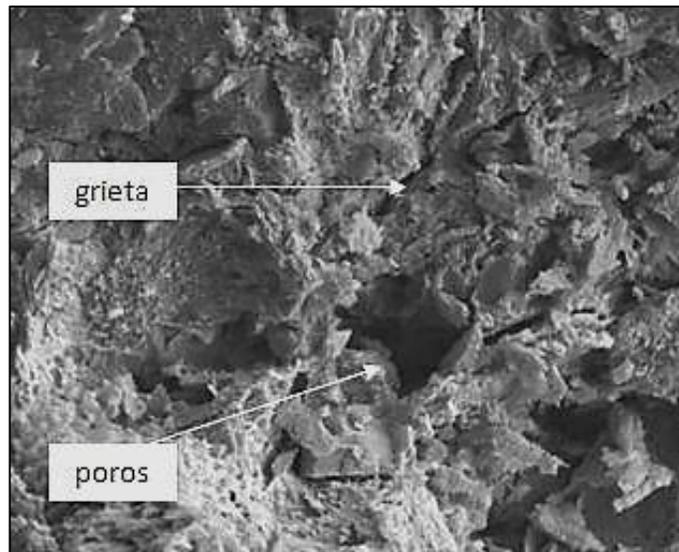


Ilustración 6. Desgaste de morteros

El crecimiento de grietas puede ser ya sea transgranular (a través de los granos) o intergranular (a lo largo de los límites de grano). La resistencia a la fractura de morteros puede verse afectada por diminutas grietas superficiales o grietas interiores y por poros internos o externos que de lograrse reducir mejoraría la capacidad de carga.

1.3.2. Proceso de deterioro químico

Los procesos de deterioro de tipo químico pueden definirse como aquellos que implican un cambio en la composición química del mortero. Generalmente, estos procesos de alteración suponen la interacción de una solución acuosa con el material, produciendo una solución de composición diferente a la inicial. El medio de alteración transporta parte de los productos fuera del material, diluyendo el material.

La disolución es el tipo de reacción química más importante en los procesos de alteración ya que los productos de reacción suelen ser transportados fuera del sistema.

El carbonato de calcio sufre disolución a través de ataque ácido. El ácido carbónico H_2CO_3 se forma por reacción entre el dióxido de carbono (CO_2) procedente de la atmósfera y el agua (U. de Granada, 2007). Esta reacción es la siguiente:



La calcita en contacto permanente con el ácido carbónico se disuelve según la siguiente reacción (Bores, 1998):



El bicarbonato cálcico es un producto muy poco estable y muy soluble en agua, de tal forma que el carbonato de calcio se va disolviendo con el agua de lluvia y demás agentes agresivos.



De estas ecuaciones se deduce que cuanto más ácida es la disolución, mayor es su capacidad de disolver el carbonato CaCO_3 .

Capítulo 2

Detalle experimental

Una vez se han comprendido las características más importantes de la cal, se hace a continuación una descripción de la metodología empleada para la caracterización de morteros de cal orientadas a identificar sus propiedades más representativas, las mismas que a su vez han de permitir lograr un mortero nuevo, compatible con los preexistentes.

2.1. Metodología de caracterización y diseño de morteros compatibles

La metodología utilizada en el proceso de diseño debió, idealmente, satisfacer el siguiente procedimiento:

1. Realizar la toma de muestras en los monumentos: esta toma de muestras se hace a partir de al menos 50g de muestra en lugares donde se garantice la presencia del material original con el propósito de identificar las características originales del material antiguo. Los sitios escogidos para hacer las extracciones fueron en todos los casos la parte inferior de los puentes en virtud de que su posición asegura que se trata de muestras originales.
2. Se realiza una separación de las capas para diferenciar material orgánico, material perteneciente al ladrillo y otros posibles materiales, para su posterior caracterización. Esto debido a que el mortero de pega debe ser extraído mediante núcleos. Todas las muestras se recubren en papel aluminio y se almacenan para su transporte en bolsas plásticas previamente rotuladas contenidas en cajas térmicas cerradas.

3. Determinación de la composición aproximada de la *matriz del mortero preexistente* y de sus características físicas, químicas y mecánicas. Para tal propósito se aplican las siguientes técnicas de caracterización:
 - *Difracción de Rayos X*: para identificar fases cristalinas, arcillosas y calcítica principalmente.
 - *Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier*: para la identificación de material no cristalino.
 - *Calorimetría Diferencial de Barrido*: para la determinación de la hidraulicidad de los morteros antiguos.
 - *Microscopia Electrónica de Barrido en Ambiente*: observar la morfología y la identificación de compuestos hidráulicos por quema de arcillas dentro de la materia prima (caliza).
 - *Distribución del Tamaño de grano del Agregado*: Analizar la granulometría de las partículas del agregado para determinar ciertas características como resistencia a la compresión.

4. Se hará la preparación de 9 tipos diferentes de morteros teniendo en cuenta la caracterización anterior, aplicando las técnicas de elaboración antiguas y utilizando materias primas de la región, con el propósito de seleccionar los más compatibles con cada uno de los morteros preexistentes. Para esta preparación se hacen diferentes proporciones de aglomerante, agregado y agua.

5. Ejecución de pruebas de caracterización a los morteros nuevos para verificar los requisitos mínimos y de similitud de las características principales entre morteros preexistentes y morteros nuevos. Para esta caracterización de los morteros nuevos se utilizan las siguientes técnicas:

- *Difracción de Rayos X*: identificación de compuestos similares a los preexistentes.
 - *Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier*: identificación de compuestos similares a los preexistentes.
 - *Ensayo de Compresión*: determinar la compatibilidad mecánica entre los morteros de restauración y los elementos constructivos preexistentes.
6. De los morteros diseñados escoger los más compatibles para mortero de pega y mortero de revoque de ambos puentes: puente sobre el río Cauca en Popayán y Puente Ortiz en Cali.
7. De ser necesario hacer correcciones a las proporciones probada o cambio de materias primas, hasta una razonable similitud de las características fundamentales se hayan obtenido para un adecuado desempeño y compatibilidad.



Ilustración 7. Procedimiento general para el análisis de morteros antiguos y formulación de morteros de restauración

2.2. Caracterización de morteros

El campo de la conservación de monumentos históricos busca obtener información del tipo de aglomerante y agregado, las proporciones de la mezcla, la distribución del tamaño de grano, la presencia de adiciones (que mejoren las propiedades mecánicas) y otras materias primas (orgánicas, fibras, pelo animal, filler, polvo cerámico, etc) y así identificar los componentes necesarios para producir un mortero compatible tanto en aspectos mecánicos, químicos, físicos y estéticos (Válek, 2000).

La caracterización de morteros históricos hasta 1970-1980 estaba principalmente basada en análisis químicos tradicionales hechos por vía húmeda (Elsen, 2006). La interpretación de estos resultados era difícil y frecuentemente imposible sin un buen conocimiento de la naturaleza de los diferentes componentes del mortero; es por ello que la mayoría de caracterizaciones posteriores, se han respaldado en técnicas más avanzadas. En cualquier caso, la selección de una técnica de análisis apropiada depende principalmente de los interrogantes que deben ser resueltos.

2.2.1. Técnicas de caracterización de morteros

Teniendo en cuenta el gran número de técnicas físico-químicas que pueden ser aplicadas en la caracterización de morteros históricos, se hace una descripción de las utilizadas en esta investigación. La microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X, proporcionan una caracterización de los componentes principales, mientras que la espectroscopia infrarroja, además incluye información importante sobre los componentes poco cristalinos, así como el contenido de agua y de hidratos silico aluminatos (Silva, Wenk, & Monteiro, 2005) .

2.2.1.1. Difracción de rayos X

Una de las técnicas más importantes en la caracterización de los materiales (Ilustración 8). Esta técnica, basada en la difracción de los rayos X por los cristales, se utiliza para conocer las fases cristalinas presentes en la muestra (Braga Reis, 1994). La técnica de difracción de rayos X puede resolver un gran número de preguntas, tales como tipo de aglomerante y agregado utilizado en la formulación del mortero.

Cualquier especie cristalina produce siempre un diagrama de difracción característico y, si la muestra está constituida por una mezcla de diferentes

especies, el diagrama correspondiente manifestará la suma de los efectos de difracción individuales de cada una de ellas. El diagrama de difracción puede ser considerado, por tanto, como la “huella dactilar” de la fase cristalina que lo ha producido (Martín, 1996).



Ilustración 8. Equipo de Difracción de Rayos X (Politecnica, 2011)

La técnica de difracción de rayos X es uno de los primeros pasos en la identificación cualitativa de los diferentes componentes del mortero permitiendo una caracterización de los agregados y del aglomerante (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005).

2.2.1.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

En esta técnica se hace incidir radiación infrarroja sobre la muestra, la cual hace vibrar los grupos funcionales en un número de onda característico y conociendo este número de onda al cual vibran las moléculas se pueden identificar sus grupos funcionales y aproximarse a su composición (Ilustración 9).



Ilustración 9. Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

El espectro depende del tipo de átomos presentes y del tipo de enlaces presentes (sencillos, dobles o triples), es decir, para cada combinación de átomos hay una frecuencia de absorción característica. Las moléculas absorberán aquellas frecuencias de la luz que sean exactamente iguales a las frecuencias de vibración de los distintos grupos funcionales que constituyen la molécula. La luz que no fue absorbida es transmitida desde la muestra a un detector y una computadora la analizará y determinará las frecuencias que fueron absorbidas. Para el caso de esta investigación, el análisis FTIR revela compuestos desarrollados en los morteros en los años de curado (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005).

La espectroscopía infrarroja (FTIR) se utiliza para obtener información cualitativa, de los compuestos característicos que figuran en el mortero y para la determinación de presencia de sales (nitratos, sulfatos, oxalatos, etc.), así como compuestos orgánicos (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005).

Para el caso de estudio, las muestras fueron pulverizadas con bromuro de potasio (KBr), para hacer luego una pastilla compacta. Se empleó esta sal porque es invisible a la radiación infrarroja. Las muestras fueron analizadas en el rango 400 hasta 4000cm^{-1} en el modo de Transmitancia.

2.2.1.3. Calorimetría diferencial de barrido DSC

La técnica DSC tiene su fundamento en la medida del **flujo de calor** que hay que suministrar, independientemente, a una muestra M y a una referencia R, para que ambas sigan el mismo programa de temperaturas $T_p(t)$.



Ilustración 10. Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Un sistema de control permite que las temperaturas instantáneas de cada crisol (T_M y T_R) se midan y comparen continuamente con el valor programado $T_p(t)$. La energía suministrada, en cada instante, por cada resistencia es proporcional a la diferencia de temperaturas entre cada crisol y la temperatura programada, de acuerdo con:

$$E_M = W_M(T_M - T_p)$$

$$E_R = W_R(T_R - T_p)$$

Donde E_M y E_R son las energías suministradas por las resistencias y W_M y W_R constantes del sistema, que dependen de las características de cada material (muestra y referencia). En cada instante, la diferencia de energía $\Delta E = E_M - E_R$, requerida para mantener las dos celdas a la temperatura programada es la magnitud que se representa en el termograma, como una función de $T_p(t)$.

La referencia tiene que ser un material libre de transiciones térmicas en el rango de temperaturas bajo estudio. De esta forma, todas aquellas transiciones de la muestra se detectarían en el termograma, bien como un pico o bien como un hombro, dependiendo del tipo de transición que tenga lugar (Saja, 2000).

Los valores ΔE pueden ser positivos o negativos dependiendo de la naturaleza de la transición (exotérmica o endotérmica). Existen varios tipos de transición que pueden ser: fusión, cristalización, transición vítrea, descomposición, evaporación, sublimación, evaporación en crisol cerrado, etc. La versatilidad y simplicidad de esta técnica, hace que la calorimetría diferencial de barrido sea una técnica fundamental para determinar las características de los morteros (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005). Para los análisis térmicos de las muestras de mortero se aplicó una rampa de calentamiento de 10°C/min desde la temperatura ambiente hasta los 450°C, utilizándose nitrógeno como gas de purga, con un flujo de 50ml/min.

2.2.1.4. Microscopía electrónica de barrido en ambiente ESEM

El microscopio electrónico de barrido, proporciona información sobre la morfología mineral, tamaño de los cristales, composición química y las fases formadas en la muestra (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005). El microscopio electrónico de barrido emite electrones (Ilustración 11), estos electrones al chocar contra el material, transfieren parte de su energía cinética a los átomos del mismo haciendo que esta emita electrones secundarios, electrones retro-dispersados y rayos X; con esta información se adquiere una imagen de la morfología de la muestra obteniendo una alta resolución de hasta unos pocos nanómetros. Para identificar la textura de los agregados minerales, la forma de los cristales y su composición química, la técnica de análisis de

microscopía electrónica de barrido SEM/EDS puede ser utilizada (Zamba, Stamatakis, Cooper, & Themelis, 2007).



Ilustración 11. Microscopio Electrónico de Barrido de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Con los electrones secundarios se obtiene imagen de morfología, con los electrones retro-dispersados se obtiene una imagen de la diferencia de fases en tonalidad de grises de la muestra y con rayos X característicos sirve para obtener un análisis elemental y mapeos químicos de la zona analizada, este tipo de análisis se conoce como Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS).

La caracterización por EDS y SEM se realizó en un microscopio electrónico de barrido ambiental E-SEM Phillips XL 30, el cual posee un filamento de tungsteno con 30 KeV de energía máxima. Un análisis SEM, junto con un análisis de difracción de rayos X, son muy importantes en el proceso de caracterización de los morteros antiguos. Con un SEM equipado con un detector de EDS (energía dispersiva de rayos-X), una valiosa información puede obtenerse en la composición de la fase mineral y en la estructura de los poros del mortero histórico (Elsen, 2006).

2.2.1.5. Proporción aglomerante/agregado y distribución del tamaño de grano

Con la aplicación de las diferentes técnicas de caracterización de materiales sólo se conocen los componentes de la mezcla de morteros antiguos, pero no la dosificación exacta en la que intervinieron cada uno de ellos; por lo tanto es necesario hacer una separación del agregado para determinar la proporción original utilizada en la elaboración del mortero antiguo y duplicarlo para fines de restauración.

El procedimiento de desagregación del mortero consiste en desglosar de forma mecánica el mortero, en este caso con un agitador magnético de baja frecuencia en medio acuoso (Ilustración 12); el cual no provoca ningún efecto mecánico fuerte, que pudiera romper los granos del agregado, por lo cual pudieran cambiar su tamaño. El procedimiento de desagregación se prolonga hasta que los granos gruesos no se pueden desagregar más y parecen estar al descubierto total (Sandrolini & Franzoni, 2010). La dosificación de los morteros es un parámetro importante que influye en las características físicas, mecánicas y de durabilidad de los morteros. El ataque ácido no fue utilizado debido a la posible presencia de agregados calcíticos y una posible pérdida de algunas fracciones solubles del agregado.



Ilustración 12. Agitador Magnético del Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Cuando se parte de un mortero antiguo en el que el árido está aglomerado, se debe seguir un procedimiento de separación del ligante antes de realizar la granulometría. (Sánchez, 2002). Después de la desegregación del mortero, se seca el agregado y se tamiza con el fin de determinar la distribución de tamaño de grano, las fracciones así obtenidas se utilizan para la caracterización del mortero. La importancia del estudio granulométrico del árido radica en el hecho de que el árido constituye el esqueleto del mortero, siendo en la mayoría de los casos el componente mayoritario del mismo. La granulometría consiste en agrupar los granos en función del tamaño. Para ello, se emplea una serie de tamices cuya dimensión de malla disminuye en progresión geométrica (Ilustración 13).



Ilustración 13. Tamices utilizados en el análisis de Distribución de Tamaño de Grano

La determinación de la curva granulométrica es de gran importancia cuando es necesario realizar la elección de una arena para elaborar un mortero compatible, pero además informa sobre la idoneidad del mortero ya que en algunos morteros se emplean granulometrías incorrectas que no proporcionan una adecuada compacidad. Los tamices utilizados fueron: No.8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200; según la norma ASTM E-11/2004.

2.2.1.6. Ensayo de compresión

El resultado de un esfuerzo es la deformación, se encuentra que para esfuerzos suficientemente pequeños, el esfuerzo es proporcional a la deformación; la constante de proporcionalidad depende del material que se deforma. A esta constante de proporcionalidad se le llama modulo elástico (Serway & Jewett, 2008). Por lo tanto, el modulo elástico se define como la proporción del esfuerzo a la deformación resultante: **Modulo Elástico:** Esfuerzo/Deformación

Cuando se realizan experimentos de tracción o compresión, dicho factor se conoce con el nombre de módulo de Young o módulo de elasticidad (Saja, 2000). El módulo de Young da información acerca de cómo se comporta el

material ante una carga estática externa. La resistencia a la compresión tiene importancia principalmente en los materiales sometidos a compresión tales como los morteros de pega. Los resultados de las pruebas de compresión se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de mortero cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada (Ilustración 14).

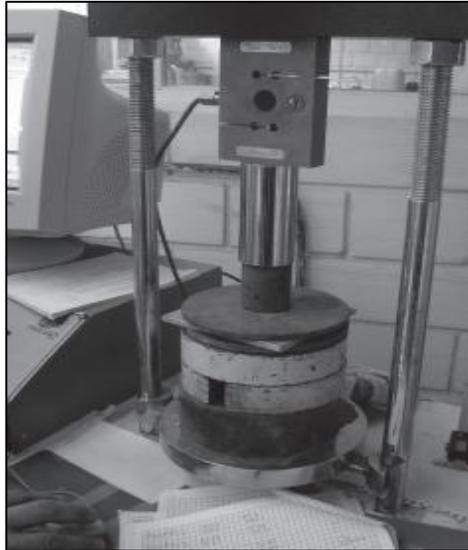


Ilustración 14. Prensa Multiusos Sistematizada PS-27-1, de funcionamiento electromecánico, con pistón de carga de 2,8" de diámetro, a una velocidad de 1,4224 mm/min.

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C133-97 mediante el uso de una prensa multiusos sistematizada PS-27-1 (Figura 2.8), la cual está conectada a un ordenador que permite arrojar los datos experimentales obtenidos durante el ensayo. A través de ellas se logró la obtención de los siguientes datos significativos de los morteros: (a) Carga Máxima (N), (b) Resistencia a la compresión en Frío y (c) Modulo de elasticidad.

Capítulo 3

Desarrollo experimental

Para el desarrollo experimental de esta investigación se tomaron dos puentes de arco de ladrillo como casos de estudio en virtud de su fecha de construcción (uno del s. XVIII, otro del s. XIX) y sus características morfológicas. A continuación se hace una descripción física de cada uno de los puentes, de las muestras obtenidas en cada uno de ellos y de las rutinas aplicadas sobre estas.

3.1. Descripción de los puentes de arco

A lo largo de los siglos XVIII y XIX floreció sobre una superficie de 2.000 kilómetros cuadrados situada en la región geográfica del alto Cauca (Colombia), una tradición constructiva de raíz mediterránea relacionada con la preparación de los materiales de construcción (ladrillos y morteros), para la conformación de puentes de arcos de ladrillo; unas estructuras que se han conservado a pesar de las difíciles condiciones de su entorno natural y social y de una fuerte e intensa actividad sísmica.

3.1.1. Puente sobre el río Cauca, en Popayán

El llamado “puente viejo” sobre el río Cauca, está situado en el municipio de Popayán. Su ubicación corresponde al primer camino entre Popayán y Cali. El tramo longitudinal del puente tiene una orientación diagonal en sentido noroeste – sureste por lo que sus dos costados principales reciben un intenso asoleamiento a lo largo de todo el año. Su construcción inicio en el año de 1767 y su terminación fue a mediados del año 1773

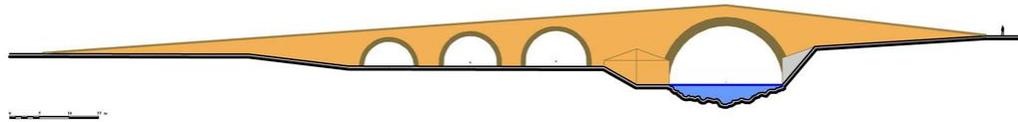


Ilustración 15. Alzada y fotografía del puente sobre el río Cauca, en Popayán.
Fotografía del autor

El puente está construido principalmente en ladrillo (Ilustración 15), aunque también presenta algunas secciones elaboradas en piedra. La estructura tiene un ancho entre los pasamanos de 5m y alcanza los 5,84m si consideramos el espesor de estos últimos. Consta de cuatro arcos de medio punto elaborados completamente en ladrillo que se distribuyen a lo largo de sus 159m de longitud.

Aún en pie y en servicio, el puente no presenta alteraciones ni modificaciones sustanciales, como tampoco obras de intervención orientadas a mejorar su capacidad resistente. Sobre su tablero de pendiente única transita hoy un tráfico vehicular que alcanza las 50 toneladas mientras que su entorno inmediato se debate entre el abandono y el olvido.

3.1.2. Puente Ortiz en Cali

El Puente Ortiz está situado en el centro histórico de la ciudad de Cali, sobre el río del mismo nombre (Ilustración 16). Durante años constituyó el medio más eficaz para cruzar el río y comunicar el centro de la ciudad con tierras de labranza. En la actualidad el puente se encuentra intervenido por un equipo de arqueólogos que han permitido desenterrar parte de sus cimentaciones, lo que ha facilitado la toma de muestras inalteradas por no haberse encontrado expuestas al medio ambiente en los últimos 70 u 80 años.

El puente Ortiz fue construido entre 1835 y 1845, bajo la dirección inicial de José Montehermoso y posteriormente de Fray José Ignacio Ortiz, con el fin de reemplazar a una precaria estructura hecha en guadua. Los arcos del puente tenían 8,35 metros de diámetro y el ancho de la calzada apenas alcanzaba los 5,10 metros.

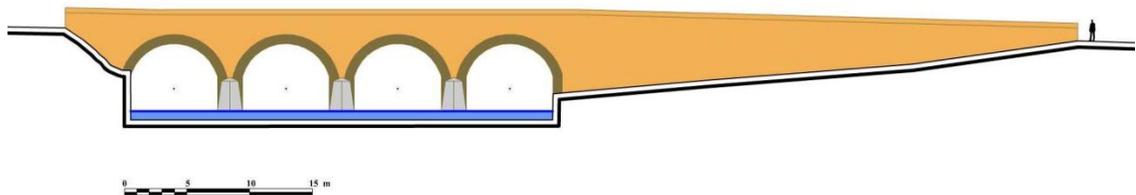




Ilustración 16. Alzada y fotografía del puente Ortiz, en Cali

El cuerpo del puente es enteramente de ladrillo pegado con mortero de cal y cimentado sobre una base rocosa. Los trabajos arqueológicos desarrollados desde enero de 2011, a fin de salvar el extremo sur de la estructura original, de este sitio han sido tomadas las muestras de mortero para el desarrollo de la investigación, está conformado por dos muros no paralelos de 4m de altura y unos 18m de longitud.

3.2. Toma de muestras

Los sitios escogidos para hacer las extracciones fueron, para cada uno de los dos casos, los siguientes:

3.2.1. Muestras en el puente de Popayán sobre el río Cauca

En el puente sobre el río Cauca, en Popayán, se tomaron muestras de mortero de pega de la parte inferior de las bóvedas, ya que esto asegura que se trata de muestras originales, no afectadas por intervenciones posteriores al proceso de construcción inicial. Se decidió extraer núcleos haciendo uso de un taladro

extractor HILTI modelo DDBCQ-S (Ilustración 17). Se realizó la extracción del núcleo utilizando una broca de 0,4m de longitud y 0,051m de diámetro interno.



Ilustración 17. Extracción de núcleos del puente Cauca.

Las muestras obtenidas tenían forma cilíndrica y estaban constituidas por una sección de mortero confinada entre trozos de ladrillo (Ilustración 18). Una vez en el laboratorio, se intentó cortar pequeños cubos la sección de mortero; sin embargo, esto fue imposible, lográndose obtener solo polvo heterogéneo de cada una de las muestras, un hecho que impediría su utilización en pruebas de resistencia a la compresión.



Ilustración 18. Muestras obtenidas del puente sobre el río Cauca, en Popayán.

Para obtener muestras de mortero de revoque bastó con una extracción simple, por desconchamiento, obtenidas de la parte superior del tímpano que mira al occidente (Ilustración 19).



Ilustración 19. Sitio de extracción de muestras de mortero de revoque del puente sobre el río Cauca, en Popayán.

3.2.2. Muestras en el puente Ortiz, en Cali

En el caso del puente Ortiz, las muestras de mortero, tanto de pega como de revoque fueron obtenidas de forma manual, empleando un cincel. Tres especímenes del mortero de pega fueron tomadas del muro que mira al oriente y dos especímenes del muro que mira al occidente. Las muestras del mortero de revoque fueron tomadas enteramente del muro que mira hacia el occidente.



Ilustración 20. Extracción de muestras de mortero de pega del puente Ortiz

Trece muestras (13) de morteros fueron seleccionados para este estudio. La Tabla 3.1. identifica las muestras y su nomenclatura:

Tabla 3.1. Relación de las muestras obtenidas en los puentes

MUESTRA		
1	PCMR-01	Puente Cauca en Popayán, Mortero de Revoque, Espécimen 01
2	PCMP-01	Puente Cauca en Popayán, Mortero de Pega, Espécimen 01
3	PCMP-02	Puente Cauca en Popayán, Mortero de Pega, Espécimen 02
4	PCMP-03	Puente Cauca en Popayán, Mortero de Pega, Espécimen 03
5	PCMP-04	Puente Cauca en Popayán, Mortero de Pega, Espécimen 04
6	PCMP-05	Puente Cauca en Popayán, Mortero de Pega, Espécimen 05
7	POMR-01	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Revoque, Espécimen 01
8	POMR-02	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Revoque, Espécimen 02
9	POMP-01	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Pega, Espécimen 01
10	POMP-02	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Pega, Espécimen 02
11	POMP-03	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Pega, Espécimen 03
12	POMP-04	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Pega, Espécimen 04
13	POMP-05	Puente Ortiz en Cali, Mortero de Pega, Espécimen 05

3.3. Caracterización de las muestras de mortero de cal

3.3.1. Mortero de pega del puente sobre el río Cauca en Popayán

La muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán (Ilustración 21) posee una densidad de $2,682\text{g/cm}^3$. Corresponde a los especímenes PCMP-01, 02, 03, 04 y 05. Diferentes especímenes se emplearon para cada una de las pruebas.



Ilustración 21. Muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán

3.3.1.1. Proporción y distribución del tamaño de grano del mortero PCMP-03

La proporción aglomerante/agregado se obtuvo mediante la desegregación del mortero mediante el agitador mecánico; el residuo obtenido de arena después de la separación fue pesado y permitió conocer su contenido real en la muestra, indicando que el mortero está compuesto principalmente de arena en un 69,87% y el 30,12% correspondiente al aglomerante para obtener una proporción de 1:2,32 (Ilustración 22).

Tabla 3.2. Proporción aglomerante/agregado del mortero de pega del puente Cauca en Popayán

Aglomerante	Arena	Proporción
30,12%	69,87%	1 : 2,32

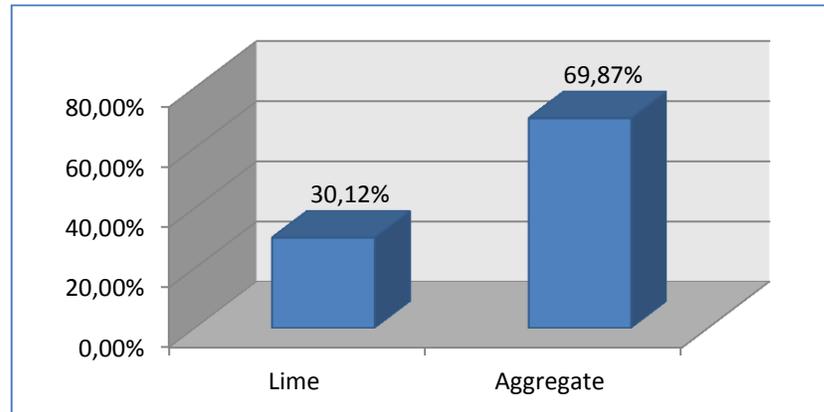


Ilustración 22. Proporción aglomerante/agregado de la muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán

La distribución de tamaño de grano de la muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán se observa en la Ilustración 23. Se observa una distribución descendente en el análisis granulométrico de la arena, a partir del tamaño de grano 2380 μ m (2,38mm). En general, la distribución descendente pertenece a los morteros de pega ya que se usa una arena más gruesa para estos fines, resultado conforme a la práctica. También se deduce que casi el 70% de los granos de arena tienen tamaño de grano superior a 595 μ m. La distribución de tamaño de grano es unimodal respecto al máximo 2380 μ m.

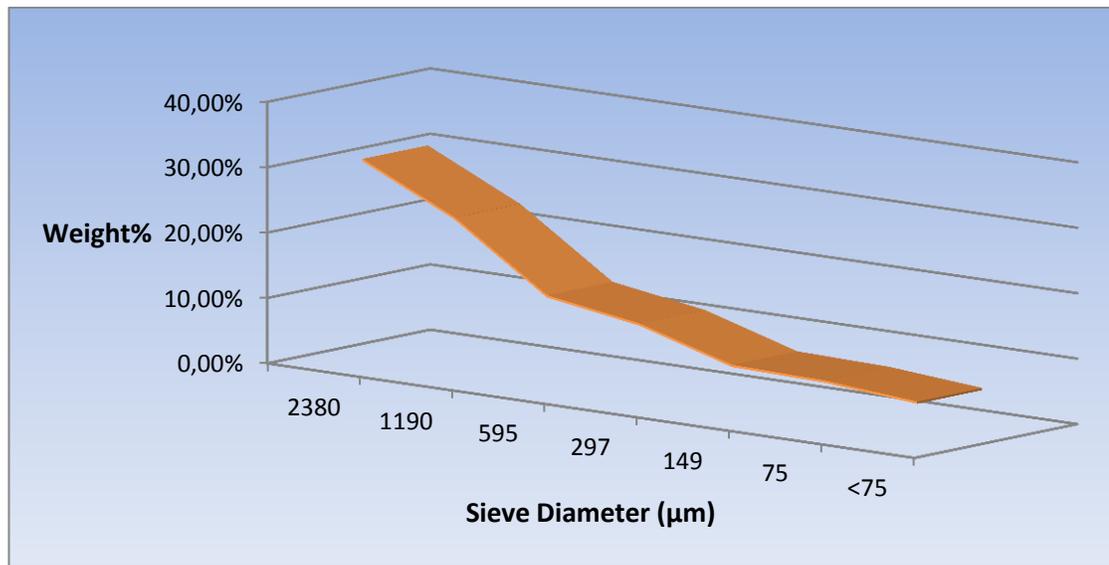


Ilustración 23. Distribución del tamaño de grano del mortero PCMP-03

Tabla 3.3. Distribución del tamaño de grano del mortero PCMP-03

TAMIZ	Abertura (µm)	% Retenido
No. 8	2380	31
No. 16	1190	24
No. 30	595	14
No. 50	297	12
No. 100	149	7
No. 200	75	7
Fondo	<75	6

3.3.1.2. Difracción de rayos X del mortero PCMP-02

La Ilustración 24. muestra el patrón de difracción de rayos X de la muestra PCMP-02.

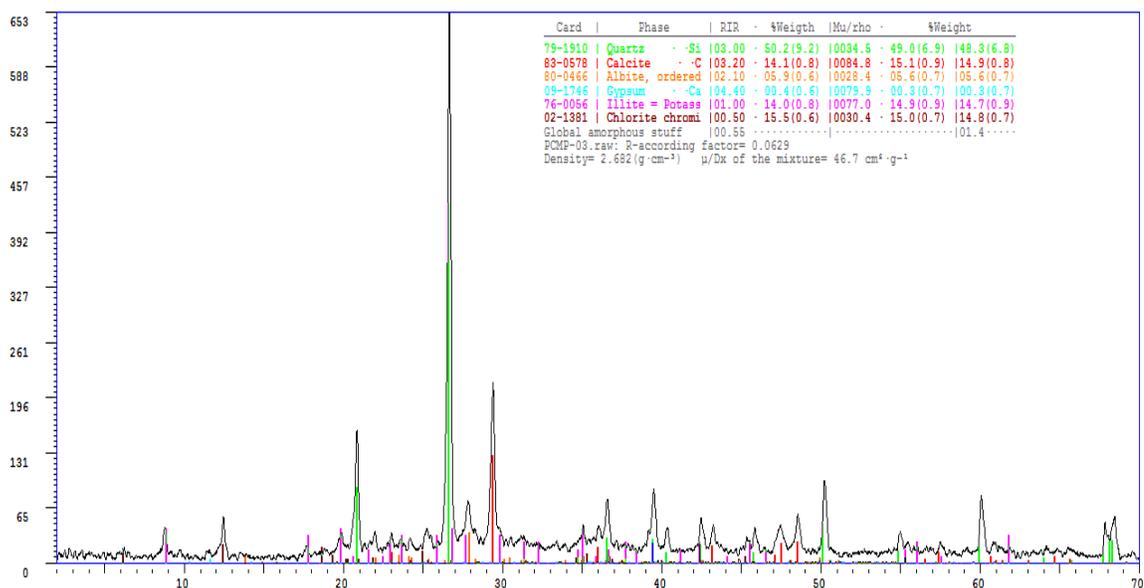


Ilustración 24. Difracción de rayos X de la muestra PCMP-02

La presencia de cuarzo [SiO₂] es evidencia de la utilización de arena cuarcítica en la formulación del mortero original (Ilustración 24); la calcita [CaCO₃] es indicativo de la utilización de la cal. Las intensidades relativas de las señales están relacionadas con la concentración en los morteros, al comparar las intensidades es posible establecer que las muestras son ricas en arena (50,20%) en relación con el contenido de calcita (14,20). La albita, por su parte, es un mineral presente en algunas puzolanas y en algunas arenas ya que es un constituyente muy típico de las rocas ígneas de tipo granito.

Tabla 3.4. Cuantificación XRD de la muestra del mortero de pega del puente Cauca en Popayán.

Compuesto	%Weight
Cuarzo SiO₂	50,20%
Calcita CaCO₃	14,10%
Albita Na(AlSi₃O₈)	5,90%
Yeso CaSO₄·2H₂O	0,40%
Illita KAl₂O₃·4SiO₂·H₂O	14%
Clorita (Mg,Fe²⁺)₅Al(Si₃Al)O₁₀(OH)₈	15,40%

La illita es un filosilicato trilaminar resultante de la alteración térmica de la muscovita (Martinez & Montes, 2007), además, es uno de los minerales más comunes en la arcilla junto con la caolinita y la esmectita. Es común en sedimentos, suelos, rocas arcillosas sedimentarias, y en rocas metamórficas.

Clorita es el nombre genérico de algunos aluminosilicatos, del grupo de los filosilicatos, es una arcilla de tres capas. El yeso podría originarse a partir de una adición voluntaria durante la producción del mortero o de la contaminación de los morteros con la contaminación del aire o del agua (Silva, Wenk, & Monteiro, 2005). Las arcillas presentes pudieron estar contenidas en la piedra caliza o bien ser introducidas involuntariamente en la quema de la caliza en los hornos de ladrillo.

Además, la difracción de rayos X permitió establecer que no hay fases de alta temperatura (Gelenita, Iarnita, wollastonita) que se obtuvieran en el proceso tecnológico de la fabricación de los morteros, por lo que la quema de la piedra caliza para obtener la pasta de cal, se llevó a cabo a temperaturas menores de 800-900°C (Sanjurjo, Trindade, Blanco, Benavides, & Fernández, 2010) debido a la presencia de illita. La illita es un mineral presente hasta 800°C en la calcinación. Como no se alcanza la descomposición final de la illita esto sugiere que la calcinación de la caliza no alcanzó esta temperatura (Habert, Choupay, Escadeillas, & Guillaume, 2009).

3.3.1.3. Espectroscopia infrarroja de la muestra PCMP-05

La Ilustración 25 muestra el espectro FTIR de la muestra PCMP-05. Las bandas 1426, 874 y 712 cm^{-1} corresponden a los tres modos diferentes de elongación de los enlaces C–O. La banda fina en 1797 cm^{-1} también se asocia con el enlace carbonato C–O. Todas estas bandas permiten la identificación de la calcita. Las bandas no muy intensas en 1110 y 535 cm^{-1} pueden indicar la presencia de silicatos y aluminio–silicatos. Entre más intensas estas bandas

indican mayor carácter hidráulico del aglomerante (Gleize, Motta, Silva, & Roman, 2009).

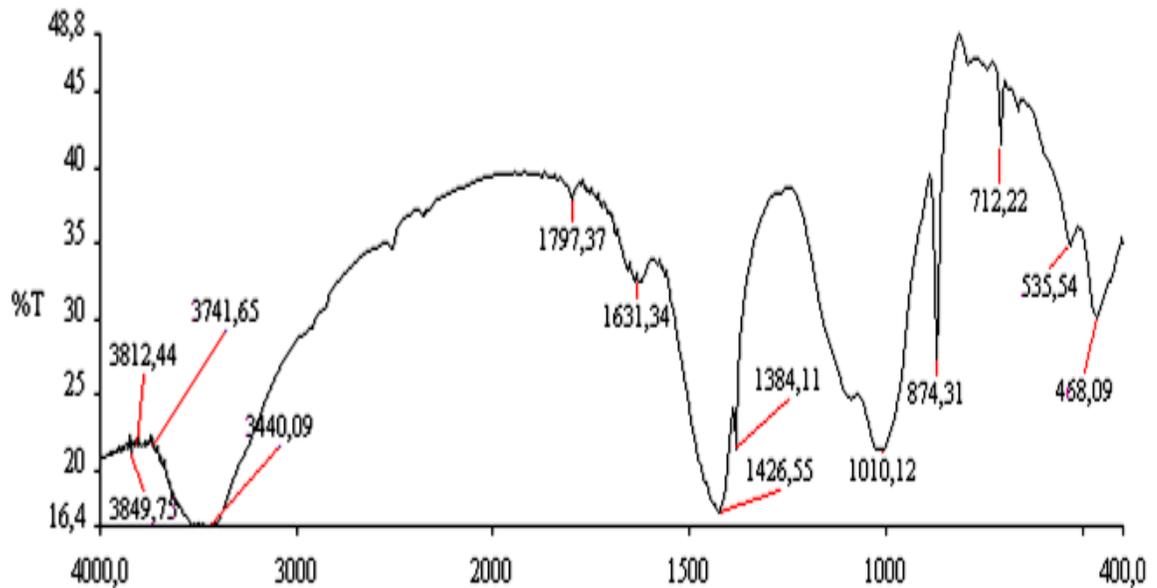


Ilustración 25. Espectroscopia del mortero de pega PCMP

La banda en 3440 y 1631 cm^{-1} es debido a iones hidróxido del agua (Genestar, Pons, & Más, 2006). El agua puede estar sujeta a los compuestos hidráulicos, como los hidratos de silicato y aluminato característicos de las arcillas (Silva, Wenk, & Monteiro, 2005). La banda aguda en 1384 cm^{-1} indica una baja concentración de nitratos de compuesto que se pudo haber formado durante los años de curado del mortero (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005). La banda en 535 puede indicar la presencia de algún óxido. La banda en 1115 y 464 indican la presencia del cuarzo, confirmando el uso de arena como agregado y descartando el agregado calcáreo. Las vibraciones en 1010 cm^{-1} posiblemente de hidratos silicoaluminatos.

3.3.1.4. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra PCMP-05

La curva DSC del mortero PCMP-05 se muestra en la Ilustración 26. Con el fin de evaluar los morteros estos sufren transiciones debido a la liberación del

agua enlazada en el rango de temperatura comprendido entre 110°C hasta los 600°C.

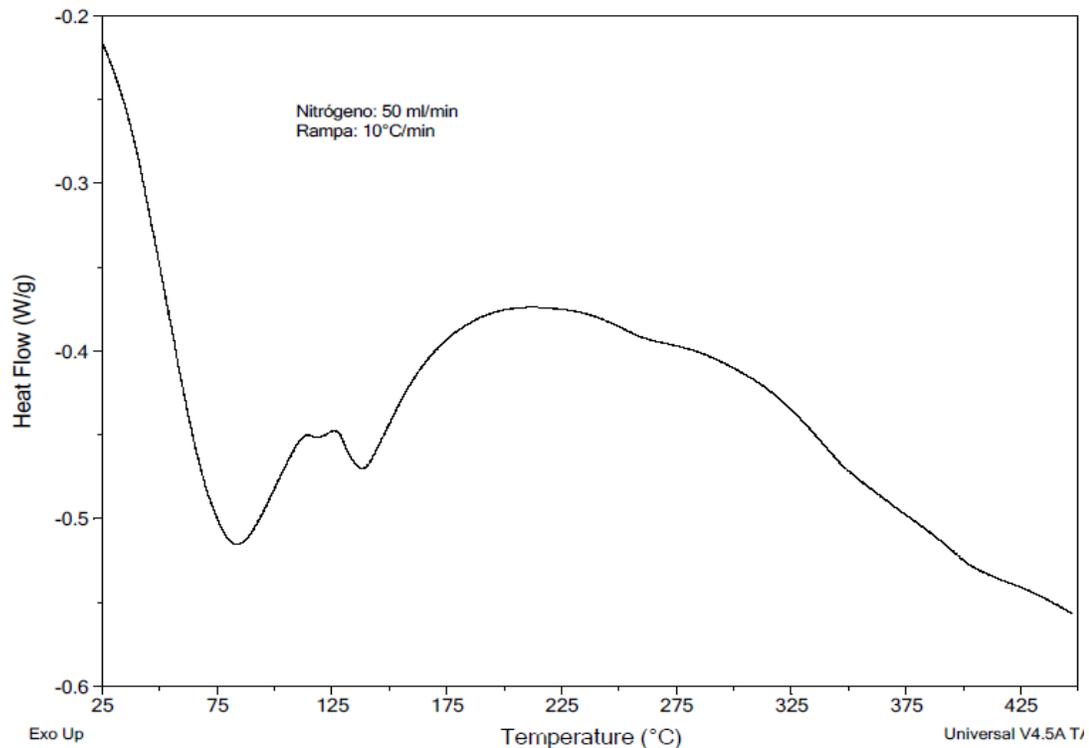


Ilustración 26. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra PCMP-05

Dos reacciones endotérmicas principales fueron identificadas en este rango de temperaturas durante el calentamiento de la muestra. La primera reacción endotérmica indica la liberación de agua evaporable (agua higroscópica) en torno a 85°C el segundo pico endotérmico en 138°C indica la liberación del agua absorbida por algunos componentes hidratados tales como las arcillas identificadas con XRD. La deshidratación también puede ser del aluminato, silicato o silicoaluminato cuyo origen está en algún tipo compuesto arcilloso o productos de reacción puzolánica, pero estos fueron descartados por la difracción.

En general el mortero presenta un cierto carácter hidráulico que se cuantificaría más fácilmente por la técnica de termogravimetría. El carácter hidráulico del mortero procede posiblemente de las canteras en las que la piedra caliza se

encuentra mezclada con arcilla en una determinada proporción. Según esta proporción al cocerse se obtienen distintos tipos de cal hidráulica que le dan esta característica al mortero de cal PCMP-05, característica muy favorable para el entorno húmedo alrededor del puente sobre el río Cauca, en Popayán. También se encuentran transiciones endotérmicas en 260°, 344° y 401°C asociadas también a la pérdida de grupos OH. El pico endotérmico 401°C se puede asociar a la deshidratación de la Illita.

3.3.1.5. Microscopía electrónica de barrido de la muestra PCMP-03

La microscopía electrónica de barrido de la muestra PCMP-03 se muestra en la Ilustración 27. Las observaciones realizadas con el microscopio electrónico SEM muestran un grano de arena (de aproximadamente 1mm de diámetro) de morfología un tanto redondeada cuya capa superficial está cubierta de polvos finos, principalmente de CaCO_3 . Las partículas sólidas grandes indican que el material en su conjunto puede ser mecánicamente resistente.

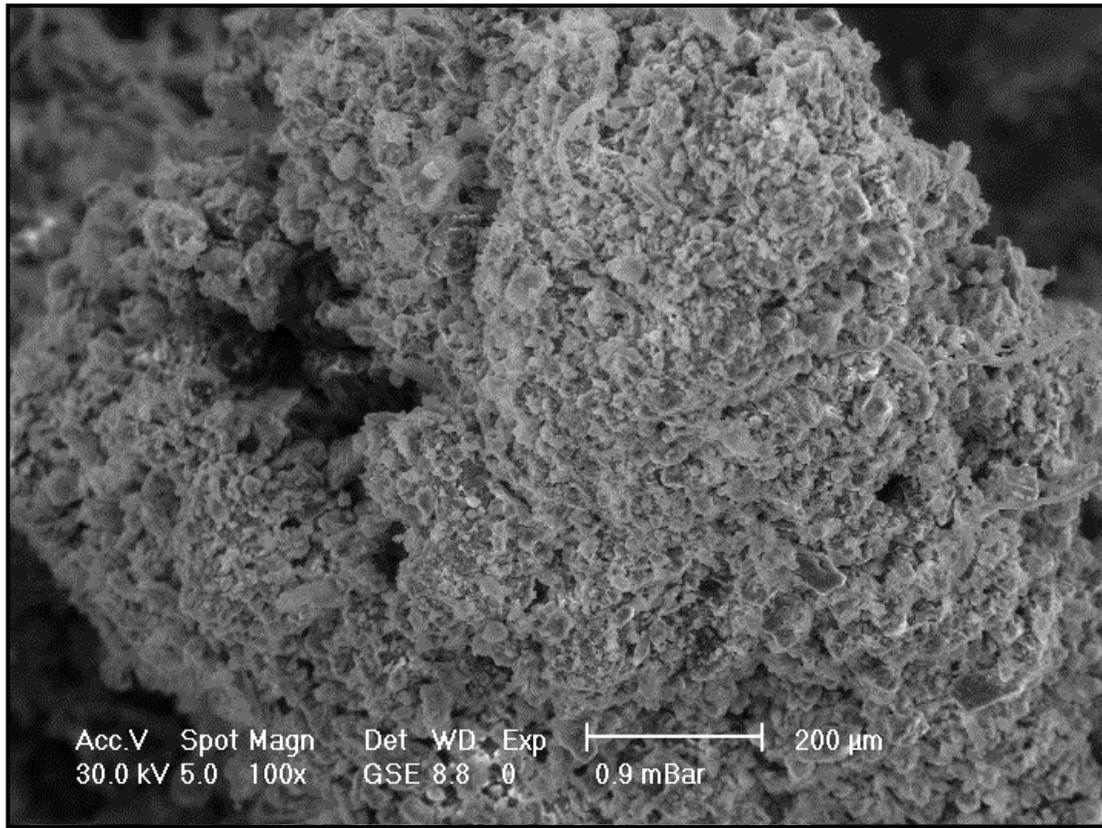


Ilustración 27. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMP-03

La Ilustración 28. muestra una amplificación de los polvos finos. Es posible observar una morfología irregular de los granos de CaCO_3 y observar una distribución del tamaño de grano no homogénea que van desde los 870nm hasta aproximadamente 7μm. En el recuadro de la figura se observa una buena compactación distinguiéndose algunos poros en la figura, los cuales no se pueden apreciar si están interconectados o cerrados. La formación de estos poros probablemente ocurrió durante el fraguado y la carbonatación del material. Por su buena compactación se deduce un buen comportamiento mecánico del material. La porosidad del material es un parámetro que incide en su resistencia y durabilidad.

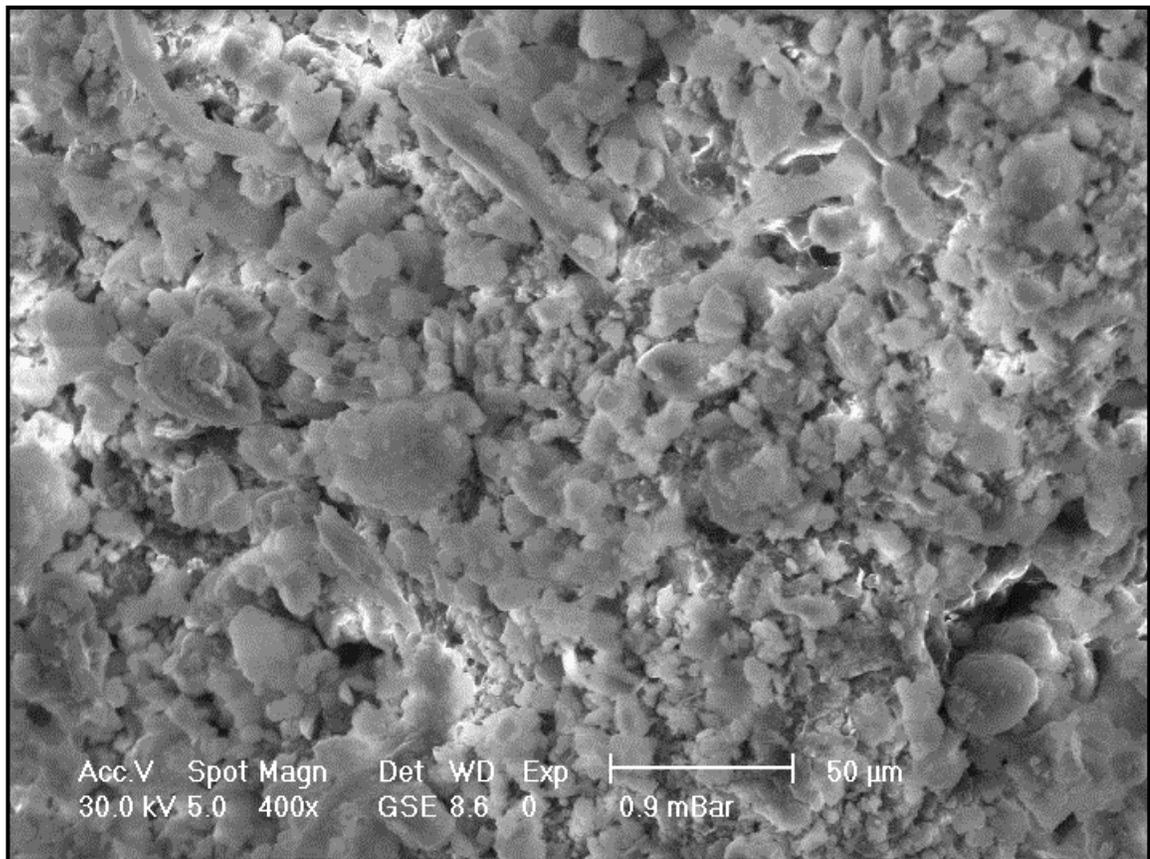


Ilustración 28. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMP-03

No se observan fibras, grumos o geles que indiquen la formación de fases de silicatos cálcicos hidratados (CSH) que cristalicen en la superficie, aluminatos cálcicos hidratados (CAH) que precipiten en los microporos y microfisuras o silico-aluminatos de calcio hidratados (CSAH) los cuales son productos de reacciones puzolánicas; esto sugiere que el material arcilloso dentro del material no alcanzó a ser activado debido a que no se lograron temperaturas superiores de los 800°C que colapsaran la estructura y aumentarían la energía interna de las arcillas volviéndolas reactivas.

3.3.2. Mortero de revoque del puente Cauca en Popayán PCMR-01

La ilustración 29 es la imagen de la muestra PCMR – 01

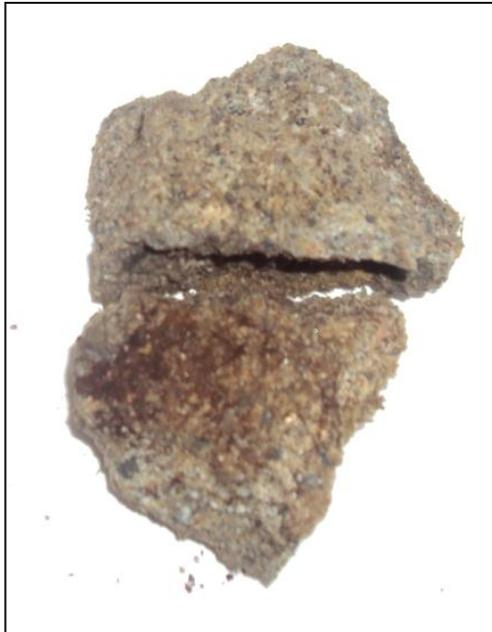


Ilustración 29. Muestra del mortero PCMR-01

3.3.2.1. Proporción y distribución del tamaño de grano del mortero PCMR01

Después de la desegregación del mortero de revoque del puente Cauca en Popayán, el residuo obtenido de arena es pesado y da el contenido real de la misma en la muestra indicando que el mortero está compuesto principalmente de arena en un 64,66% y el 35,33% correspondiente al aglomerante para obtener una proporción de 1:1,83 (Ilustración 30).

Tabla 3.6. Proporción aglomerante/agregado de la muestra PCMR-01

Aglomerante	Arena	Proporción
35,33%	64,66%	1 : 1,83

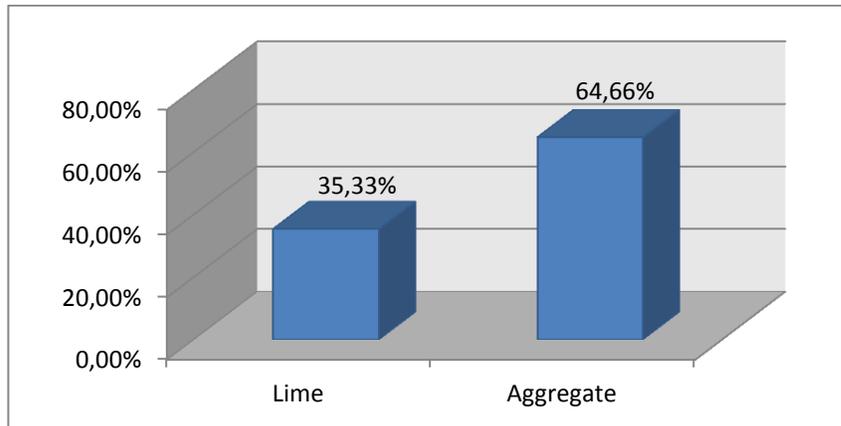


Ilustración 30. Proporción aglomerante/agregado de la muestra PCMR-01

La distribución de tamaño de grano de la muestra del mortero de revoque del puente Cauca en Popayán se observa en la Ilustración 31. En la gráfica del análisis granulométrico de la muestra PCMR-01, se aprecia una distribución relativamente homogénea y bimodal (dos puntos máximos) en torno a $1190\mu\text{m}$ y $149\mu\text{m}$. En general, la distribución homogénea y ascendente pertenece a los morteros de revoque. Por otra parte, en la muestra analizada, el tamaño de las partículas más finas ($<75\mu\text{m}$) representa menos del 6% de la muestra. El 52% de los granos están comprendidos en la distribución de partícula fina, (rango entre $297\mu\text{m}$ y $149\mu\text{m}$). Para trabajos de revoque por lo general se usa un tipo de agregado fino para asegurar un buen acabado (Genestar & Pons, 2003).

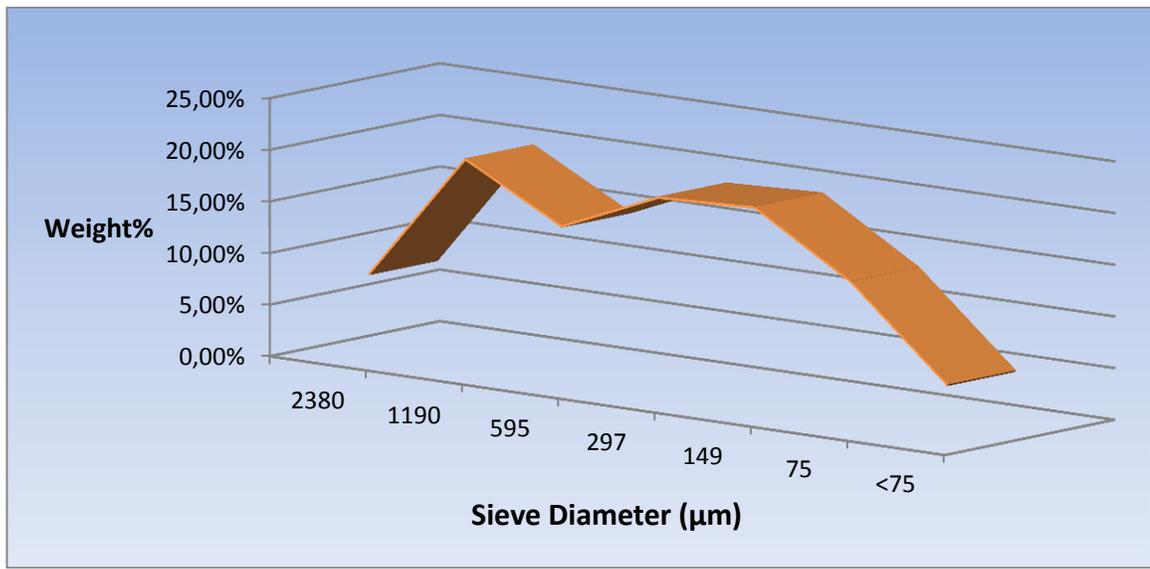


Ilustración 31. Distribución del tamaño de grano de la muestra PCMR-01

Tabla 3.7. Distribución del tamaño de grano de la muestra PCMR-01

TAMIZ	Abertura (µm)	% Retenido
No. 8	2380	8
No. 16	1190	20
No. 30	595	15
No. 50	297	19
No. 100	149	20
No. 200	75	14
Fondo	<75	5

3.3.2.2. Difracción de rayos X del mortero de revoque PCMR-01

El espectro de difracción observado en la Ilustración 32 identifica principalmente la calcita y el cuarzo como componentes mayoritarios. También se puede observar bastante ruido en el espectro lo cual dificulta la identificación y la cuantificación de los demás componentes cristalinos.

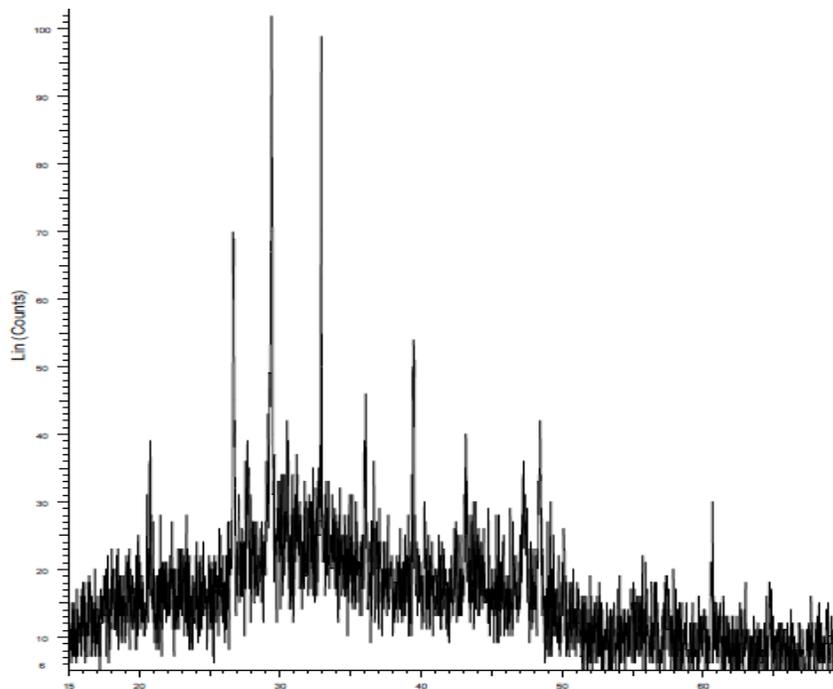


Ilustración 32. Difracción de Rayos X de la muestra PCMR-01

3.3.2.3. Espectroscopía infrarroja de la muestra PCMR-01

La Ilustración 33 muestra el espectro FTIR de la muestra PCMR-01. El análisis de las frecuencias características proporciona información para identificar los componentes químicos del mortero. Las bandas 1432 , 875 y 712cm^{-1} corresponden a los tres modos diferentes de elongación de los enlaces C–O. La banda fina en 1797cm^{-1} también se asocia con el enlace carbonato C–O. Todas estas bandas permiten la identificación del carbonato de calcio (CaCO_3). Las bandas en 1115 y 536cm^{-1} indican la presencia no muy marcada de silicatos y aluminosilicatos debido a que las bandas no son muy intensas en estas longitudes de onda (Gleize, Motta, Silva, & Roman, 2009).

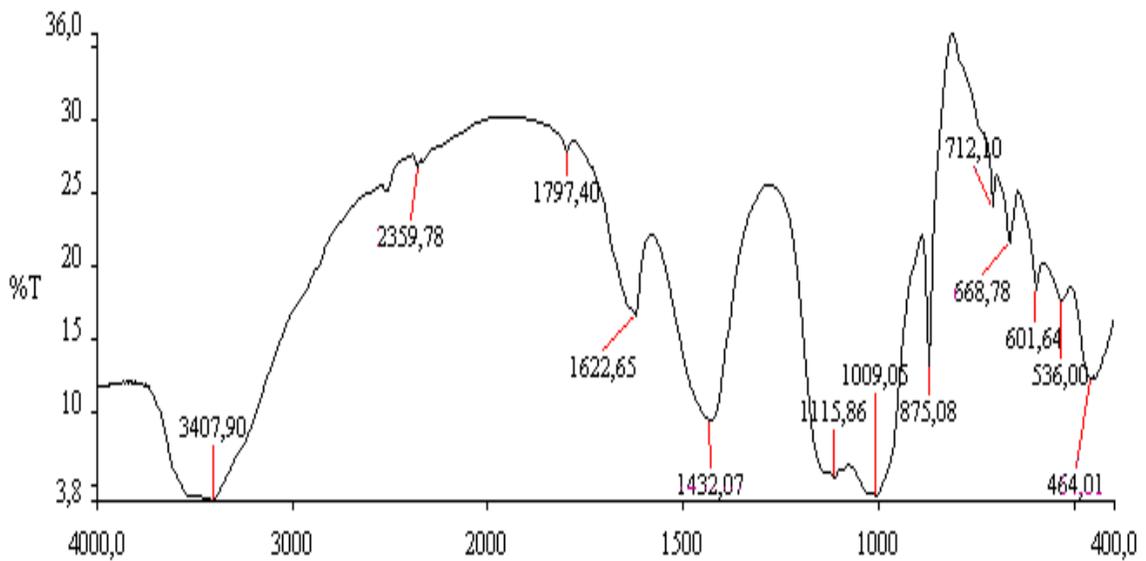


Ilustración 33. Espectroscopia de la muestra PCMR-01

La banda en 3407 y 1631 es debido a iones hidróxido del agua (Genestar, Pons, & Más, 2006). El agua puede estar sujeta a los compuestos arcillosos, como los hidratos de silicato y de aluminato (Silva, Wenk, & Monteiro, 2005). La banda en 536 puede indicar la presencia de algún óxido. Las vibraciones en 1009cm^{-1} posiblemente de hidratos silicoaluminatos.

3.3.2.4. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra PCMR-01

La curva DSC del mortero PCMR-01 se muestra en la Ilustración 34. Tres transiciones térmicas principales fueron identificadas durante el calentamiento de la muestra PCMR-01.

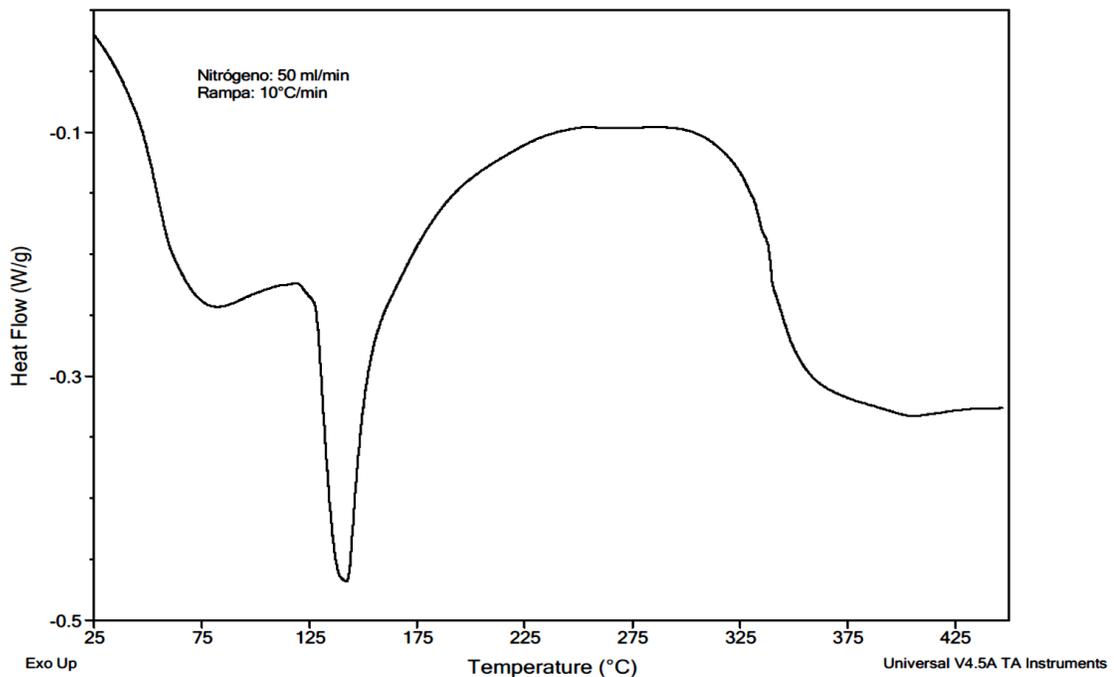


Ilustración 34. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra PCMR-01

La primera transición se observa en torno a los 78°C, la segunda transición se observa alrededor de 135°C y la tercera alrededor de los 390°C. La primera transición puede indicar la liberación del agua libre (agua higroscópica), la segunda transición puede indicar la liberación de OH unidos algunos otros compuestos tales como arcillas (Habert, Choupay, Guillaume, & Montel, 2009) (desorción de agua interlaminar); la tercera transición no muy significativa puede indicar la deshidratación de otros hidratos silicoaluminatos y la reorganización de hojas octaédricas de la caolinita. Bajo las condiciones experimentales utilizadas, la transición debido a la pérdida de peso del agua del yeso [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] también se lleva a cabo dentro del rango 110-180°C (Genestar & Pons, 2003).

El carácter ligeramente hidráulico del material se atribuye a la presencia de impurezas (silicio) en el material carbonatado o de la introducción accidental de materiales arcillosos posiblemente durante la cocción de la calcita, ya que se sabe que los hornos han sido históricamente cubiertos de arcilla antes de la quema (Gleize, Motta, Silva, & Roman, 2009). La mezcla de materiales

arcillosos quemados (por ejemplo, ladrillo triturado) con la cal se usaba en la antigüedad por los fenicios (s. X aC) como una forma de mejorar la capacidad de carga y durabilidad en un ambiente húmedo (Ingo, Fragalà, Bultrini, & De Caro, 2004).

3.3.2.5. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMR-01

La microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMR-01 se muestra en la Ilustración 35.

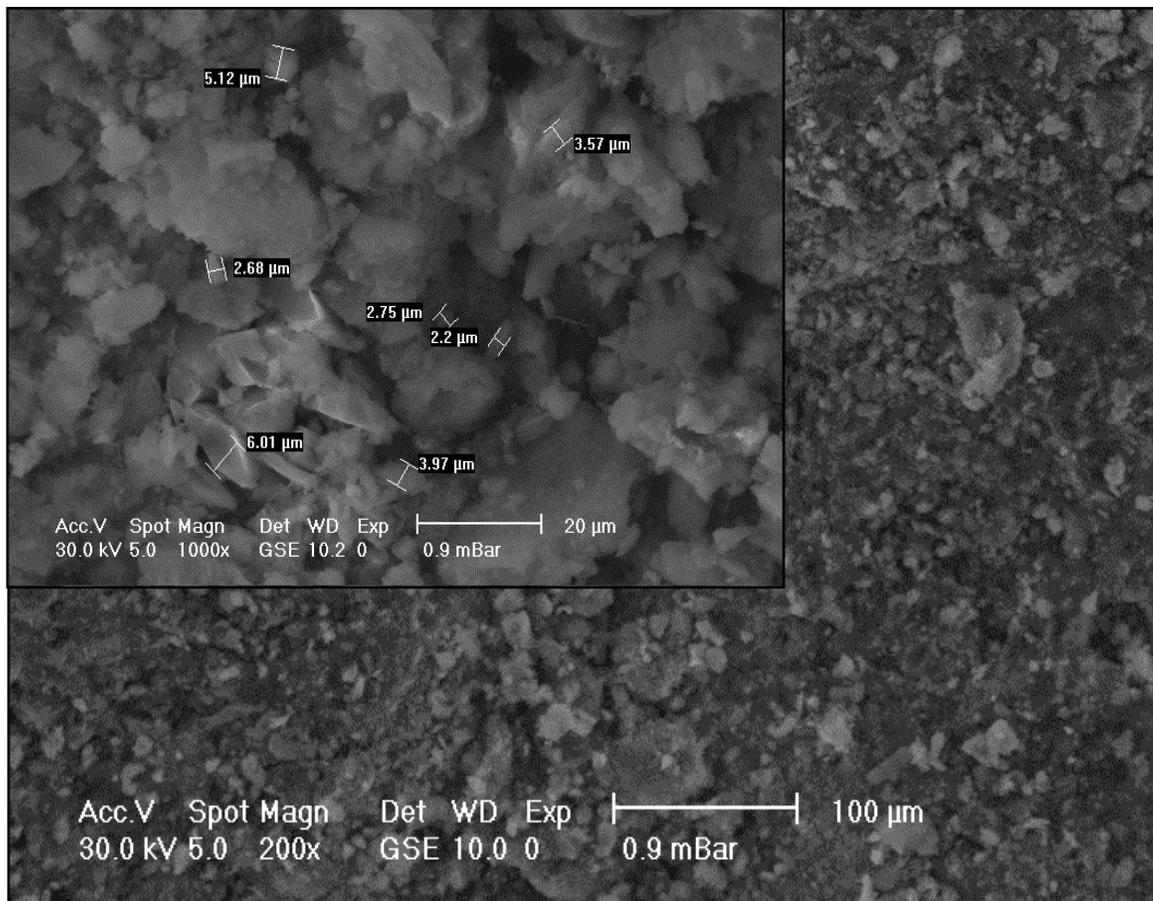


Ilustración 35. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMR-01

En la micrografía electrónica SEM se observa una capa superficial cubierta de polvos finos de CaCO_3 que recubren granos más grandes de cuarzo, proporcionando puentes entre los mismos. En la ampliación se observan

algunos poros posiblemente formados durante el curado y carbonatación del hidróxido de calcio, debido a la pérdida de masa por pérdida de agua higroscópica. Estos poros pueden ser considerados como un tipo especial de defecto superficial.

La Ilustración 36. muestra una ampliación de 400x y 2000x. La ampliación de las micrografías muestra algunos granos de carbonato de calcio, material fino con bordes poco definidos. La distribución del tamaño no es muy homogénea. La micrografía muestra una media compacidad ya que el aglomerante (CaCO_3) llena casi totalmente los espacios entre las partículas más grandes, característica que determina baja permeabilidad del mortero de revoque hacia el interior de la mampostería. Por lo tanto la unión entre las partículas de agregado parece ser bueno.

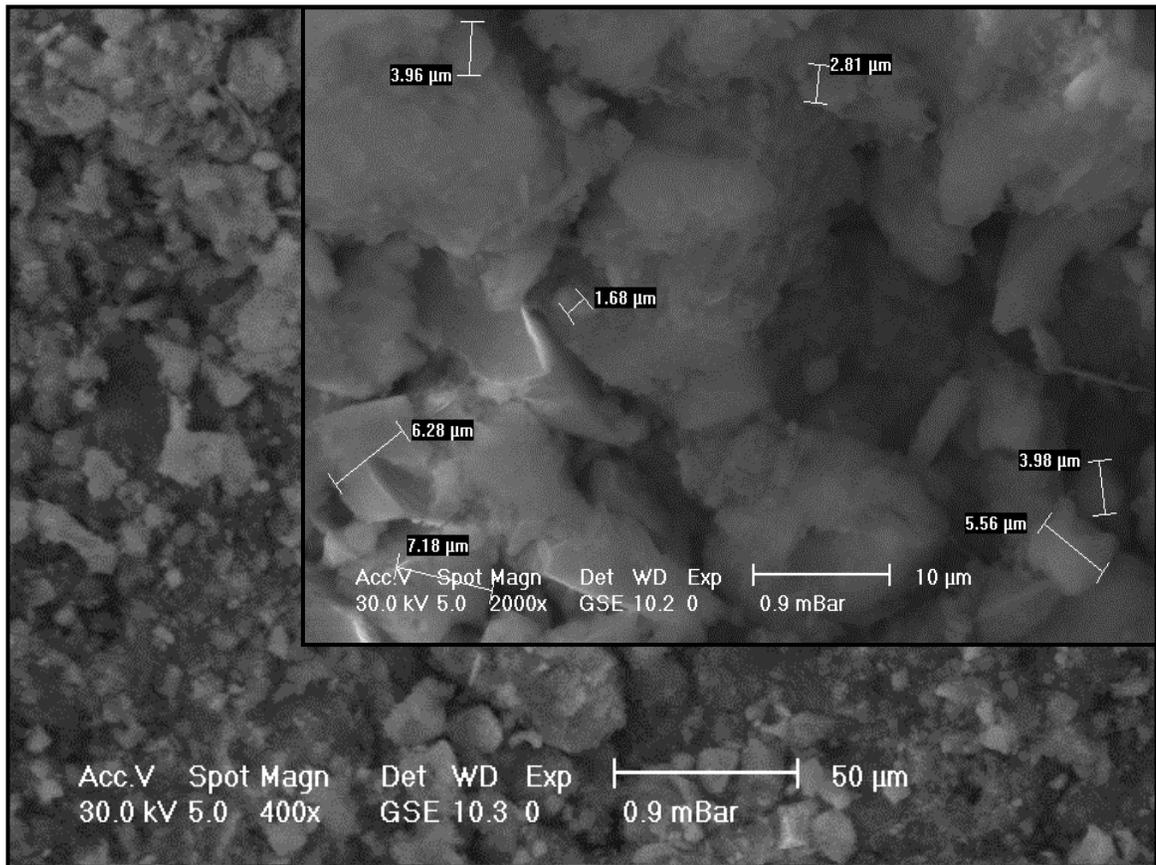


Ilustración 36. Microscopia electrónica de barrido de la muestra PCMR-01

No se observan fibras, grumos o geles que indiquen la formación de fases silicatos cálcicos hidratados o aluminatos cálcicos hidratados que sean producto de reacciones puzolánicas. Esto también sugiere que las arcillas presentes en el mortero no alcanzaron a ser activadas.

3.3.3. Mortero de pega del puente Ortiz en Cali POMP

La densidad de la muestra del mortero de pega del puente Ortiz en Cali es de $2,65\text{g/cm}^3$, tiene una consistencia blanda y es de color oscuro (Ilustración 37). Presenta un alto grado de humedad ya que se trata de un material que ha estado enterrado durante al menos 70 años. Su extracción se produjo por métodos manuales.



Ilustración 37. Muestra del mortero de pega del puente Ortiz en Cali (POMP)

3.3.3.1. Proporción y distribución del tamaño de grano del mortero POMP-03

La proporción aglomerante/agregado se muestra en la Ilustración 38. Después de la desegregación del mortero de pega, la proporción aglomerante/agregado indica que el mortero POMP-03 está compuesto del 38,16% de material aglomerante y del 61,83 % de agregados (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Proporción aglomerante/agregado de la muestra POMP-03

Aglomerante	Arena	Proporción
26,95%	73,04%	1 : 2,71

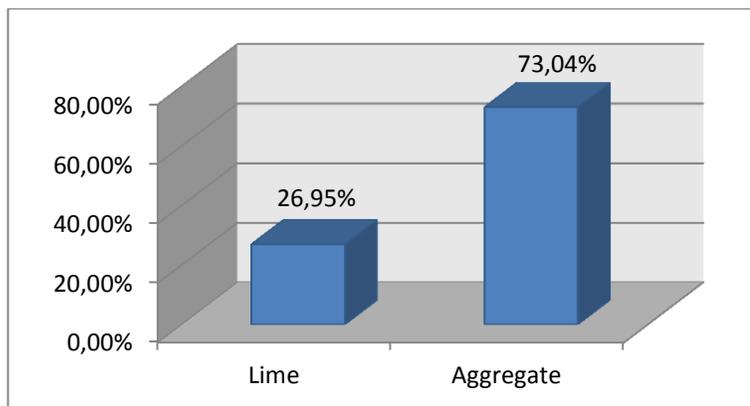


Ilustración 38. Proporción aglomerante/agregado de la muestra POMP-03

La distribución del tamaño de grano del agregado de la muestra del mortero de pega del puente Ortiz en la ciudad de Cali se observa en la Ilustración 39. Se observa una tendencia en el análisis granulométrico de la muestra POMP, distribución unimodal (en torno a 2380 μ m) y descendente a partir del tamaño de grano 2380 μ m. En general, la distribución descendente pertenece a los morteros de pega. El análisis granulométrico indica que se usó arena de tamaño de grano más grueso utilizada típicamente en morteros de pega como así corresponde.

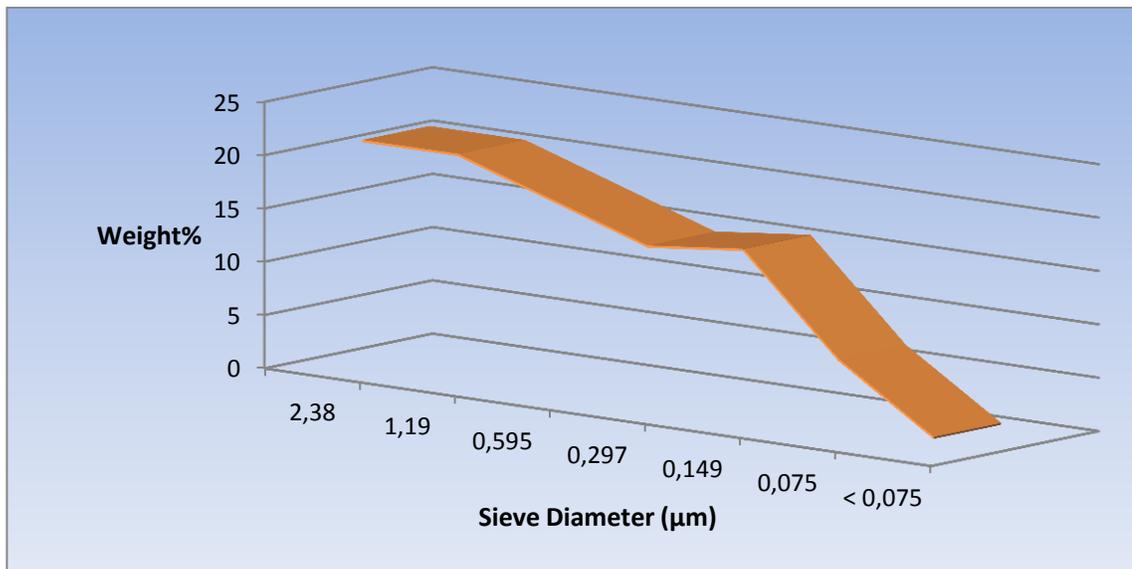


Ilustración 39. Distribución del tamaño de grano de la muestra POMP-03

Tabla 3.10. Distribución del tamaño de grano de la muestra POMP-03

TAMIZ	Abertura (µm)	% Peso Retenido
No. 8	2380	21
No. 16	1190	21
No. 30	595	18
No. 50	297	15
No. 100	149	16
No. 200	75	7
Fondo	<75	1

3.3.3.2. Difracción de rayos X del mortero POMP-02

La Ilustración 40 muestra el patrón de difracción de rayos X de la muestra POMP-02. La presencia de cuarzo [SiO₂] es evidencia de la utilización de arena cuarcítica como agregado en la formulación del mortero original (Tabla 3.11.); la calcita [CaCO₃] es indicativo de la utilización de la cal. Al comparar las intensidades es posible establecer que la muestra es rica en arena con relación al contenido de calcita.

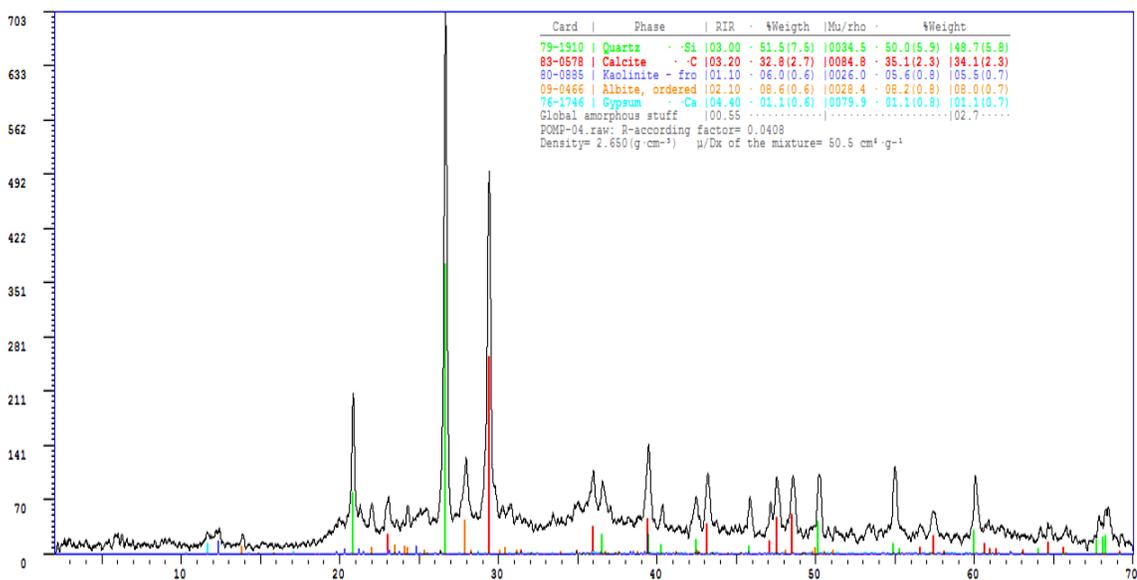


Ilustración 40. Difracción de rayos X de la muestra POMP-02

Tabla 3.11. Cuantificación XRD de la muestra POMP-02

Compuesto	%Weight
Cuarzo SiO₂	51,50%
Calcita CaCO₃	32,80%
Caolinita Al₂Si₂O₅(OH)₄	6,00%
Albita NaAlSi₃O₈	8,60%
Yeso CaSO₄· 2H₂O	1,10%

La Caolinita [Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O] corresponde a un filosilicato formado por una capa de tetraedros de silicio combinada con otra capa de octaedros de alúmina a través de grupos hidroxilo que están compartidos entre las dos láminas. La caolinita indica que la piedra caliza contenía cierta cantidad de arcilla. El empleo de una caliza con arcilla cobra relevancia debido a las características hidráulicas necesarias para el puente.

La difracción de rayos X permitió establecer que no hay fases de alta temperatura que se obtuvieran en el proceso tecnológico de la fabricación de los morteros, por lo que la quema de la piedra caliza para obtener la pasta

de cal, se llevó a cabo a temperaturas inferiores de 500°C debido a la presencia de caolinita.

3.3.3.3. Espectroscopia infrarroja de la muestra POMP-03

La Ilustración 41 muestra el espectro FTIR de la muestra POMP-03. Las bandas 2514, 1429, 874 y 712 cm^{-1} corresponden a los tres modos diferentes de elongación de los enlaces C–O. La banda fina en 1796 cm^{-1} también se asocia con el enlace carbonato C–O. Todas estas bandas permiten la identificación del Carbonato de Calcio (CaCO_3).

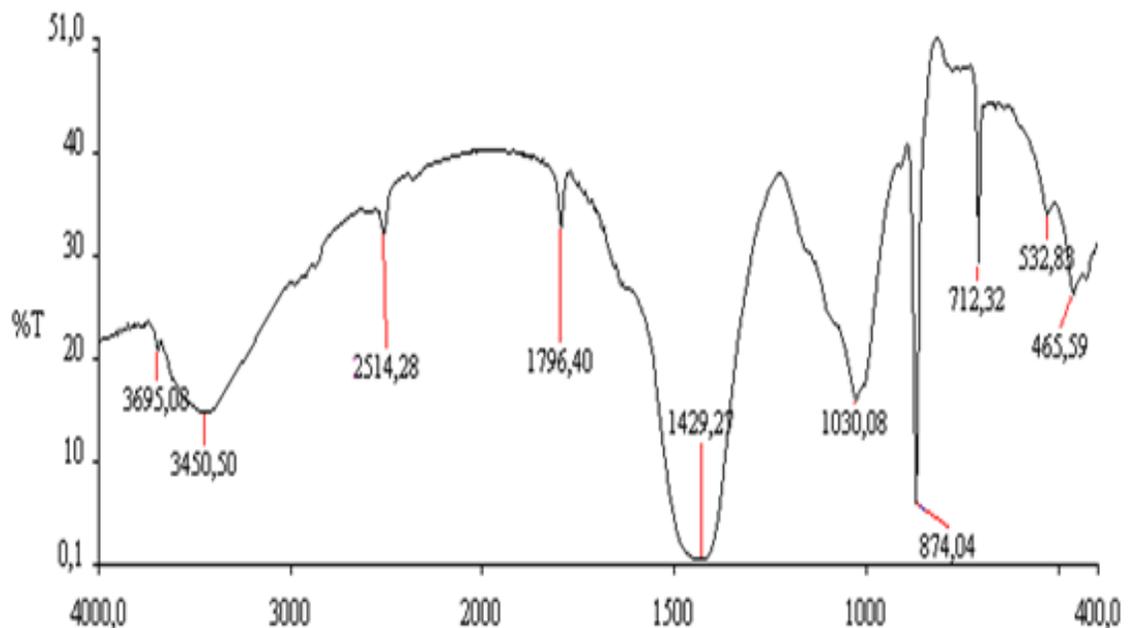


Ilustración 41. Espectroscopia de la muestra POMP-03

Las bandas en 3450 y 1628 cm^{-1} es debido a iones hidróxido del agua (Genestar, Pons, & Más, 2006). El agua puede estar sujeta a los compuestos hidráulicos, como los hidratos de silicato y aluminato (Silva, Wenk, & Monteiro, 2005). La banda en 532 cm^{-1} puede indicar la presencia de óxidos. La banda en 1030 y 465 cm^{-1} indican la presencia del cuarzo (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005).

3.3.3.4. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra POMP-03

La curva DSC del mortero POMP-03 se muestra en la Ilustración 42. El análisis indica un mortero de cal más puro, que por lo general la mayor parte del aglomerante se compone de calcita [CaCO_3] sin la presencia de los componentes hidráulicos ya que estos son higroscópicos y no se observa ningún pico endotérmico significativo en el rango 100–450°C. Este análisis permite distinguir morteros hidráulicos de los morteros de cal ya que estos últimos contienen más baja cantidad de agua absorbida (Bakolas, Biscontin, Moropoulou, & Zendri, 1998).

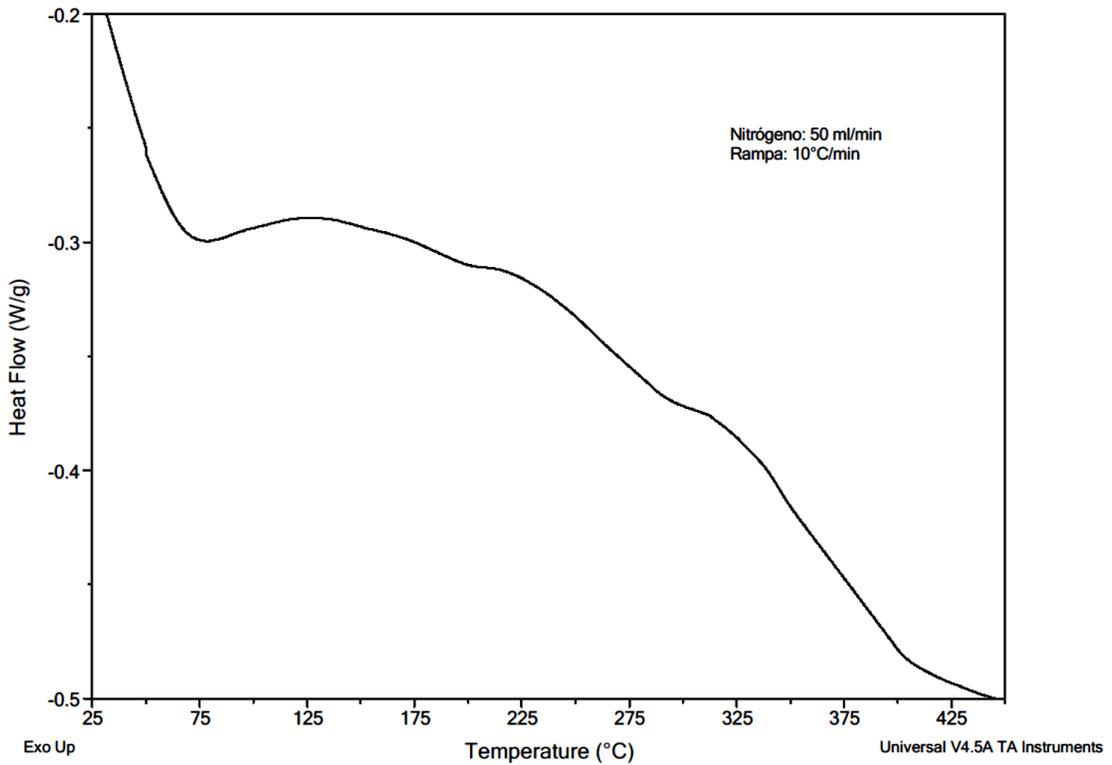


Ilustración 42. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra POMP-03

El análisis térmico indica la presencia de una cantidad muy limitada de minerales de arcilla. Pequeños efectos endotérmicos en 200°, 292° y 408° se pueden atribuir a mínimas cantidades de silicato y aluminato en la muestra. La

transición térmica en 78°C indica la presencia de agua higroscópica. El pico endotérmico en 408°C indica la deshidratación de la caolinita.

3.3.3.5. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMP-03

La microscopia electrónica de barrido de la muestra POMP-03 se muestra en la Ilustración 43. Las observaciones realizadas con el microscopio electrónico SEM muestran un grano de arena cuya capa superficial está cubierta de polvos finos, principalmente de CaCO_3 . Por debajo de estos polvos finos hay un grano sólido de gran tamaño que tiene baja porosidad y no muestra grietas ni fracturas. Los límites observados entre las partículas de mayor tamaño parecen tener una buena adherencia. La composición química de las partículas grandes mostró un mayor contenido de silicio y aluminio de acuerdo con la espectrometría de energía dispersiva (Ilustración 44). Las partículas sólidas grandes indican que el material puede ser mecánicamente resistente. Las partículas grandes parecen estar conectadas a través de los polvos finos.

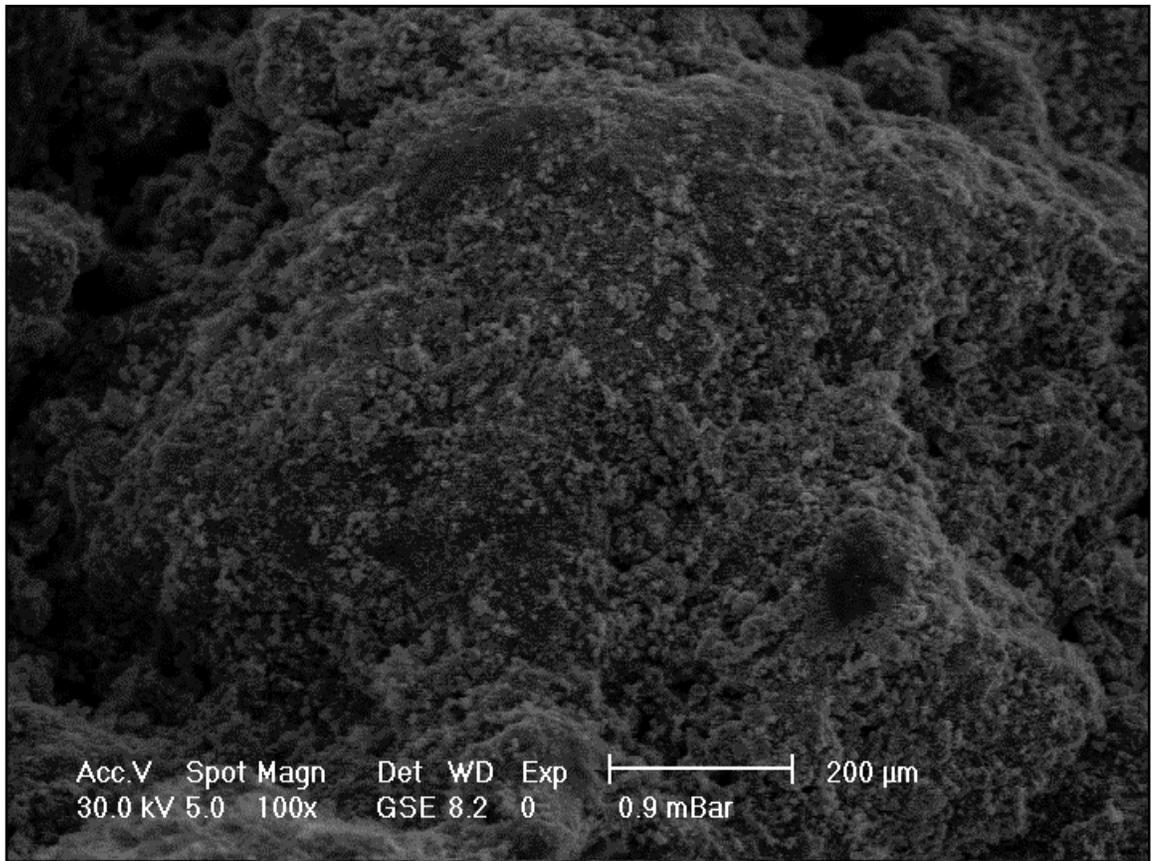


Ilustración 43. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMP-03

La amplificación de los polvos finos hace que sea posible observar una morfología irregular de los cristales de CaCO_3 derivada de la carbonatación de la cal apagada y observar una distribución del tamaño de grano no homogénea que van desde los 870nm hasta aproximadamente 5 μm . El tamaño y la textura de los granos de calcita se forman de acuerdo a las condiciones ambientales de carbonatación. Tampoco se observan fibras que mejoren el comportamiento mecánico del material.

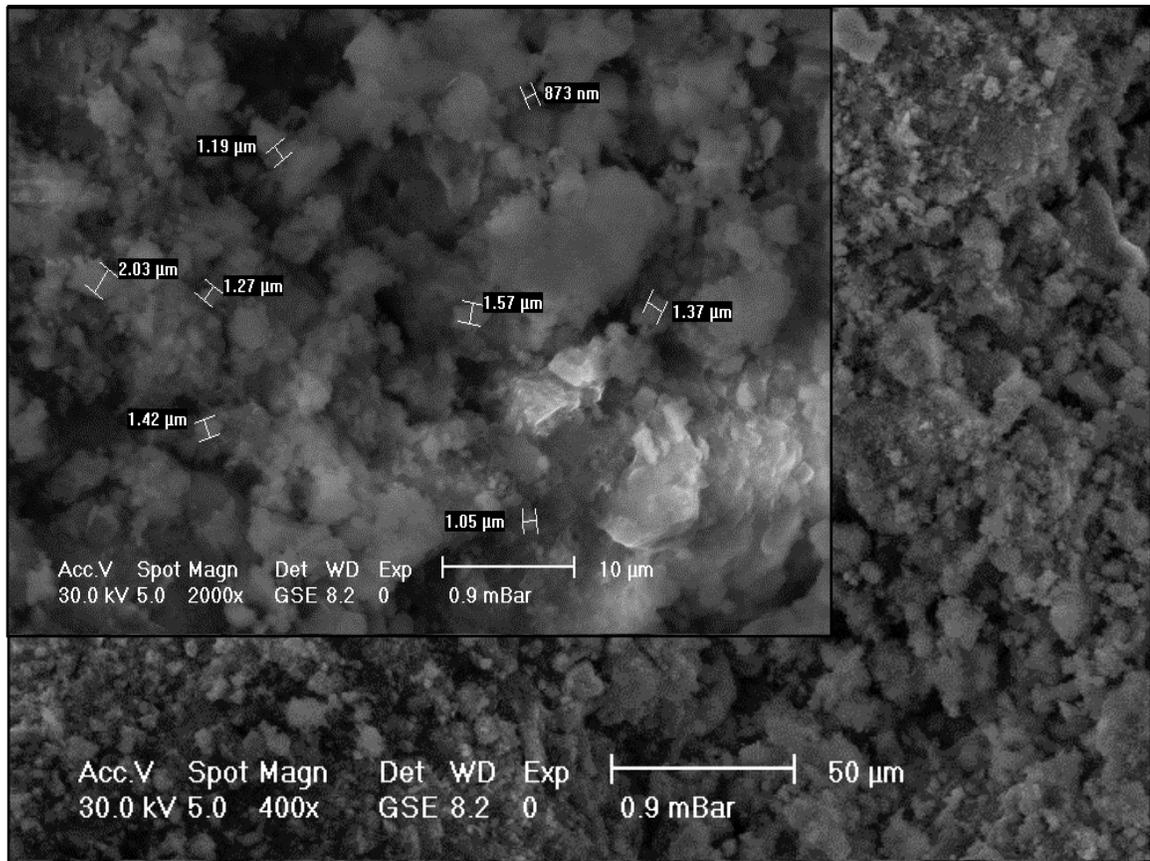


Ilustración 44. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMP-03

3.3.4. Mortero de revoque del puente Ortiz en Cali POMR

La densidad de la muestra del mortero de revoque del puente Ortiz en Cali es de $2,658\text{g/cm}^3$. (Ilustración 45)



Ilustración 45. Muestra del mortero de revoque del puente Ortiz en Cali

3.3.4.1. Proporción y distribución del tamaño de grano del mortero POMR-02

La proporción aglomerante/agregado se muestra en la Ilustración 46. Después de la desegregación del mortero de revoque, la proporción aglomerante/agregado indica que el mortero POMR-02 está compuesto del 34,6% de material aglomerante y del 65,39% de agregados (Tabla 3.13.).

Tabla 3.13. Proporción aglomerante/agregado de la muestra POMR-02

Aglomerante	Arena	Proporción
34,6%	65,39%	1 : 1,89

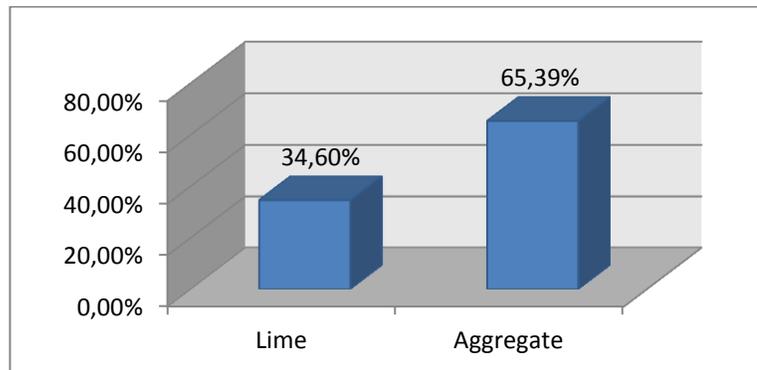


Ilustración 46. Proporción aglomerante/agregado de la muestra POMR-02

La distribución de tamaño de grano de la muestra del mortero de revoque del puente Ortiz en Cali (POMR-02) se observa en la Ilustración 47. Se encuentra

una distribución bimodal (en torno a 1190 μm y 149 μm) y relativamente homogénea. En general, la distribución homogénea y ascendente pertenece a los morteros de revoque. Por otra parte, en la muestra analizada, el tamaño de las partículas más finas (<75 μm) representa menos del 6% de la muestra. El 50,12% de los granos están comprendidos en el rango bajo entre 595 μm y 75 μm . Se usó arena más fina para la elaboración del mortero de revoque a comparación del mortero de pega.

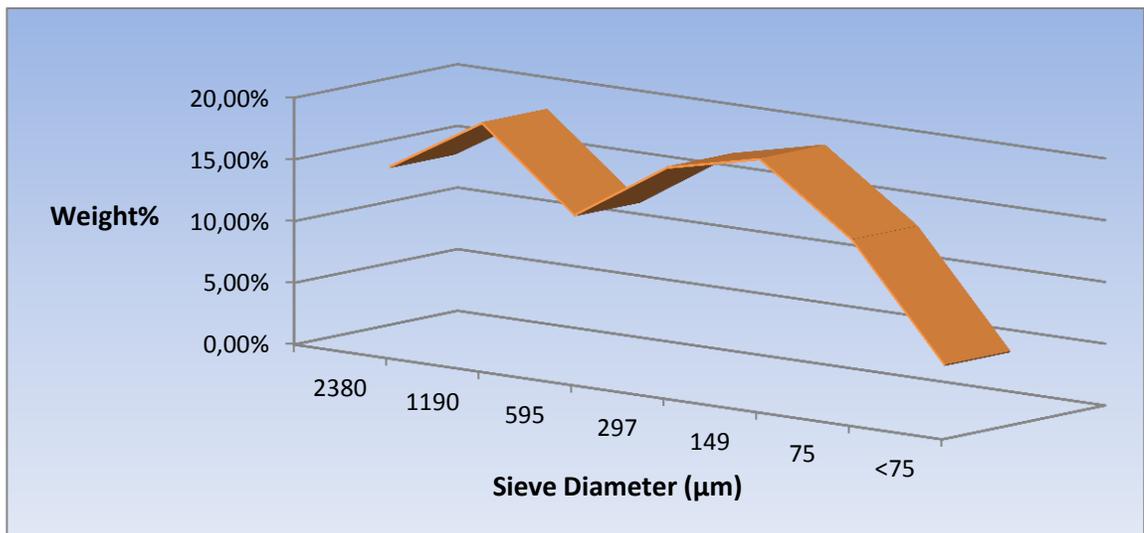


Ilustración 47. Distribución del tamaño de grano de la muestra POMR-02

Tabla 3.14. Distribución del tamaño de grano de la muestra POMR-02

TAMIZ	Abertura (μm)	% Retenido
No. 8	2380	14
No. 16	1190	19
No. 30	595	12
No. 50	297	17
No. 100	149	19
No. 200	75	14
Fondo	<75	5

piedra caliza contenía cierta cantidad de arcilla. La caolinita no alcanzó en el proceso de cocido de la caliza la activación térmica a metacaolín. La caolinita se descompone en metacaolinita amorfo a 500°C (Figura 3.43.) por la eliminación de los grupos OH de la red de silicato, de acuerdo con la reacción $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$ (Trindade, Dias, Coroado, & Rocha, 2009), por tal razón no se observan fases de alta temperatura o reacciones puzolánicas, por lo tanto la quema de la piedra caliza se llevó a cabo a temperaturas menores de 500°C, no activándose este material arcilloso. La albita como mencionamos anteriormente es un mineral presente en algunas puzolanas y en algunas arenas ya que es un constituyente de las rocas ígneas.

3.3.4.3. Espectroscopia infrarroja de la muestra POMR-02

La Ilustración 49 muestra el espectro FTIR de la muestra POMR-02. Las bandas en 1431, 874 y 712 cm^{-1} corresponden a los tres modos de alargamiento diferentes de los enlaces C-O. La banda fina e intensa en 1796 cm^{-1} se asocia también al enlace carbonato C-O. Las bandas en 3453 y 1622 cm^{-1} es debido a iones hidróxido del agua (Genestar, Pons, & Más, 2006). El agua puede estar sujeta a los compuestos hidráulicos, como los hidratos de silicato y aluminato (Silva, Wenk, & Monteiro, 2005).

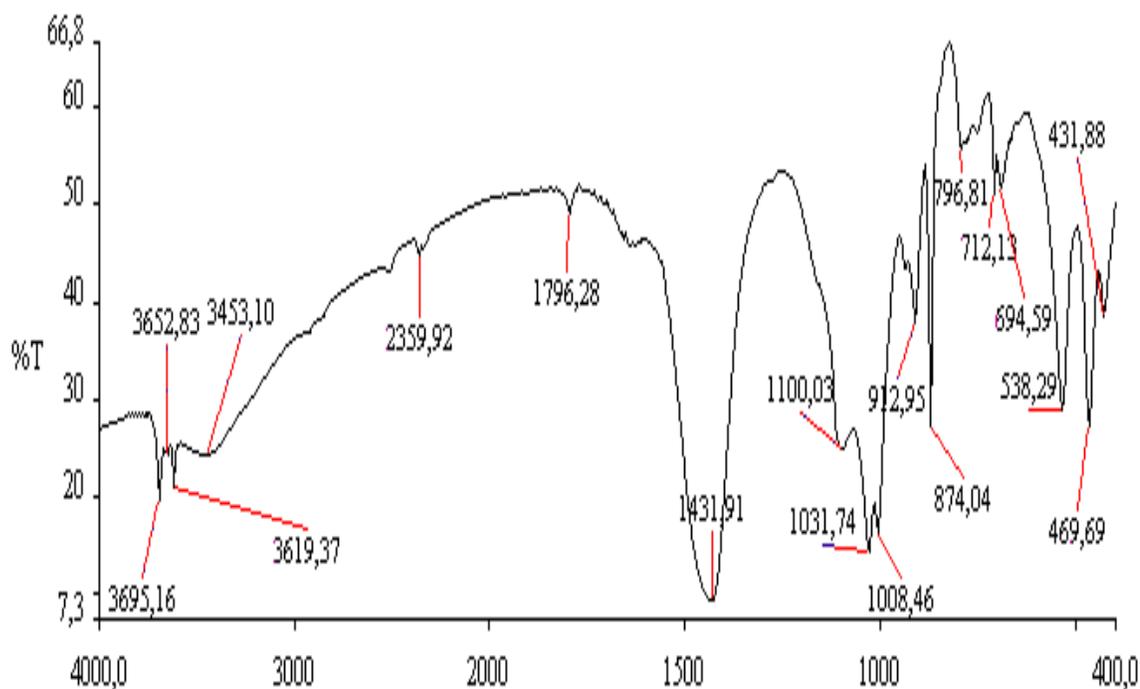


Ilustración 49. Espectroscopia de la muestra POMR-02

La banda en 538cm^{-1} puede indicar la presencia de algún óxido (Genestar, Pons, & Más, 2006). La banda en 1100 , 1031 , 796 y 469cm^{-1} indican la presencia del cuarzo (Maravelaki, Bakolas, Karatasios, & Kilikoglou, 2005). Las vibraciones en 1008cm^{-1} posiblemente indican la presencia de hidratos silicoaluminatos.

3.3.4.4. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra POMR-02

La curva DSC del mortero POMR-02 se muestra en la Ilustración 50. El espectro muestra un mortero de cal típico que posee muy baja cantidad de componentes hidráulicos. También se observan 3 reacciones endotérmicas poco significativas en 202° , 302° y 405°C que pueden indicar la deshidratación de algún compuesto hidráulico con contenido de aluminio y/o silicio. El pico endotérmico en 77°C indica la presencia de agua higroscópica. Una débil reacción endotérmica en la curva indica la reorganización de las hojas octaédricas de la caolinita a 302°C como se observa por Kakali (2001).

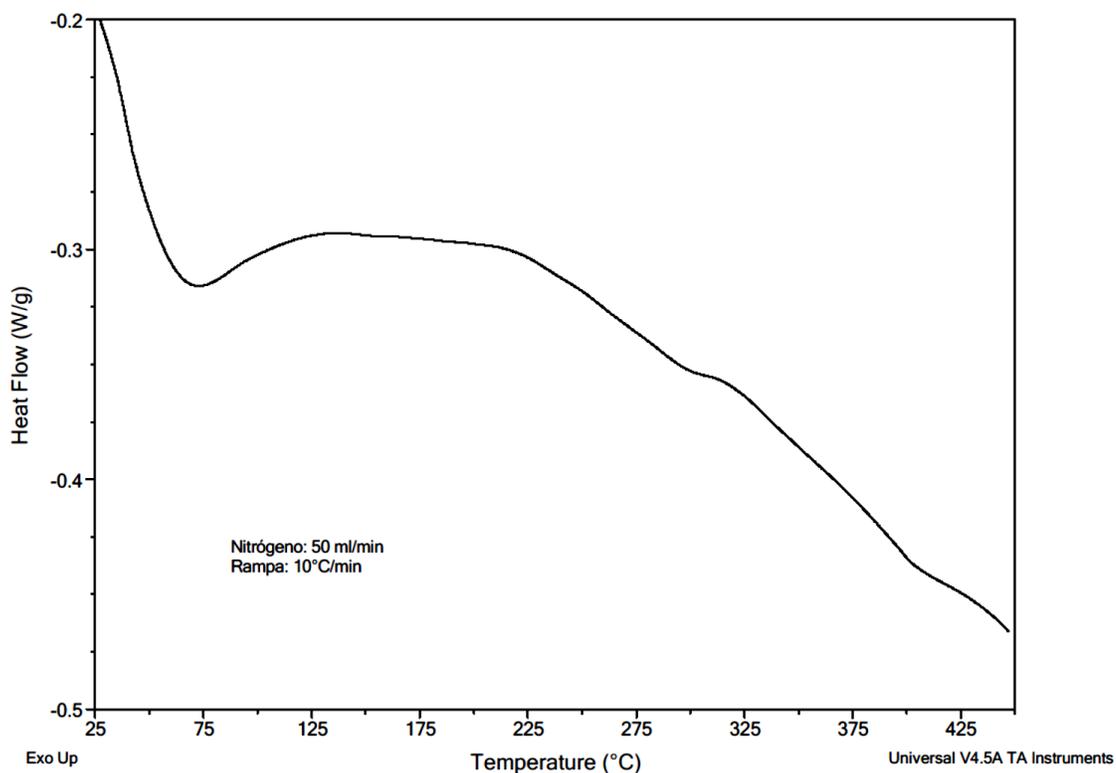


Ilustración 50. Calorimetría diferencial de barrido de la muestra POMR-02

3.3.4.5. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMR-02

La microscopia electrónica de barrido de la muestra POMR-02 se muestra en la Ilustración 51. Las observaciones realizadas con el microscopio electrónico SEM muestran un grano de arena (aproximadamente 1mm de diámetro) cuya capa superficial está cubierta de polvos finos, principalmente de $[\text{CaCO}_3]$. Por debajo de estos polvos finos hay un grano sólido de gran tamaño que tiene baja porosidad y no muestra grietas ni fracturas. Las partículas sólidas grandes indican que el material puede ser mecánicamente resistente.

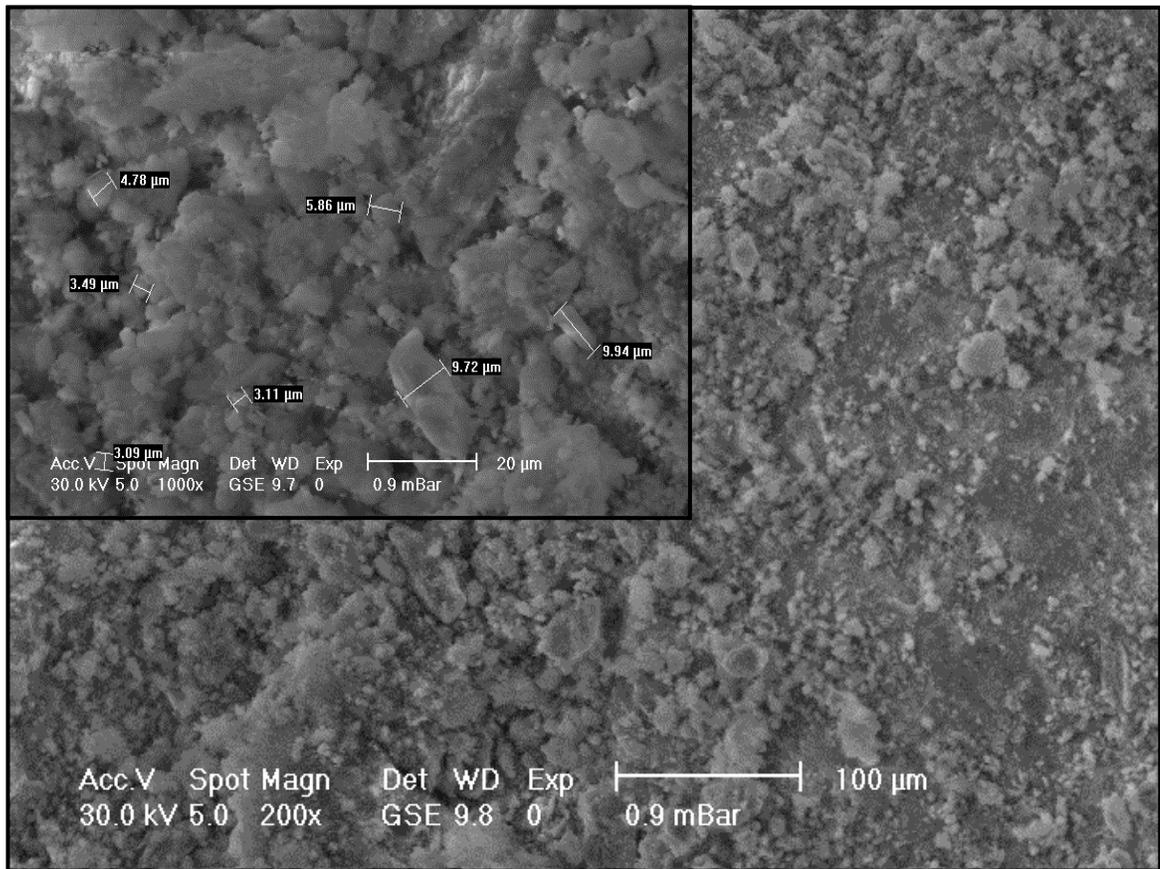


Ilustración 51. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMR-02

El material presenta pocos poros por lo cual las partículas de carbonato de calcio ayudan a mejorar la impermeabilidad del material hacia el interior de la mampostería, preservando de los agentes atmosféricos dañinos con el CO_2 y el H_2O (Ilustración 52).

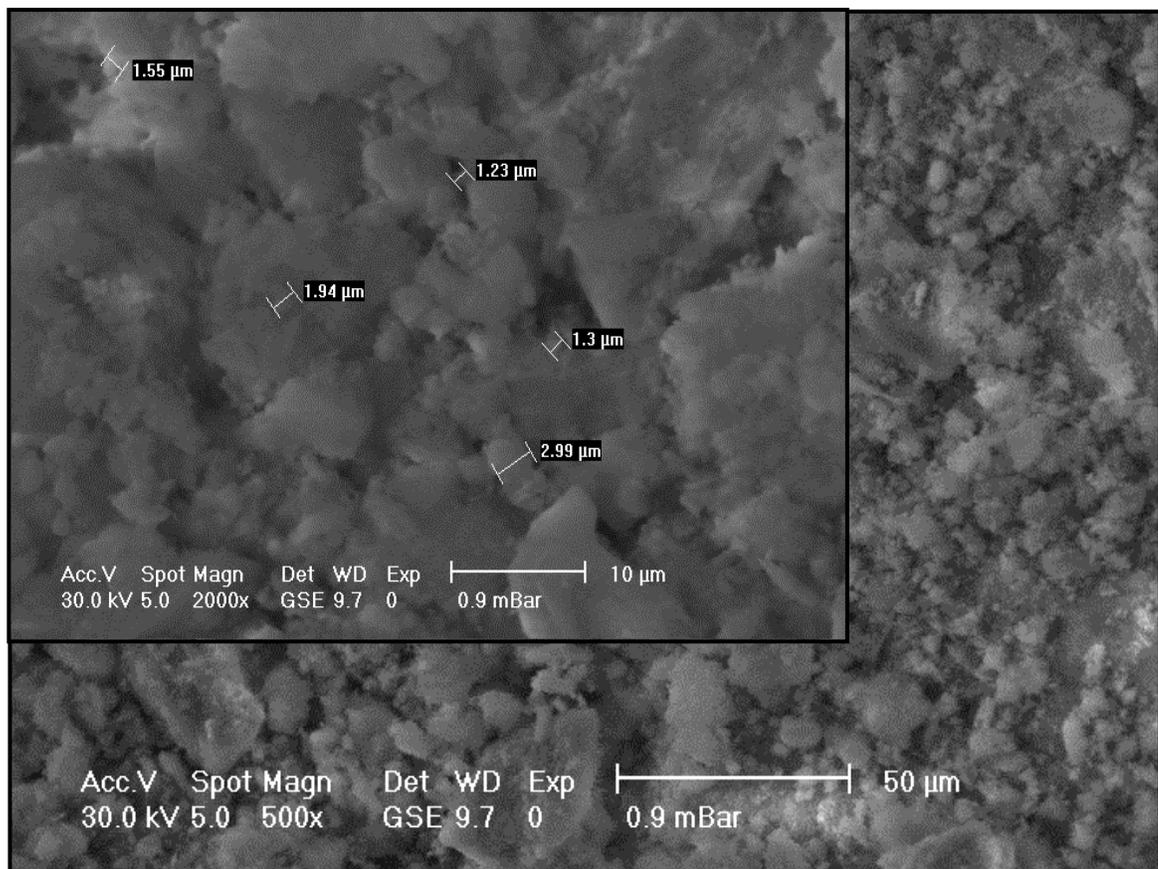


Ilustración 52. Microscopia electrónica de barrido de la muestra POMR-02

3.4. Análisis comparativo de los morteros antiguos

3.4.1. Proporción aglomerante/agregado

Los resultados confirmaron la existencia de mayor proporción de arena que de cal en todos los morteros antiguos (Tabla 3.18.), aunque los morteros de cal empleados hoy en día contienen aun mayor proporción de arena, debido a que las cales actuales son más hidráulicas y resistentes que las antiguas.

La proporción de arena en los morteros analizados es mayor en los morteros de pega que en los morteros de revoque, debido a que el mortero de revoque necesita un material más fino (cal) por lo tanto menor cantidad de arena en su dosificación, con el propósito de llenar los poros presentes en la mampostería y cubrirla de los agentes agresivos del medio ambiente.

Tabla 3.18. Proporción en peso de aglomerante / agregado de los morteros antiguos

Morteros Antiguos			
Muestra	Proporción en Peso		Función
	Pasta de Cal	Arena	
PCMP	1	2,32	Mortero de Pega
PCMR	1	1,83	Mortero de Revoque
POMP	1	2,71	Mortero de Pega
POMR	1	1,89	Mortero de Revoque

3.4.2. Distribución de tamaño de grano

En la distribución del tamaño de grano, se encuentran diferencias entre los agregados de los morteros de pega y los agregados de los morteros de revoque (Ilustración 53). La **distribución descendente** corresponde a los agregados del mortero de pega (agregado más grueso), debido a que las arenas gruesas aumentan la resistencia a la compresión, aunque disminuyan la trabajabilidad del mortero; mientras que los agregados del mortero de revoque mostraron una **distribución simétrica** (agregado fino) debido a la necesidad de una buena terminación, ya que granos gruesos rayan la terminación, aunque reducen su resistencia.

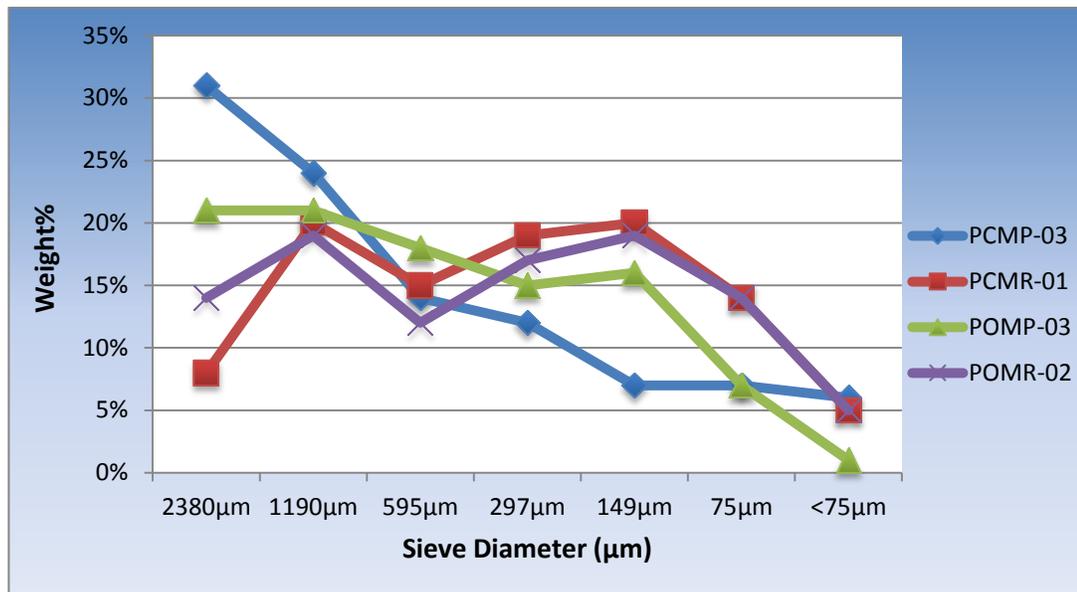


Ilustración 53. Curva granulométrica del agregado de los morteros antiguos

En todos los agregados de los diferentes morteros estudiados se encuentra una **granulometría continua**, es decir, están presentes todos los diferentes tamaños de granos que definen una arena, probablemente con el fin de alcanzar una buena compactación (Ilustración 54), es decir, que los huecos que dejen los granos mayores, se rellenen con los granos inferiores y de esta manera mejorar las propiedades mecánicas del mortero como su resistencia mecánica y en general la calidad del mortero.

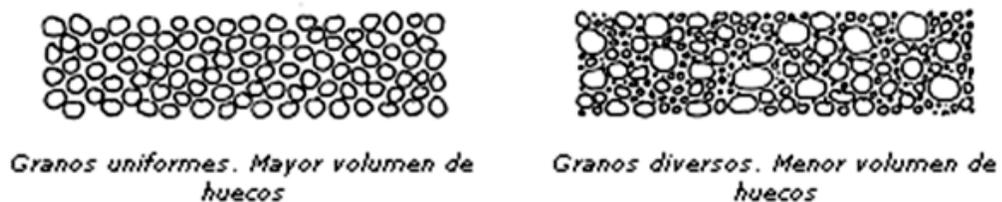


Ilustración 54. Compactación de las arenas

Los morteros de revoque POMR y PCMR también presentaron una distribución bimodal (dos puntos máximos), ambos en torno a 1190µm y 149µm, es decir, poseen dos tamaños que caracterizan la arena, mientras que los morteros de pega presentaron una distribución unimodal respecto al máximo en 2380µm

confirmando la utilización de granos gruesos que mejoran la resistencia mecánica pero requieren mucha pasta de aglomerante para llenar sus huecos.

Tabla 3.20. Análisis granulométrico (NTC 77: 2007 segunda actualización).

ABERTURA (μm)	TAMIZ	PCMP-03	PCMR-01	POMP-03	POMR-02
		% RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO
2380 μm (2,38mm)	No. 8	31%	8%	21%	14%
1190 μm (1,19mm)	No. 16	24%	20%	21%	19%
595 μm (0,595mm)	No. 30	14%	15%	18%	12%
297 μm (0,297mm)	No. 50	12%	19%	15%	17%
149 μm (0,149mm)	No. 100	7%	20%	16%	19%
75 μm (0,075mm)	No. 200	7%	14%	7%	14%
<75 μm (<0,075mm)	Fondo	6%	5%	1%	5%

En general los morteros de pega y de revoque cumplen con las especificaciones necesarias para cumplir con su función dentro del monumento pero también cumplen con otro parámetro que varios autores consideran importante, y es que las arenas no debe contener más del 50% retenido entre dos tamices consecutivos (ver Tabla 3.20.) a excepción del mortero de pega PCMP-03 que entre el tamiz No.8 y No. 16, alcanza el 55% de retención.

En general se observa en ambos monumentos arquitectónicos (puente en Popayán y Puente Ortiz en Cali) la utilización sucesiva de granulometrías más finas y uniformes hacia el exterior y el aumento de la cantidad de cal en relación al árido, se crea entonces una red de poros cuyo tamaño disminuye también hacia el exterior, lo cual permite aumentar la permeabilidad del revestimiento hacia el exterior (Cruz, 1996)

3.4.3. Difracción de rayos X

La presencia de cuarzo es evidencia de la utilización de arena cuarcítica en la formulación del mortero original; la calcita CaCO_3 es indicativo de su utilización de la cal. Las intensidades relativas de las señales están relacionadas con la concentración en los morteros, al comparar las intensidades es posible establecer que las muestras son ricas en arena en relación con el contenido de calcita.

La Illita es un filosilicato trilaminar resultante de la alteración térmica de la muscovita (Martinez & Montes, 2007), además, es uno de los minerales más comunes en la arcilla. Clorita es el nombre genérico de algunos aluminosilicatos, del grupo de los filosilicatos, es una arcilla de tres capas. La Caolinita indica que la piedra caliza contenía cierta cantidad de arcilla. Algunos reportes indican la alta reactividad puzolánica derivada del empleo de una arcilla Caolinitica promueve un incremento en la resistencia mecánica debido a su posible activación en metacaolín amorfo. Se observa entonces una falta de activación térmica de este material arcilloso a metacaolín.

Tabla 3.21. Cuantificación XRD de los morteros antiguos

COMPUESTO	PCMP	POMP	POMR
Cuarzo SiO_2	50,2%	51,5%	58,9%
Calcita CaCO_3	14,1%	32,8%	23,3%
Albita $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	5,9%	8,6%	7,8%
Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,4%	1,1%	0,0%
Illita $\text{KAl}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	14,0%	0,0%	0,0%
Clorita $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	15,4%	0,0%	0,0%
Caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	0,0%	6,0%	9,9%

La difracción de rayos X de los morteros antiguos (Tabla 3.21) muestra que el mortero PCMP posee mayor contenido de minerales arcillosos, mientras que los morteros POMP y POMR muestran que están compuestos principalmente por carbonato de calcio como aglomerante.

El contenido de arcilla presente el mortero PCMP puede provenir de varias fuentes entre las que están: Arcilla provenientes de las impurezas de la piedra caliza, arcillas provenientes de los hornos de calcinación de la caliza o arcilla agregada intencionalmente. La Caolinita presente en los morteros POMP y POMR indica la posibilidad de que la piedra caliza utilizada como materia prima proviene de la misma cantera para la elaboración del mortero de pega y de revoque. Albita es un mineral presente en algunas puzolanas y en algunas arenas ya que es un constituyente muy típico de las rocas ígneas de tipo granito.

3.4.4. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

La Ilustración 54 muestra los espectros FTIR de los morteros antiguos. La muestra de mortero PCMR muestra bandas más fuertes de agua enlazada a comparación de las otras muestras alrededor de $1630-1640\text{cm}^{-1}$ (le sigue el mortero PCMP, POMR y POMP) esta agua puede estar sujeta a hidratos de silicato y aluminato característicos de las arcillas. Esto demuestra que la materia prima para la elaboración del mortero tenía cierta cantidad de arcilla.

El pico intenso alrededor de 874cm^{-1} presentes en todas las muestras de mortero, demuestra el carácter calcítico de todos los morteros siendo más intenso en las muestras POMP y POMR demostrando que la materia prima del mortero se componía de una piedra caliza con alto contenido de carbonato de calcio. Posteriormente en el carácter calcítico sigue el mortero PCMR y PCMP.

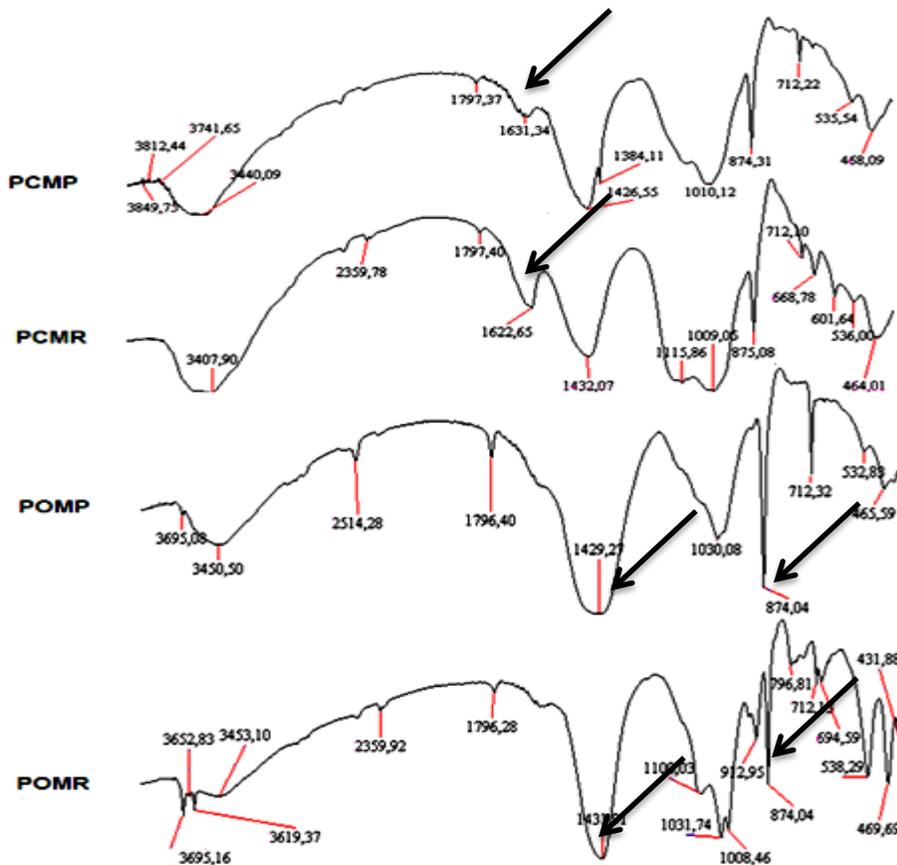


Ilustración 55. Espectroscopia de los morteros antiguos

Las bandas sílice (vibración Si-O) son más fuertes en la muestra POMR debido al alto contenido de cuarzo (SiO_2), Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) identificados a través del espectro de difracción de rayos x. Las fases silicato son responsables de las bandas 469 y 538cm^{-1} . Posteriormente en intensidad de estos picos sigue la muestra PCMP la cual contiene Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Illita $\text{KAl}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y Clorita $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$.

Los espectros de los morteros se compararon entre sí usando el programa Specrum v.0 del equipo FTIR Perkin Elmer, Modelo RXI que calcula el coeficiente de correlación entre los espectros. El grado de correlación indica la proximidad que hay entre los puntos de la nube de puntos de dos espectros, siendo igual a:

$$\frac{\sum w_i A_i B_i}{(\sum w_i A_i A_i)^{1/2} (\sum w_i B_i B_i)^{1/2}}$$

Donde A_i y B_i son los valores de absorbencia en los espectros A y B a una frecuencia i y w es el peso probabilístico (Denner, Sobrero, Fernández, & Brissón, 2008). Una correlación cercana a **1** indica una gran semejanza entre espectros, una correlación cercana a **0** indica que los dos espectros son totalmente diferentes y no existe una alta relación entre ellos. En la correlación se estipulo la muestra PCMR como la muestra patrón y la comparación se hace entre esta muestra y las otras, obteniéndose los resultados de la Tabla 3.22. La correlación indica que la materia prima obtenida para la elaboración de los morteros muy probablemente proveniente de la misma cantera para cada uno de los monumentos.

Tabla 3.22. Correlación FTIR entre los morteros antiguos

Muestra	Correlación
PCMR	1
PCMP	0,7578
POMP	0,4885
POMR	0,5626

Los resultados muestran que los morteros de revoque y de pega del puente Popayán poseen características muy semejantes indicando que han sido elaborados con técnicas similares y materias primas provenientes de las mismas canteras y ríos.

3.4.5 . Calorimetría diferencial de barrido

Dos reacciones endotérmicas principales fueron identificadas durante el calentamiento de las muestras (Ilustración 56). La reacción endotérmica alrededor de 85°C presente en todos los morteros indica la liberación de agua evaporable (agua higroscópica) debido a la incidencia del medio ambiente. La segunda reacción endotérmica alrededor de 138°C presente en los morteros

PCMP y PCMR, indica la pérdida de agua de las fases hidratadas tales como silicatos y aluminatos que son característicos de las arcillas. El pico intenso del mortero PCMR “sugiere” que este posee más cantidad de material arcilloso en la muestra. Los espectros de POMP y POMR son característicos de morteros compuestos principalmente por carbonato de calcio y los espectros de PCMP y PCMR son característicos de morteros con cierta cantidad de arcilla. Mediante el análisis térmico y Espectroscopia Infrarroja se deduce que el componente de unión, es el carbonato de calcio el cual es omnipresente y preponderante, lo que indica el trabajo típico de cal en los morteros antiguos.

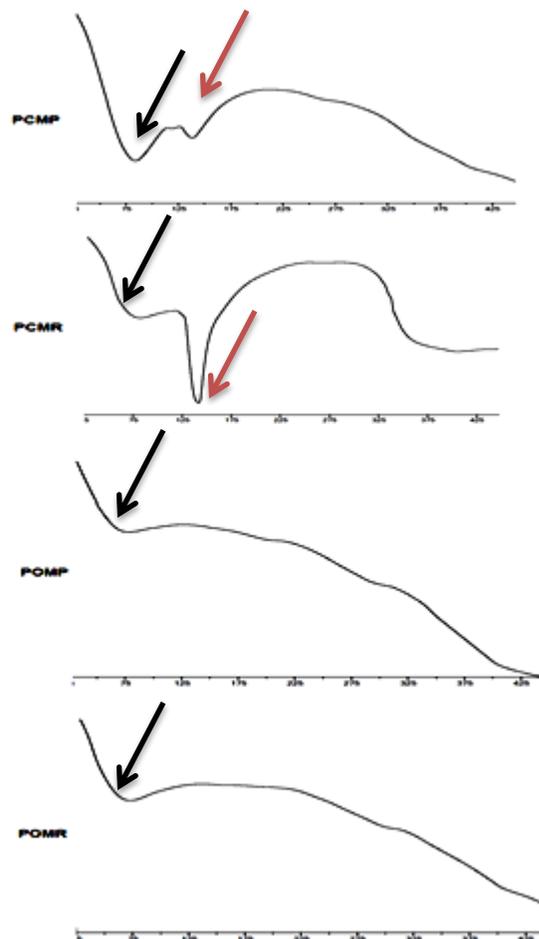


Ilustración 56. Calorimetría diferencial de barrido de las muestras de morteros antiguos

En general el examen de las muestras ha identificado dos tipos generales de morteros que difieren en la composición, textura y color: (a) el primer tipo de mortero contiene cal, arcilla y arena (muestra PCMP y PCMR) y (b) el segundo tipo contiene cal y arena (POMP y POMR). Las principales directrices para el diseño de morteros de reparación sugieren que hay una necesidad de fortalecer los morteros y el uso de materias primas de composición química similar al mortero antiguo.

3.5. Aproximación a la formulación de morteros compatibles

Después de haber realizado las pruebas de caracterización a los morteros y de haber obtenido los resultados, se realizó un experimento que consistía en la realización de diferentes mezclas de mortero con el propósito de obtener características idénticas a la de los morteros antiguos.

Para la realización de las diferentes mezclas se utilizó materia prima de la región de viges (pueblo cercano a la ciudad de Cali y a la ciudad de Popayán) que consta de piedra caliza quemada en un horno artesanal, se usó arena cuarcítica de la misma región extraída de ríos cercanos, agua potable, una granulometría compatible igual para todas las mezclas menor a 2,38mm, además no se agregaron adiciones ni otras materias primas, todas estas consideraciones con la intención de igualar el proceso tecnológico de elaboración de los morteros antiguos.

Se fabricaron dosificaciones diferentes: 1:2, 1:2,5 y 1:3, cada dosificación con diferentes cantidades de agua añadida, para realizar las pruebas de caracterización y determinar cuáles son los más compatibles con los morteros antiguos, las pruebas que se hicieron son: Difracción de rayos X, Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier y Ensayos de Compresión, con el propósito de identificar el mortero que mejor representa los morteros antiguos.

Con el aglomerante calcítico en los morteros nuevos se garantiza una compatibilidad química con los morteros antiguos, con la granulometría y la proporción aglomerante: agregado adecuada se garantiza una compatibilidad mecánica con morteros y ladrillos antiguos.

Tabla 3.23. Mezclas de los morteros vaciados en el laboratorio.

Muestras	Mezcla
M1	1: 2: 0,5
M2	1: 2: 0,6
M3	1: 2: 0,63
M4	1: 2.5: 0,6
M5	1: 2.5: 0,75
M6	1: 2.5: 0,69
M7	1: 3: 0,65
M8	1 :3: 0,75
M9	1: 3: 0,8

3.6. Caracterización de morteros de restauración

3.6.1. Difracción de rayos X

Los espectros de difracción se muestran en la Ilustración 57. La Tabla 3.25 muestra la cuantificación XRD de los morteros nuevos. La calcita se encuentra en cantidad preponderante en todos los morteros frente a los otros compuestos que son cuarzo, anortita y wollastonita. La presencia del cuarzo indica la utilización de arena cuarcítica en la elaboración del mortero.

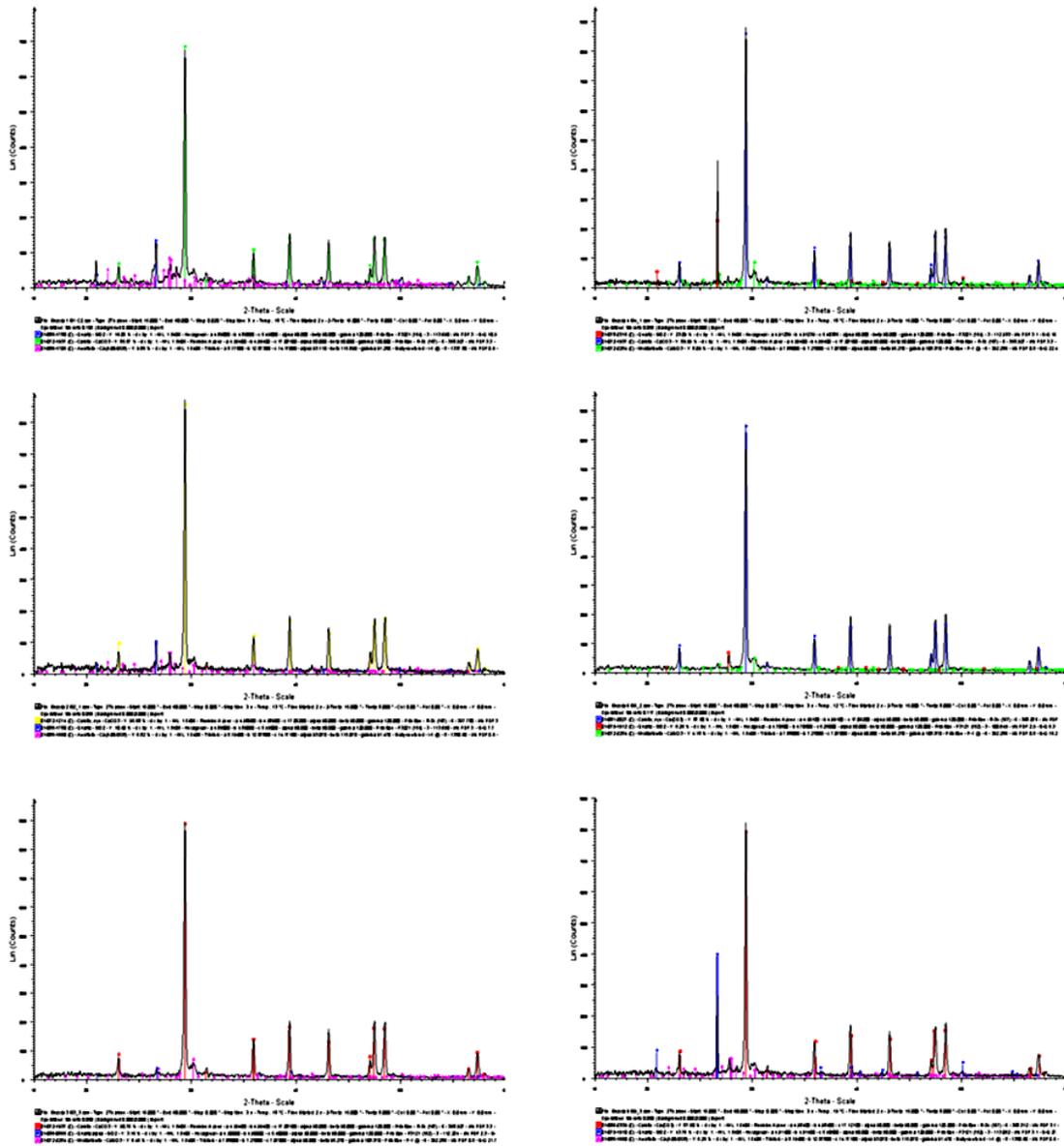


Ilustración 57. Difracción de Rayos X de las muestras de morteros de restauración

Tabla 3.25. Cuantificación XRD de las muestras de morteros de restauración

COMPUESTO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Calcita CaCO ₃	77.43 %	77.57 %	95.52 %	85.74 %	83.11 %	92.94 %	85.54 %	86.53 %	77.12 %
Cuarzo SiO ₂	12.96 %	5.98%	2.01%	1.68%	4.44%	0.18%	3.66%	9.46%	11.40 %
Anortita CaAl ₂ Si ₂ O ₈	9.62%	16.45 %	0%	0%	0%	0%	10.50 %	4.01%	11.48 %
Wollastonit a CaSiO ₃	0%	0%	2.47%	12.57 %	12.45 %	6.87%	0%	0%	0%

En general la **anortita** es un mineral del grupo de los Silicatos, subgrupo Tectosilicatos y dentro de ellas pertenece a los feldespatos denominados plagioclasas, es producto de la reacción entre una arcilla activada y el óxido de cal en el proceso de cocción de la materia prima (caliza) al lograr esta una temperatura aproximada de 900°C (Galindo, Muñoz, & Caicedo, 2008). El mortero de mayor contenido de **anortita** fue el M2C1, mientras que en los morteros M3C3, M4C1 y M5C2 no está presente este compuesto.

Los morteros nuevos vienen de una caliza muy pura con muy baja concentración de arcillas pero se alcanzó una alta temperatura para la activación del material y su reacción puzolánica ya que se identifican compuestos como Anortita y Wollastonita en todos los morteros.

3.6.2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

Todos los espectros FTIR de los morteros nuevos muestran bandas intensas características (Ilustración 58) de carbonato de calcio (2511, 11796, 429, 873 y 712cm⁻¹), el mortero M3-C3 presenta las bandas más intensas correspondientes a estas longitudes de onda. Todos los morteros muestran bandas fuertes relacionadas con la presencia de agua (alrededor de 3418 y 1630 cm⁻¹). Esta agua puede estar sujeta a compuestos hidráulicos. Todos los

morteros muestran bandas de sílice correspondiente a residuos de arena después de la desagregación (1037cm^{-1}). Los morteros M2, M4, M5, M8 y M9 presentan un pico poco intenso en 2920cm^{-1} que podría estar relacionado con algún material orgánico. Todos los morteros exceptuando el M5 y M9 mostraron un pico poco intenso en 528cm^{-1} que indica la presencia del óxido de hierro.

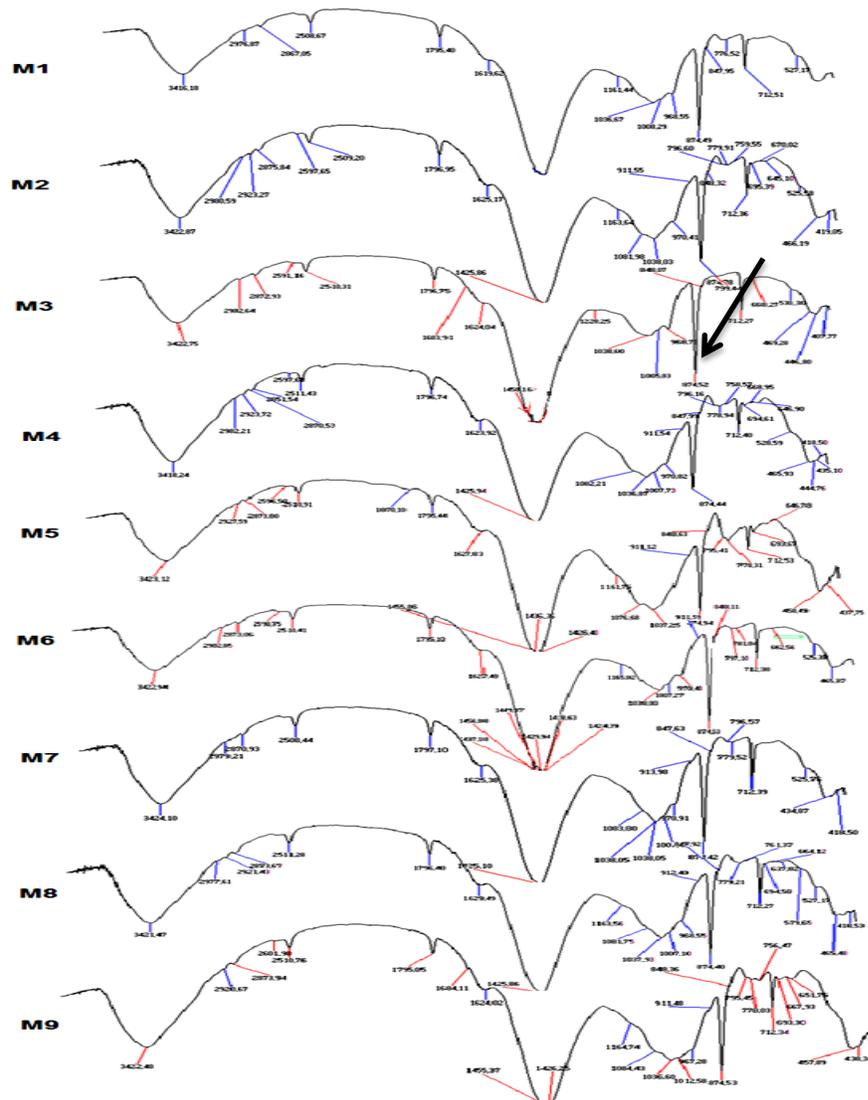


Ilustración 58. Espectroscopia de las muestras de morteros de restauración

3.6.3. Ensayo de Compresion de morteros nuevos

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos de compresión para las diferentes mezclas y se analizan los respectivos resultados. El ensayo de compresión se realizó según norma NTC 682, con un tiempo de fraguado de los morteros nuevos de 60 días, tiempo en el cual los morteros ya han adquirido resistencia por carbonatación, aunque esta disminuya a medida que en la capa externa se forma carbonato de calcio lo que dificulta la reacción de CO₂ con las capas internas, demorándose así en adquirir su resistencia final. La lectura que mostró el equipo utilizado determinó los valores contenidos en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Resultados obtenidos de las pruebas de Resistencia a la Compresión en Frío.

Muestra	Altura (cm)	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Resistencia a la Compresión en Frío (Mpa)	Carga Maxima (N)	Desviacion respecto a la media (X- \bar{X})
M1C2	5,14	4,99	5,12	29,2	0,53	1352,6	296,5
M2C1	4,97	5	5,06	85,1	0,76	1920,1	864
M3C3	5,05	4,98	4,99	16,5	0,27	669,3	-386,8
M4C1	4,98	4,97	4,93	19,8	0,36	883,7	-172,4
M5C2	4,97	4,99	4,92	42,29	0,37	920,7	-135,4
M6C2	5	5	5,01	29,28	0,36	909,9	-146,2
M7C3	5,02	5,02	5,01	28,88	0,46	1150,5	94,4
M8C3	5,01	4,94	4,96	21,11	0,33	808,2	-247,9
M9C3	4,98	4,95	5,1	47,69	0,37	889,9	-166,2
Valor Medio	5,01	4,98	5,01	35,53	0,42	1056,1	

El mortero M2 es el que exhibe mejores propiedades mecánicas debido a la presencia en su composición de la mayor cantidad de Anortita a comparación de los otros morteros. Al mortero M2 le sigue el mortero M1 y M7 en resistencia a la compresión, estos presentan también alta concentración de anortita y baja concentración de calcita lo que es indicativo de que la anortita es un compuesto que mejora las propiedades del mortero. El mortero de más bajo desempeño

mecánico fue el mortero M3C3 debido posiblemente a la ausencia de anortita, a la baja concentración de wollastonita y a la más alta concentración de carbonato de calcio de todos los morteros nuevos.

3.7. Selección de morteros compatibles con los antiguos

Para la selección del mortero más compatible, hay que tener en cuenta su compatibilidad química y mecánica con los morteros antiguos y además también la compatibilidad con los ladrillos presentes en el monumento.

Todos los morteros desarrollados presentan la calcita como material aglomerante de forma preponderante como en el caso de los morteros antiguos, por tal razón cualquier mortero desarrollado cumple con el requisito de compatibilidad química.

Con respecto a la compatibilidad mecánica algunos autores consideran que la resistencia a la compresión del mortero de restauración debe ser de valor cercano al del mortero antiguo (López, 2006), lastimosamente no se logro hacer el ensayo de compresión de morteros antiguos y no podemos establecer una comparación; otros autores argumentan que la resistencia a la compresión debe ser lo mas alta posible pero de menor valor que la de los ladrillos de la mampostería, esto nos asegura una compatibilidad mecánica con los ladrillos.

Galindo, según inspecciones en el puente Cauca en Popayán, argumenta que las áreas más afectadas del puente se encuentran en las fronteras de la estructura y probablemente a causa de la incompatibilidad de las juntas de mortero con los ladrillos (Galindo, Muñoz, & Caicedo, 2008), posiblemente por la diferencia en los valores de resistencia a la compresión entre los morteros de cal y los ladrillos los cuales tienen valores muy superiores (Tabla 3.27.).

Tabla 3.27. Prueba de Resistencia de ladrillos (Galindo, Muñoz, & Caicedo, 2008)

Puente	Muestra	Carga Máxima (N)	Resistencia a la Compresión en Frío (Mpa)	Módulo de elasticidad (Mpa)
Sobre el río Cauca en Popayán	S1M1	7960	5,07	208,3
	S2M2	7890	4,94	96,58
	S4M1-1	29580	9,19	232,88
	S4M1-2	19570	6,04	144,66
	S5M1-1	6920	2,78	87,48
	S5M1-2	21290	7,53	171,85
	S5M1-3	10880	4,14	89,67
Promedio		14870	5,67	147,34

Es por esta razón que se deben escoger los morteros nuevos con mayor resistencia a la compresión. Se escogio el mortero M2 como mortero de restauración de los morteros de pega de ambos puentes ya que este puede soportar muros mas cargados. Para morteros de revoque de ambos puentes se escogio el mortero M3 por ser el mas calcitico ya que puede ofrecer mayor impermeabilidad y además no se exigen de él grandes resistencias mecánicas.

Capítulo 4

Conclusiones

La metodología empleada revela el carácter complementario de las diferentes técnicas de caracterización: XRD para la identificación de las principales fases cristalinas, FTIR para una evaluación de la fase no cristalina, ESEM para una evaluación de la morfología, DSC para la determinar el carácter arcilloso y Ensayo de Compresión para conocer la resistencia del material.

Los resultados convergen para revelar la naturaleza calcítica de los morteros utilizados en ambos puentes confirmando el amplio uso de la cal en la elaboración de los morteros de la época. Otras asociaciones mineralógicas se encontraron en las muestras tales como el cuarzo (que da razón de la presencia de arena como agregado) y minerales arcillosos, que solo varían en sus proporciones en cada muestra, siendo mayor en los morteros del puente Cauca en Popayán.

Se evidencia que las técnicas antiguas utilizaron granulometrías más finas y mayor cantidad de cal hacia el exterior creando una red de poros cuyo tamaño disminuye hacia el exterior, lo cual permite aumentar la impermeabilidad.

La formación de anortita a temperaturas mayores a 900°C en los morteros nuevos, confiere al mortero mejor resistencia a la compresión que los morteros más calcíticos.

Con base en los resultados obtenidos en la investigación, se recomienda el uso de los morteros M2 para mortero de pega y M3 para mortero de revoque, en la restauración de los puentes de arco de ladrillo (Puente Cauca en Popayán y puente Ortiz en Cali), ya que son compatibles química y mecánicamente con los materiales preexistentes.

Para futuras investigaciones en el campo de la restauración se sugiere la utilización del análisis térmico Termogravimetría (TG) ya que este análisis permite cuantificar de forma más exacta el carácter hidráulico de los morteros antiguos y diseñar morteros más compatibles.

Durante el desarrollo de la investigación se logro la consecución de los objetivos propuestos, logrando conocer las características químicas, físicas y mecánicas de los morteros antiguos, dando a conocer una nueva perspectiva sobre la construcción en Colombia y recomendar morteros compatibles con los antiguos susceptibles de ser usados en restauración.

Referencias

- AFAM. (2003). *Morteros Guia General*. Obtenido de <http://books.google.com.co/books?id=DTCfThlgAHYC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Alejandro, S. (2002). *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Sevilla.
- Arizzi, A., & Cultrone, G. (2009). Estudio de las fases minerales de neoformación en morteros de cal aérea tras la adición de metacaolín y sulfoaluminato cálcico. *Revista de la Sociedad española de mineralogía* , 29.
- Arquicity. (2007). *Morteros de Cal*. Obtenido de <http://www.arquicity.com/mortero-de-cal.html>
- Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., & Zendri, E. (1998). Characterization of structural Byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochim. Acta* 321 , 151– 160.
- Barbero, J. (1998). *Técnicas de consolidación en pintura mural*. Madrid: Ediciones Polifemo.
- Barón, F. (2011). *Ladrillos: junta gruesa, junta fina...* Obtenido de http://bricolaje.facilísimo.com/foros/otras-tareas/ladrillos-junta-gruesa-junta-fina_370461.html
- Belizan, G. (2010). *Conocimiento y estudio de materiales*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos57/materiales-para-obras/materiales-para-obras3.shtml>
- Bores, F. (1998). *Historia de la construcción*. La Coruña: Universidad de A. Coruña.
- Braga Reis, M. (1994). Difracción de Rayos X. *Curso Técnicas de Caracterización Química e Físico-Química de Materiais* .
- Brostow, W. (1981). *Introducción a la Ciencia de los Materiales*. Mexico: Limusa.
- Brüemmer, M. (2004). *Pequeña guía de la cal en la construcción*. Obtenido de <http://www.rinconesdelatlantico.com/articulos.php?articulo=lacal&mes=2&year=2004>

Brüemmer, M. (2004). *Pequeña guía de la cal en la construcción*. Obtenido de Revista EcoHabitar:
<http://www.ecohabitar.org/articulos/bioconstruccion/cal1.html>

Callister, W. (2009). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté.

Carneiro, A., & Costa, M. (2001). Chemical and mineralogical characterization of mortars from the Bolonha Palace in the city Belém, state of Pará - Brasil. *Historical Constructions* , 331.

Castillo, R., Fernandez, R., Antoni, M., Scrivener, K., Alujas, A., & Martirena, J. (2010). Activation of low clays at high temperatures. *Ingeniería de construcción* , 25 (3).

Ceac. (2007). *Materiales de Construcción*. Barcelona: Ceac.

Ceac. (2003). *Materiales e Interpretación de planos* (Vol. 1). Barcelona, España: Ceac.

Collado, P. (2005). *Control de ejecución de tabiquerías y cerramientos*. Valladolid: Lex Nova.

Cook, D. (1985). Cement Replacement Materials. *Concrete Technology and Design* , 40-72.

Cowper, A. (2000). Lime and lime mortars. *Donhead Publishing* .

Cruz, M. (1996). Analisis de la variacion de la composicion de los morteros utilizados en los muros de fabrica tradicionales: la compatibilidad de los morteros tradicionales de cal y la incompatibilidad de los morteros de cemento en el funcionamiento constructivo. *Actas del primer congreso Nacional de Historia de la Construcción* , 19-21.

Denner, S., Sobrero, S., Fernández, V., & Brissón, C. (2008). Espectroscopía infrarroja aplicada al análisis de los calculos urinarios. *FABICIB* , 211.

Dexpan. (2008). *Extracción, corte y explotación de Canteras de Piedra Caliza*. Obtenido de
http://www.archerusa.com/noexplosivodemolicion/dexpanfotos/explotacionmina_sgranitomarmol/Explotacion_Minas_Canteras_WD_Navis_sp.html

Dullinger. (2011). *La historia de la producción de cal en pasta*. Obtenido de
<http://www.kalk.at/es/kalkfarben/>

- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars. *Cement and Concrete Research* , 1416 - 1424.
- Fischer, K. (2002). *Revista de arquitectura para la renovación y reparación*. Obtenido de <http://www.konrad-fischer-info.de/espana.htm>
- Galindo, J., Muñoz, A., & Caicedo, M. (2008). Characterising a historical bridge's bricks in Popayan (Colombia). *Ingeniería e Investigación* , 28 (2), 15 - 21.
- Galván, M. (2008). *Desarrollo de Nuevos Materiales Polifásicos para Construcción basados en Hidroxido de Calcio*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Galvan, M., & Velazquez, R. (2011). Lime, an ancient material as a renewed option for construction. *ingeniería, investigacion y Tecnologia* , 93-102.
- García, J., & Borralleras, P. (2011). *Hormigon autocompacto y gleniun*. Obtenido de http://www.concretonline.com/pdf/00hormigon/art_tec/basf03.pdf
- Genestar, C., & Pons, C. (2003). Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterisation. *Journal of Cultural Heritage* 4 , 291–298.
- Genestar, C., Pons, C., & Más, A. (2006). Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain). *Analytica Chimica Acta* , 373 - 379.
- Gleize, P., Motta, E., Silva, D., & Roman, H. (2009). Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). *Cement & Concrete Composites* 31 , 342–346.
- González, J., Vadillo, L., López, C., González, A., & Navarro, E. (1995). *Manual de reutilizacion de residuos de la industria minera, siderometalurgica y termoelectrica*. Obtenido de <http://books.google.com.co/books?id=NO56Cgyf6uwC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Guarán, F. (2008). *Evaluacion del uso y desempeño de cementos mezclados*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Guerrero, J. (2001). Rocas Caliza: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña. *Temas de Ciencia y Tecnología* , 5 (14), 3 - 14.

Habert, G., Choupay, N., Escadeillas, G., & Guillaume, D. (2009). Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science* , 322–330.

Habert, G., Choupay, N., Escadeillas, G., Guillaume, D., & Montel, J. (2009). Clay content of argillites: Influence on cement based mortars . *Applied Clay Science* 43 , 322–330.

Habert, G., Choupay, N., Guillaume, D., & Montel, J. (2009). Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science* 43 , 322 - 330.

HelmBar. (2011). *Diario de arquitectura*. Obtenido de <http://www.arquitecturadiaria.com/2011/07/23/horno-de-cal-gunnerside-2/>

Ingo, G., Fragalà, I., Bultrini, G., & De Caro, T. (2004). Thermal and microchemical investigation of Phoenician–Punic mortars used for lining cisterns at Tharros (western Sardinia, Italy). *Thermochim Acta* , 53–60.

López, F. (2006). *Elementos de topografía y construcción*. Oviedo (España): Ediuno.

Maravelaki, P., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2003). Physico-chemical study of Cretan ancient mortars. *Cement and Concrete Research* , 651 - 661.

Maravelaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research* , 1577 - 1586.

Martín, M. (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Madrid: Complutense.

Martinez, J., & Montes, P. (2007). Reactividad puzolánica de una arcilla regional. *Naturaleza y Desarrollo* , 5 (2), 43 - 57.

NTC-5163. (2003). Terminología Relacionada con la Cal y Caliza. *Norma Técnica Colombiana* .

Paama, L., Pitkanen I, R. H., & Peramaki, P. (1998). Thermal and infrared spectroscopic characterization of historical mortars. *Thermochim Acta* , 127.

Pérez, A. (2011). *Forum Ibérico de la Cal*. Obtenido de <http://fical.org/normativa/48-hidraulicidad>

Politecnica, U. (2011). *Difracción de rayos X*. Obtenido de http://www.upct.es/sait/_sit/html/recursos_difractometria.htm

Purdue University. (2010). *Radiological & Environmental Management*. Obtenido de <http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>

R. Médicos. (2011). *R. Médicos*. Obtenido de <http://rompecabezas-medicos.blogspot.com/2010/07/cal-apagada.html>

Ramachandran, V. (1995). Concrete Admixtures Handbook. *Science and Technology* , 67.

Saja, J. A. (2000). *Introducción a la física de los materiales*. Valladolid: Universidad de Valladolid.

Salamanca, R. (2011). *La Tecnología de los morteros*. Bogota: Universidad Militar de Nueva Granada.

Sánchez, F. J. (2002). *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

Sandrolini, F., & Franzoni, E. (2010). Characterization procedure for ancient mortar's restoration: The plasters of the

Cavallerizza courtyard in the Ducal Palace in Mantua (Italy). *Materials Characterization* , 97 - 104.

Sanjurjo, J., Trindade, M., Blanco, R., Benavides, R., & Fernández, D. (2010). Chemical and mineralogical characterization of historic mortars from the Santa Eulalia de Bóveda temple, NW Spain. *Journal of Archaeological Science* , 2346e2351.

Serway, R., & Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (Vol. 1). California: Cengage Learning.

Silva, D., Wenk, H., & Monteiro, P. (2005). Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern. *Thermochimica acta* , 35 - 40.

Stocks. (2011). *Piedra caliza*. Obtenido de <http://www.solostocks.com/venta-productos/otros-sectores/piedra-caliza-taco-2538340>

Trindade, M., Dias, M., Coroado, J., & Rocha, F. (2009). Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: A comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal. *Applied Clay Science* 42 , 345–355.

U. de Castilla. (2011). *Catedra de Ingenieria*. Obtenido de http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf

U. de Granada. (2007). *Alteracion Quimica* . Obtenido de <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/Tema09.htm>

Válek, J. (2000). Compatibility of historic and modern lime mortars. *12th Intern. Brick-block Masonry* .

Vicat, L. (1812).

Wapedia. (2011). *Wiki: Calcita*. Obtenido de <http://wapedia.mobi/es/Calcita>

Zamba, I., Stamatakis, M., Cooper, F., & Themelis, P. (2007). Characterization of mortars used for the construction of Saithidai Heroon Podium in ancient Messene, Peloponnesus, Grece. *Materials characterization* , 1229 - 1239.