

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO DE MORTEROS PARA REPARACIÓN
ARQUEOLÓGICA Y PATRIMONIAL**

COMPONENTE B: CENIZA VOLCÁNICA

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

JONATHAN ABEL VILLA OROZCO

jonathan.villa@epn.edu.ec

DIRECTORA: EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS TRONCOSO

mercedes.villacis@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Jonathan Abel Villa Orozco declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Jonathan Abel Villa Orozco

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jonathan Abel Villa Orozco, bajo mi supervisión.

EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS TRONCOSO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JONATHAN ABEL VILLA OROZCO

ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS TRONCOSO

DEDICATORIA

Dedico el presente Trabajo de Integración Curricular a Dios por que me ha dado la salud, la vida, la sabiduría y el entendimiento para poder culminar satisfactoriamente esta etapa de formación académica.

A mis padres, por el gran esfuerzo que han realizado día a día para brindarme el apoyo y sustento a lo largo de mis estudios, su sacrificio y dedicación han sido un ejemplo para seguir, y es por eso que este logro lo amerito a ellos.

Jonathan Abel Villa Orozco

AGRADECIMIENTOS

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tú Dios estará contigo donde quiera que vayas” **Josué 1:9**

Al finalizar mi experiencia como estudiante de la carrera de Ingeniería Civil y al estar a un paso de convertirme en un profesional de la patria, reconozco que este logro no es solo mío, sino de muchos.

Así que iniciaré nombrando al ser más maravilloso y dueño de mi vida, Dios. Quien ha cumplido con cada una de sus promesas, ha sido mi luz, mi fuerza para enfrentarme día con día a todos los obstáculos que se me han presentado en mi formación académica.

Continuo con mis amados padres Jorge y Margarita quienes han sido mi motor, fuente de mi inspiración en medio de esta gran aventura, son ellos los que mediante sus oraciones y sabios consejos me han mantenido de pie.

También a mis hermanos y sobrinos, por brindarme momentos de alegría haciendo que esta etapa sea más llevadera.

Como no agradecer a la Ing. Mercedes Villacís, por la disposición y guía, proporcionándome su conocimiento y experiencia, para alcanzar de una manera exitosa este trabajo de integración curricular.

Y finalizo con el ser más hermoso que Dios me ha permitido conocer en esta fase final de mis estudios, mi prometida Selena Álvarez, quien mediante su amor y compañía incondicional me ha hecho saber que donde existe amor, los sueños se cumplen.

Jonathan Abel Villa Orozco

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
CAPÍTULO I.....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo General.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	3
1.4 Marco Teórico.....	4
1.4.1 Morteros.....	4
1.4.1.1 Definición.....	4
1.4.1.2 Clasificación de los morteros	4
1.4.1.2.1 Morteros según sus elementos de composición	4
1.4.1.2.1.1 Morteros de Cal.....	4
1.4.1.2.1.2 Morteros de Yeso.....	4
1.4.1.2.1.3 Morteros de Cemento Portland	5
1.4.1.2.1.4 Morteros de Cal y Cemento.....	5
1.4.1.2.2 Morteros según su fraguado.....	5
1.4.1.2.3 Morteros según su fluidez	5

1.4.1.2.4 Morteros según su uso	6
1.4.1.2.4.1 Mortero de pega	6
1.4.1.2.4.2 Morteros de relleno	6
1.4.1.2.4.3 Morteros de recubrimiento	6
1.4.2 Cal	7
1.4.2.1 Proceso de la Cal	7
1.4.2.2 Apagado de la cal	7
1.4.3 Puzolana	9
1.4.3.1 Definición.....	9
1.4.3.2 Origen e Historia.....	9
1.4.3.3 Clasificación	10
1.4.3.3.1 Puzolanas Naturales	10
1.4.3.3.2 Puzolanas Artificiales	10
1.4.3.4 Propiedades	10
1.4.3.5 Uso de las puzolanas	11
CAPÍTULO II	13
2. METODOLOGÍA	13
2.1 Materia Prima	13
2.1.1 Ceniza Volcánica	13
2.1.2 Arena normalizada	15
2.1.3 Arena	16
2.1.4 Cal	17
2.1.5 Agua	18
2.2 Preparación de muestras.....	19
2.2.1 Preparación de la ceniza volcánica	19
2.2.2 Apagado de la cal	21

2.3 Ensayos en la arena	23
2.3.1 Peso específico y absorción de agregados	23
2.3.2 Densidad aparente	26
2.3.3 Análisis Granulométrico	27
2.3.4 Contenido Orgánico	28
2.4 Elaboración de morteros.....	29
2.4.1 Dosificación.....	29
2.4.2 Preparación de la mezcla.....	30
2.4.3 Obtención del flujo	32
2.4.4 Elaboración de los cubos	34
2.5 Ensayo de resistencia a la compresión.....	36
2.6 Interrupción de la hidratación de los morteros	37
2.7 Difracción de rayos x	39
CAPÍTULO III	41
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
3.1 Resultados y Análisis.....	41
3.1.1 Resultados de morteros patrón	41
3.1.1.1 Flujo morteros patrón.....	41
3.1.1.2 Resistencia a compresión.....	41
3.1.1.3 Difracción de Rayos X	43
3.1.2 Resultados de morteros de cal y arena con sustitución de ceniza volcánica en porcentajes de 5%, 10% y 20% de reemplazo en peso de cal.	43
3.1.2.1 Flujo morteros con sustitución	43
3.1.2.2 Resistencia a la compresión	44
3.1.2.3 Difracción de Rayos X	45
3.1.2.4 Densidad	49

3.2 Conclusiones	50
3.3 Recomendaciones	53
4. BIBLIOGRAFÍA	54
5. ANEXOS.....	57
ANEXO I.....	58
ANEXO II.....	60
ANEXO III.....	63
ANEXO IV	66
ANEXO V	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Morteros clasificados según su fluidez	6
Tabla 1.2. Propiedades físicas de las puzolanas	11
Tabla 1.3. Propiedades químicas de las puzolanas	11
Tabla 2.1. Propiedades de la ceniza volcánica.	13
Tabla 2.2. Contenido de óxidos en la ceniza volcánica.....	14
Tabla 2.3. Granulometría de la arena normalizada.	15
Tabla 2.4. Propiedades básicas de la arena normalizada.	15
Tabla 2.5. Propiedades químicas de la arena normalizada.	16
Tabla 2.6. Propiedades de la arena de Pifo	17
Tabla 2.7. Composición química de la cal viva.....	18
Tabla 2.8 Dosificación de los morteros.....	30
Tabla 3.1 Obtención del flujo de los morteros patrón.....	41
Tabla 3.2 Resistencia a la compresión de los morteros patrón.	41
Tabla 3.3 Obtención del flujo de morteros con ceniza volcánica con sustitución parcial de 5%, 10% y 20%	43
Tabla 3.4 Resistencia a la compresión de los morteros con ceniza volcánica con sustitución parcial de 5%, 10% y 20%	44
Tabla 3.5 Resultados de DRX a edad de 90 días de los morteros con sustitución del 5, 10 y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.	46
Tabla 3.6 Resultados de DRX a edad de 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.	48
Tabla 3.7 Densidad de los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% y de los morteros patrón.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo de la cal.....	9
Figura 2.1 Ceniza Volcánica de Romerillos.....	14
Figura 2.2 Arena normalizada de Ottawa.....	16
Figura 2.3 Arena de Pifo.....	17
Figura 2.4 Cal Viva.....	18
Figura 2.5 Mortero y Pistilo para trituración.....	20
Figura 2.6 Tamiz N°200.....	20
Figura 2.7 Ceniza Volcánica tamizada.....	20
Figura 2.8 Preparación de cal para el apagado.....	21
Figura 2.9 Vertido de agua en la cal.....	22
Figura 2.10 Mezclado de la cal.....	22
Figura 2.11 Cal apagada.....	23
Figura 2.12 Equipos utilizados en el ensayo de peso específico y absorción de agregados.....	25
Figura 2.13 Bomba de vacíos.....	25
Figura 2.14 Equipo para ensayo de densidad aparente.....	27
Figura 2.15 Granulometría de la arena de Pifo.....	28
Figura 2.16 Contenido Orgánico de la arena de Pifo.....	29
Figura 2.17 Mezcladora Controls.....	31
Figura 2.18 Mezcla final de mortero.....	31
Figura 2.19 Mesa de Flujo.....	33
Figura 2.20 Apisonamiento para determinación del flujo.....	33
Figura 2.21 Resultado de Flujo.....	34
Figura 2.22 Orden de apisonado en el moldeado.....	34
Figura 2.23 Moldeado de los morteros.....	35
Figura 2.24 Morteros desmoldados.....	35
Figura 2.25 Determinación de la resistencia a la compresión.....	37

Figura 2.26 Proceso de interrupción de hidratación	38
Figura 2.27 Desecador con las muestras finales.....	39
Figura 2.28 Equipos para preparación de muestra	40
Figura 2.29 Equipo Bruker D2 Phaser	40
Figura 3.1 Curva de resistencia a la compresión de los morteros patrón.....	42
Figura 3.2 Resistencia a la compresión en MPa de los morteros patrón.	42
Figura 3.3 Difracción de Rayos X para los morteros patrón a la edad de 90 días.	43
Figura 3.4. Curva de resistencia a la compresión de los morteros patrón y morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica	44
Figura 3.5. Resistencia a la compresión en MPa de los morteros patrón y morteros con sustitución parcial de cal por ceniza volcánica.	45
Figura 3.6. Difracción de Rayos X a 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.	46
Figura 3.7 Resultados comparativos de DRX a 90 días de los morteros con sustitución del 5, 10 y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.	47
Figura 3.8. Difracción de Rayos X a 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Pifo.....	47
Figura 3.9 Resultados comparativos de DRX a 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Pifo.	48
Figura 3.10 Resultados comparativos de densidad de los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% y de los morteros patrón.....	49

RESUMEN

El presente proyecto de integración curricular abarca la elaboración de morteros compuestos por cal apagada, ceniza volcánica y arena, con el propósito de investigar y evaluar su comportamiento en aplicaciones en estructuras arqueológicas y patrimoniales. Además, se llevarán a cabo análisis de las propiedades mecánicas mediante la norma American Society for Testing and Materials (ASTM C109/C109M). La investigación se enfoca en examinar cómo la incorporación de ceniza volcánica modifica las propiedades del mortero de cal apagada, considerando el mejoramiento de la resistencia mecánica de las estructuras, la reducción de fisuras, la permeabilidad del mortero y su resistencia a la compresión.

En este estudio, el mortero seleccionado se produce a partir de cal apagada obtenida mediante la hidratación de cal viva durante un período de 60 días. La mezcla del mortero incorpora distintos porcentajes de sustitución en peso de la cal por ceniza volcánica (5%, 10% y 20%). Para evaluar sus propiedades, se realizaron ensayos en cubos de mortero de cal apagada a las edades de 28, 56 y 90 días.

PALABRAS CLAVE: Mortero, cal, ceniza volcánica, patrimonio cultural.

ABSTRACT

The current curricular integration project encompasses the development of mortars composed of slaked lime, volcanic ash, and sand, to investigate and evaluate their behavior in applications on archaeological and heritage structures. Additionally, analyses of the mechanical properties will be carried out through tests compliant with the American Society for Testing and Materials (ASTM C109/C109M). The research focuses on examining how the incorporation of volcanic ash modifies the properties of the slaked lime mortar, considering the enhancement of mechanical strength of the structures, reduction of cracks, mortar permeability, and compressive strength.

In this study, the selected mortar is produced from slaked lime obtained by hydrating quicklime over a period of 60 days. The mortar mixture incorporates different weight replacement percentages of lime with volcanic ash (5%, 10%, and 20%). To evaluate their properties, tests were conducted on cubes of slaked lime mortar at ages of 28, 56, and 90 days.

KEYWORDS: Mortar, lime, volcanic ash, cultural heritage.

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En Ecuador, entre la Costa, Sierra y Amazonía se ubican muchas edificaciones patrimoniales, tanto naturales como culturales, destacando por ejemplo la capital de los ecuatorianos, Quito, una de las ciudades más antiguas de América Latina, fue reconocida como Patrimonio Cultural de la Humanidad en 1978, su centro histórico, que es el más grande, mejor preservado y menos alterado en toda Latinoamérica, es su característica distintiva.(Terán, 2014)

No obstante, el transcurso del tiempo junto con el desgaste físico y los cambios en las ciudades ponen en riesgo tanto la integridad como la preservación de estas edificaciones patrimoniales, lo que hace necesaria una intervención en su conservación. Anualmente, numerosos fenómenos naturales potencialmente peligrosos impactan en las edificaciones, como altos niveles de radiación solar, precipitaciones intensas, inundaciones, deslizamientos de tierra y terremotos. La frecuencia y gravedad de estos eventos se dan por una amplia gama de variables que pueden ser modificados por pautas de comportamiento y la acción humana.(Revelo-Garrigó, 2011)

Las actividades humanas y sus efectos en la ciudad, motiva a explorar en mayor profundidad la respuesta mecánica de los sistemas constructivos, así como las posibles modificaciones que podrían surgir debido a estas influencias. Esta iniciativa busca proponer soluciones dirigidas a conservar las estructuras patrimoniales. Al pasar de los años, ha surgido una mayor preocupación por identificar las razones detrás del rápido deterioro de edificios de valor patrimonial, especialmente si se trata de preservar la valiosa imagen urbana en zonas centrales de las ciudades.(Revelo-Garrigó, 2011)

Los morteros de cal han sido utilizados continuamente desde la antigüedad, sobre todo en edificaciones construidas antes del siglo XX, hasta que en 1824 apareció el cemento Portland con una alta resistencia mecánica y endurecimiento rápido, reemplazando los morteros de cal por los morteros de cemento para la restauración del deterioro de las estructuras. Sin embargo, varios autores han indicado que, en la rehabilitación de edificaciones patrimoniales, el mortero de cemento presenta problemas de baja flexibilidad y cristalización de sales, e incluso en algunas edificaciones ha acelerado el proceso de deterioro, esto se produce porque los materiales originales de la construcción y el cemento no son compatibles.(Espitia & Torres, 2018)

Se debe tener en cuenta que las estructuras modernas y arqueológicas cuentan con distintas características y materiales, por ende los morteros de cal son compatibles con aglomerantes antiguos ya que les brinda mayor plasticidad y se adaptan mejor a las deformaciones (Espitia & Torres, 2018), uno de estos aglomerantes es la ceniza volcánica que tiene características puzolánicas, y es uno de los materiales más antiguos en las construcciones griegas y romanas, ayudando a los morteros de cal en problemas como la baja resistencia, endurecimiento lento y baja cohesión. (Suárez & Urgiles, 2010)

Por todo lo anteriormente mencionado, el siguiente trabajo de integración curricular se basa en la comparación de resistencia a compresión que portan los morteros de cal apagada con el aditivo ceniza volcánica con los porcentajes de sustitución del 5%, 10%, y 20% de acuerdo con las normas INEN y ASTM.

1.1 Objetivo General

Obtener cal apagada mediante un proceso de hidratación de la cal viva y elaborar morteros con ceniza volcánica en diferentes porcentajes de sustitución, y comparar sus propiedades con morteros sin adiciones.

1.2 Objetivos específicos

- Efectuar el mejor procedimiento para el apagado de la cal mediante la hidratación de cal viva.
- Fabricar morteros de cal apagada sin adiciones (morteros patrón) y morteros de cal apagada con sustitución parcial en porcentaje del 5%, 10%, y 20% de ceniza volcánica.
- Comparar y analizar la resistencia a la compresión que se obtiene para los morteros elaborados con sustitución parcial de ceniza volcánica, en un tiempo de fraguado de 28, 56 y 90 días con un patrón sin adición.
- Analizar los resultados del ensayo de difracción de rayos X y analizar los resultados que se presenten en las muestras de mortero a 90 días comparadas con los morteros patrón.
- Efectuar el análisis termogravimétrico en los morteros para verificación de las características y propiedades de estas.

1.3 Alcance

Siguiendo la información previamente expuesta y los objetivos establecidos, el proceso se llevará a cabo en dos etapas fundamentales. En primer lugar, se realizará el apagado de la cal viva a través de un proceso de hidratación por 60 días. Luego, se procederá a obtener la ceniza volcánica, previamente tamizada con el tamiz #200. En la segunda fase, se abordará la elaboración de los morteros de cal apagada, en los cuales se incorporará la ceniza volcánica en porcentajes sustitutos de 5%, 10% y 20% en peso de la cal. Posteriormente, se llevarán a cabo ensayos de laboratorio para las edades de 28, 56 y 90 días. Esta planificación persigue la obtención de resultados confiables, lo que implicará un análisis exhaustivo de cada combinación de mezclas. El objetivo último de este proyecto es establecer cuál de los porcentajes de sustitución resulta óptimo en términos de rendimiento para el mortero de cal apagada, permitiendo así una conclusión fundamentada en base a los resultados obtenidos.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Morteros

1.4.1.1 Definición

Un material ampliamente utilizado en la construcción es el mortero debido a su versatilidad. Se constituye de varios componentes principales: el material conglomerante, que generalmente es cemento, cal, u otros materiales con propiedades cementantes; el material de relleno, que generalmente es la arena; agua; y en ocasiones, aditivos.(Gutiérrez, 2003)

El conglomerante proporciona la propiedad de fraguado al mortero, lo que significa que tiene la capacidad de endurecerse y adquirir resistencia con el tiempo. La arena o agregado fino desempeña el papel de material de relleno, mejorando la trabajabilidad del mortero y proporcionando estabilidad estructural. El agua es necesaria para hidratar el cemento y permitir el proceso de fraguado.(Gutiérrez, 2003)

Además de estos componentes básicos, se pueden agregar aditivos al mortero para modificar sus propiedades. Los aditivos pueden mejorar la trabajabilidad, la resistencia, la adherencia, la impermeabilidad, entre otras características del mortero. (Gutiérrez, 2003)

1.4.1.2 Clasificación de los morteros

1.4.1.2.1 Morteros según sus elementos de composición

1.4.1.2.1.1 Morteros de Cal

El mortero de cal se caracteriza por ser una mezcla compuesta de cal hidratada, agua y arena. Se trata de un tipo de mortero utilizado principalmente en la conservación y restauración de edificios históricos. La composición de cal hidratada le confiere propiedades particulares que lo hacen más flexible y compatible con materiales antiguos.(González, 2020)

1.4.1.2.1.2 Morteros de Yeso

Los morteros de yeso están conformados por la mezcla de yeso en polvo con agua y, en algunos casos, aditivos adicionales. El yeso empleado en estas mezclas de mortero suele ser generalmente sulfato de calcio di-hidratado, o conocido como yeso parisino o yeso común. Los morteros de yeso se utilizan principalmente en aplicaciones de construcción e interiorismo, como el revestimiento de paredes y techos, la nivelación de superficies y la instalación de elementos decorativos.(Mas, 2006)

1.4.1.2.1.3 Morteros de Cemento Portland

Principalmente compuesto por cemento Portland y arena, el mortero presenta resistencias notables, la trabajabilidad de este tipo de mortero depende de la relación arena-cemento. De la misma manera que en el hormigón, las propiedades de la arena, como el contenido de materia orgánica, granulometría, forma, módulo de finura, y textura de las partículas, desempeñan una función vital en la calidad del mortero final. (Gutiérrez, 2003)

Cuando la proporción de cemento en el mortero es baja, la mezcla adquiere una textura áspera y difícil de trabajar, debido a que existe un roce entre las partículas de arena por la carencia de cemento, el cual funciona como lubricante. En contraste, un mortero con mucho cemento presenta una resistencia alta, pero tiende a sufrir una alta retracción durante el secado, lo que hace susceptible a agrietarse. (Gutiérrez, 2003)

1.4.1.2.1.4 Morteros de Cal y Cemento

Se caracterizan por tener una buena retención de agua y la capacidad de lograr resistencias altas al inicio. Dependiendo de la trabajabilidad deseada o del tipo de mortero la dosificación de agua puede variar. Si el mortero tiene una cantidad elevada de cemento, tendrá una resistencia alta y el tiempo entre la colocación y el amasado se acortará. Por otro lado, si el mortero presenta un alto contenido de cal, se obtendrá una menor resistencia y se requerirá más tiempo entre la colocación y el amasado.

Cuando se trata de morteros elaborados con cal y cemento Portland, es importante combinarlos de la mejor manera con el propósito de aprovechar las propiedades cohesivas del cemento Portland y las propiedades adhesivas de la cal. Cada aumento de cal aumentará la cantidad de agua requerida durante el mezclado para alcanzar una consistencia adecuada. (Gonzales, 2016)

1.4.1.2.2 Morteros según su fraguado

De la misma manera que el hormigón, el mortero puede ser clasificado según su tiempo de fraguado, ya sea lento, normal o rápido. Sin embargo, han surgido los llamados "morteros de larga vida" o también llamados "morteros estabilizados", que utilizan aditivos para retrasar el proceso de fraguado. Adicionalmente, se incluye un aditivo que introduce aire, mejorando así las propiedades de manipulación cuando el mortero está en su estado fresco. (Zaruma, 2018)

1.4.1.2.3 Morteros según su fluidez

Los morteros según su fluidez se clasifican como se especifica en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Morteros clasificados según su fluidez

Consistencia	Fluidez %	Penetración mm	Condiciones de colocación	Tipos de estructuras	Sistemas de colocación
Dura (seca)	80 a 100	30-45	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimientos de túneles, galerías, pantalla de cimentación y pisos	Proyección neumática con vibradores de pared
Media (plástica)	100 a 120	45-55	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas, bailejos
Fluida (húmeda)	120 a 150	55-89	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual bombeo e inyección

Fuente: Zaruma, L. A. (2018). *Mortero impermeable a base de plástico reciclado PET*

Elaborado por: Jonathan Villa

1.4.1.2.4 Morteros según su uso

Los morteros se clasifican según su uso y función en la construcción.

1.4.1.2.4.1 Mortero de pega

Se utiliza como adhesivo para unir elementos de construcción, como ladrillos, bloques, piedras u otros materiales. Los morteros de pega se caracterizan por tener una resistencia idónea para enfrentar las condiciones especiales del sistema constructivo en el que se utilizan. Deben ser capaces de absorber tanto esfuerzos de compresión como de tensión para garantizar una unión segura y duradera.

1.4.1.2.4.2 Morteros de relleno

Estos morteros se utilizan en el relleno de huecos en mampostería estructural. Su función principal es proporcionar un material de relleno que complemente y refuerce los elementos de construcción. De la misma manera que el mortero de pega, los morteros de relleno deben tener una resistencia óptima de acuerdo con las normativas y estándares de construcción aplicables.

1.4.1.2.4.3 Morteros de recubrimiento

Estos morteros se emplean con fines estéticos y de protección en las superficies de construcción. Su principal función es recubrir y embellecer las paredes y superficies exteriores o interiores. Los morteros de recubrimiento, como los enlucidos y revoques, no tienen una función estructural y, por lo tanto, no requieren una resistencia específica.

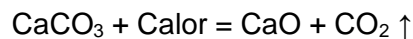
En cambio, la plasticidad del mortero de recubrimiento es crucial, ya que permite una aplicación suave y uniforme, y contribuye a la apariencia final deseada. (Zaruma, 2018)

1.4.2 Cal

1.4.2.1 Proceso de la Cal

La piedra caliza (CaCO_3) es el componente fundamental en la fabricación de la cal, la cal que se utiliza en la construcción se denomina cal hidratada, que se la obtiene a través de un proceso de quema o calcinación de la piedra caliza y una hidratación. Químicamente se representa como se muestra a continuación:

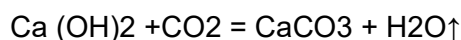
Cuando la roca caliza es triturada adecuadamente, se somete a altas temperaturas, lo que conlleva a cantidades de dióxido de carbono liberado y da como resultado la cal en su forma de cal viva (CaO), que es el residuo obtenido.



La cal viva es complicada de manejar debido a su alta capacidad de absorber agua del entorno, lo que la vuelve peligrosa si entra en contacto con la piel. Debido a esto, se lleva a cabo un proceso de hidratación para generar mayor estabilidad al material. Durante este proceso, resulta hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) donde se desprende calor, lo que se representa químicamente:



Cuando la cal hidratada se combina con el agua, se forma una pasta con un periodo de fraguado determinado. A lo largo del proceso, parte del agua se pierde por evaporación, y la mezcla comienza a ganar dióxido de carbono del entorno a medida que se seca. Con el tiempo, la mezcla se convierte gradualmente en piedra caliza. Este fenómeno se representa de la siguiente manera:



(Gomez, 2000)

1.4.2.2 Apagado de la cal

El proceso de apagado es esencial para asegurar la calidad del resultado final, las distintas clases de cal pueden comportarse de manera diferente al entrar en contacto con el agua. Es crucial supervisar cuidadosamente el proceso de apagado, ya que esta atención puede tener un retorno significativo al asegurar la producción óptima de mortero, tanto en cantidad como en calidad. Para determinar cómo apagar un nuevo lote de cal, es más seguro realizar una pequeña prueba y observar su comportamiento. En

la producción de la cal cada lote puede tener características ligeramente diferentes que en el momento en el que se realiza el proceso de apagado pueden influir en su comportamiento. Para lograr los mejores resultados se recomienda realizar una prueba a una muestra de cada lote para obtener el mejor mortero.

Para apagar la cal, colocar dos o tres trozos del tamaño de un puño en un recipiente. Si se está utilizando cal granular, agregar una cantidad equivalente. Añadir suficiente agua al recipiente para apenas cubrir la cal y observar cuánto tiempo tarda en comenzar a apagarse. Se sabrá que el proceso de apagado ha comenzado cuando algunos trozos se separen o desmoronen. Es importante utilizar agua con la misma temperatura tanto en la prueba como en el lugar donde se llevará a cabo el proceso en el campo. De esta manera, se obtendrá una referencia precisa y confiable para asegurar una adecuada preparación de la cal.

Se puede clasificar la cal en función de la velocidad de apagado: si comienza a apagarse en menos de 5 minutos, se considera de apagado rápido; si tarda entre 5 y 30 minutos, se clasifica como de apagado medio; y si el proceso de apagado lleva más de 30 minutos, se le atribuye la categoría de apagado lento.

La cal viva debe ser apagada siguiendo las indicaciones brindadas por el fabricante, si no se dispone de instrucciones específicas, se pueden seguir los siguientes procedimientos:

Para cal de apagado rápido, es importante añadir la cal al agua, y cubrir completamente toda la cal con el agua que sea necesaria, se debe revisar que cuando existe escape de vapor se debe mezclar rápidamente removiendo todo el material y agregando el agua suficiente para detener el vapor.

Para cal de apagado medio, en este proceso se debe agregar el agua a la cal cuidando de sumergir la mitad de la cal. Remover ocasionalmente si se produce escape de vapor. Añadir un poco de agua de vez en cuando si es necesario para evitar que la masilla se vuelva seca y desmenuzable. Tener cuidado de no agregar más agua de la necesaria y evitar hacerlo de forma excesiva.

Para cal de apagado lento, se debe humedecer por completo la cal y esperar hasta que la reacción comience, añadir agua cuidadosamente y de forma gradual, asegurándose de que la masa no se enfríe debido al agua fresca. No remover hasta que el proceso de apagado esté prácticamente completo. Si el ambiente está muy frío, es preferible utilizar agua caliente, pero si esto no es posible, el recipiente puede ser cubierto de alguna manera para mantener el calor. (NTE INEN 248, 2010)

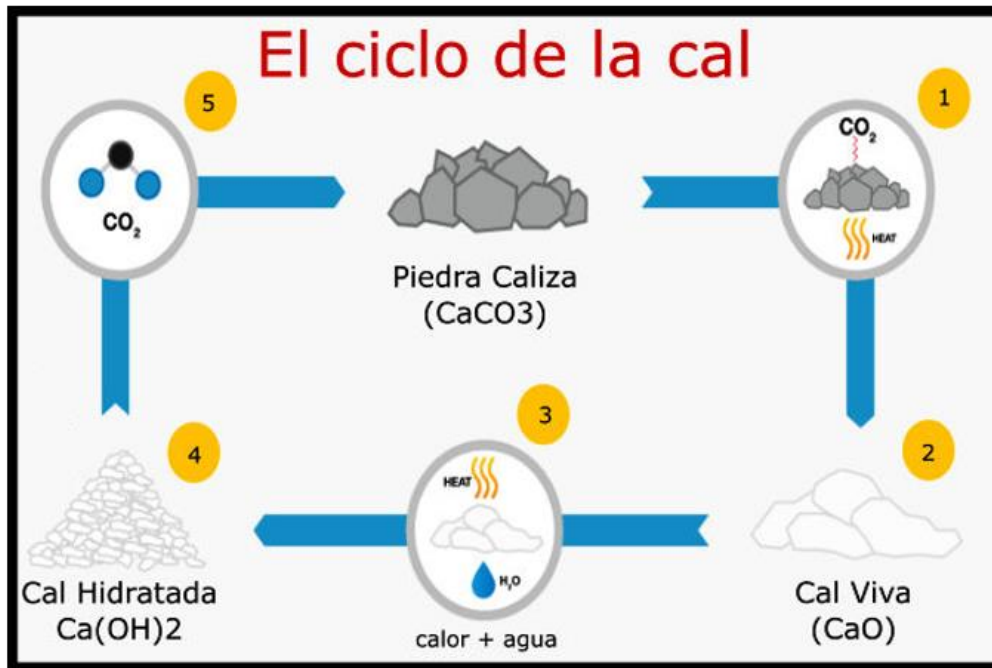


Figura 1.1 Ciclo de la cal

Fuente: (Maldonado, 2021) *Cal [Tipos] Propiedades, Usos e Importancia.*

1.4.3 Puzolana

1.4.3.1 Definición

Según la ASTM la puzolana se define como un material silíceo que, si bien carece de cualidades aglomerantes por sí mismo o en medida mínima, contiene componentes que, en presencia de agua y a temperaturas ordinarias, se combinan con la cal para formar compuestos de escasa solubilidad que presentan propiedades aglomerantes. En otras palabras, la puzolana es un material que cuando se mezcla con cal y agua, adquiere propiedades cementantes, lo que la hace útil en diversas aplicaciones de construcción e ingeniería. (Suárez & Urgiles, 2010)

1.4.3.2 Origen e Historia

La puzolana tiene su origen en las faldas del Vesubio en la localidad de Puzzuoli, donde ya se explotaba en la época romana. Con el tiempo, el término "puzolana" se extendió para incluir otros materiales que compartían propiedades de la puzolana natural, que podían utilizarse como materiales suplementarios del cemento o cal.

Fue la antigua civilización romana la que reconoció que estos materiales tenían un gran potencial, destacando la construcción realizada en el año 123 A.C, el Panteón de Roma.

Esta obra maestra, con su impresionante cúpula de 43,3 metros de diámetro, se mantuvo como la mayor cúpula construida durante 1.500 años y sigue siendo la mayor construcción donde se utilizó una mezcla de cal, puzolana y agua. En algunas ciudades europeas, la puzolana se empleó en la construcción de murallas, mezclándola con cal, lo que les confirió un aspecto más similar a modernos bunkers de hormigón que a murallas medievales.(Orrala & Gómez, 2015)

1.4.3.3 Clasificación

Existen varios tipos de puzolana, clasificadas en dos categorías principales: puzolanas naturales y puzolanas artificiales. A continuación, se presentan algunos ejemplos de cada tipo:

1.4.3.3.1 Puzolanas Naturales

- Cenizas volcánicas: Provenientes de la actividad volcánica, como las cenizas volcánicas, tobas, escoria y obsidiana.
- Tierras de diatomeas: Son rocas sedimentarias ricas en sílice, compuestas por esqueletos de diatomeas (microorganismos fotosintéticos unicelulares).
- Arcillas que han sido sometidas a altas temperaturas de manera natural, como resultado de flujos de lava o incendios.

1.4.3.3.2 Puzolanas Artificiales

- Cenizas volantes: Se generan principalmente en plantas térmicas que producen electricidad al realizar el proceso de combustión del carbón mineral.
- Escorias de fundición: Se originan en altos hornos por la fundición de aleaciones ferrosas.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: Se generan a partir de restos de ladrillos de arcilla u otros tipos de arcilla que han sido sometidos a temperaturas más altas de 800 °C.
- Cenizas de residuos agrícolas: Incluyen la ceniza proveniente del bagazo de la caña de azúcar y la ceniza derivada de la cascarilla de arroz.

Cada tipo de puzolana tiene propiedades y características específicas, pero todos comparten la capacidad de reaccionar con el agua y sobre todo con la cal, para formar compuestos con propiedades aglomerantes.(Peruzzi, 2018)

1.4.3.4 Propiedades

Las características de las puzolanas están condicionadas por su estructura interna y su composición química. El objetivo es que en la composición química de las puzolanas

contengan predominantemente los tres óxidos (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2) en una proporción mayor al 70%. A continuación, se presenta las propiedades químicas y físicas que por lo general se conforman las puzolanas. (Suárez & Urgiles, 2010)

Tabla 1.2. Propiedades físicas de las puzolanas

Ph	7
Punto de Fusión	800-900°C
Punto de Inflamabilidad	No inflamable
Aspecto Físico	Sólido
Forma	Granulado o en rocas
Colores	Rojizo-Rosado o Negro
Olor	Inodora
Solubilidad en Agua	Insoluble

Fuente: Suárez, A., & Urgiles, M. (2010). *Caracterización de la ceniza volcánica*

Elaborado por: Jonathan Villa

Tabla 1.3. Propiedades químicas de las puzolanas

Elemento	% Sobre la masa total
Dióxido de Silicio (SiO_2)	65
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	14
Óxido de Calcio (CaO)	5
Óxido Férrico (Fe_2O_3)	4
Óxido de Potasio (K_2O)	3
Otros Óxidos	9

Fuente: Suárez, A., & Urgiles, M. (2010). *Caracterización de la ceniza volcánica*

Elaborado por: Jonathan Villa

1.4.3.5 Uso de las puzolanas

Además de que las puzolanas se empleaban en morteros de cal, el uso en el cemento portland se justificó por su durabilidad y el ahorro económico que proporcionaban en proyectos subterráneos, hidráulicos y marítimos, junto con la disminución del calor liberado durante la hidratación, haciendo que fueran adecuados en trabajos de hormigón. Con el tiempo, se han vuelto más comunes los cementos puzolánicos. Por ejemplo, en Italia, se emplean extensamente como el portland en presas, hormigón de

uso general y hormigón armado en agua de mar, ya que los hormigones cal-puzolana tienen un endurecimiento muy lento.

En Holanda, Estados Unidos, Bélgica y Alemania es común añadir al hormigón materiales puzolánicos directamente en la hormigonera, para la construcción de sistemas de drenaje, canales, puentes, diques, puentes ferroviarios y más. Actualmente, la tendencia es mezclar previamente el cemento en seco con la puzolana antes de añadirlo a la mezcladora.(Soria, 1963)

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

La siguiente investigación utiliza un enfoque experimental en la metodología, debido a que se analizará cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de los morteros de cal apagada con porcentajes de sustitución parcial de ceniza volcánica, específicamente al 5%, 10% y 20% para las edades de 28, 56 y 90 días, comparando principalmente la difracción de rayos X (DRX) y la resistencia a la compresión con morteros patrón de cal apagada con arena normalizada y morteros patrón de cal apagada con arena de Pifo.

La preparación de muestras y ensayos de laboratorio se realizarán siguiendo rigurosamente los procesos y seguimientos establecidos en las normas regularizadoras y actuales ya antes mencionadas.

2.1 Materia Prima

2.1.1 Ceniza Volcánica

La ceniza volcánica utilizada en este proyecto corresponde a la ceniza volcánica de la mina Romerillos, localizada en la provincia de Cotopaxi, ubicada aproximadamente a 14,8 km del volcán. (Molina, 2021)

Las propiedades físicas y químicas de la ceniza volcánica de Romerillos se las presenta a continuación:

Tabla 2.1. Propiedades de la ceniza volcánica.

Análisis químico y físico		
Contenido de Humedad	0,1	%
Pérdida por Ignición	0,6	%
Álcalis disponibles	0,008	%
Concentración de Amoníaco	4,9	mg/kg
Densidad	2,54	g/cm ³

Fuente: Molina, T. (2021). Análisis comparativo de las cenizas volcánicas.

Elaborado por: Jonathan Villa

Tabla 2.2. Contenido de óxidos en la ceniza volcánica.

Contenido de óxidos		
SiO ₂	52,31	%
Fe ₂ O ₃	7,81	%
Al ₂ O ₃	9,57	%
TiO ₂	0,54	%
CaO	16,78	%
MgO	10,1	%
Na ₂ O	2,15	%
K ₂ O	0,59	%
SO ₃	0,15	%

Fuente: Molina, T. (2021). Análisis comparativo de las cenizas volcánicas.

Elaborado por: Jonathan Villa

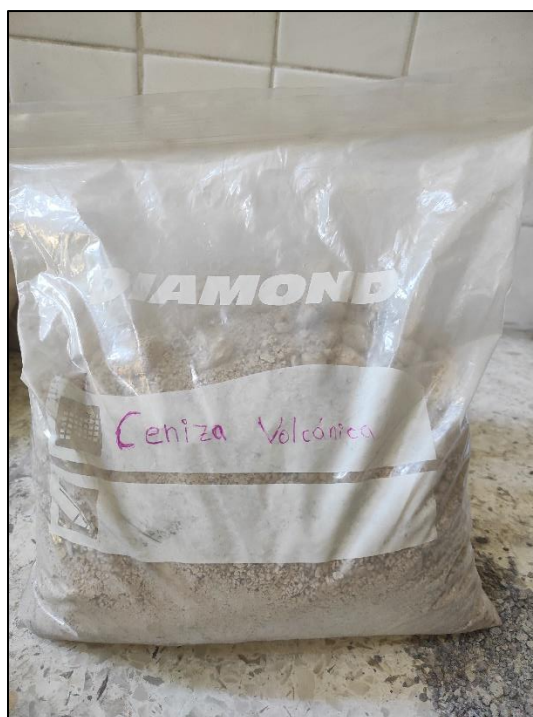


Figura 2.1 Ceniza Volcánica de Romerillos.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.1.2 Arena normalizada

Las propiedades y características de la arena normalizada empleada en este proyecto son proporcionadas por U.S Silica Company, que ofrece los datos técnicos correspondiente a la arena de sílice 20-30. La distribución granulométrica del agregado se muestra en la Tabla 2.3, mientras que las propiedades fundamentales se detallan en la Tabla 2.4 y las características químicas se encuentran en la Tabla 2.5 (León, 2022)

Tabla 2.3. Granulometría de la arena normalizada.

Tamiz		Valores Estándar		
		% Retenido		% Pasante
N°	mm	Individual	Acumulado	Acumulado
16	1,18	0	0	100
20	0,85	1	1	99
30	0,6	97	98	2
Bandeja		2	100	0

Fuente: León, Erika. (2022).

Elaborado por: Jonathan Villa

Tabla 2.4. Propiedades básicas de la arena normalizada.

Ph:	7
Color:	Blanco
Mineral:	Cuarzo
Dureza (Mohs)	7
Punto de fusión (°F)	3100
Gravedad específica	2,65
Forma de la partícula	Redonda

Fuente: León, Erika, (2022).

Elaborado por: Jonathan Villa

Tabla 2.5. Propiedades químicas de la arena normalizada.

Análisis Químico, %		
SiO ₂	óxido de silicio	99,8
Fe ₂ O ₃	óxido de hierro	0,02
Al ₂ O ₃	óxido de aluminio	0,06
TiO ₂	óxido de titanio	0,01
CaO	óxido de calcio	<0,01
MgO	óxido de magnesio	<0,02
Na ₂ O	óxido de sodio	<0,03
K ₂ O	óxido de potasio	<0,04
LOI	pérdida por ignición	0,1

Fuente: León, Erika. (2022).

Elaborado por: Jonathan Villa

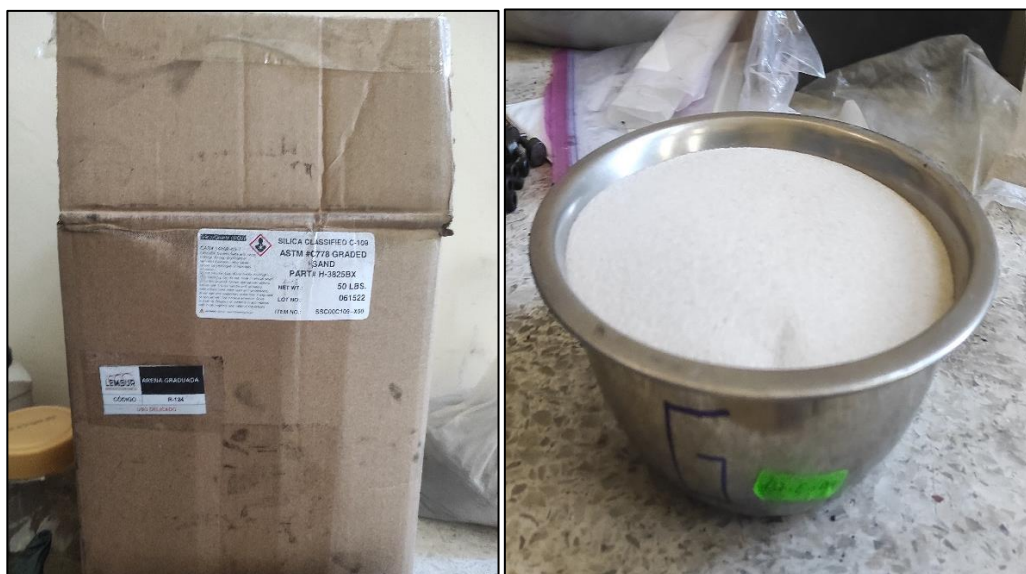


Figura 2.2 Arena normalizada de Ottawa.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.1.3 Arena

La arena utilizada en este proyecto corresponde a la arena proveniente de la cantera de la Parroquia de Pifo, la cual se ha comprobado que posee excelentes características y propiedades siendo utilizada la arena por empresas de renombre como Holcim.

Para comprobar que la arena cumple con lo adecuado para el proyecto, se realizó la caracterización de la arena mediante ensayos de laboratorio mencionado en el apartado 2.3 obteniendo lo presentado en la Tabla 2.6

Tabla 2.6. Propiedades de la arena de Pifo

Caracterización de la arena de Pifo	
Densidad relativa seca	2,38
Densidad relativa S.S.S	2,46
Densidad relativa aparente	2,59
Absorción de agua (%)	3,35
Densidad seca suelta(kg/m3)	1545
Contenido de vacíos (%)	35
Densidad seca compactada (kg/m3)	1694
Contenido de vacíos (%)	29
Impurezas	0

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.3 Arena de Pifo.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.1.4 Cal

La cal viva utilizada para luego realizar el respectivo apagado, la proporcionó el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC), siendo extraída desde la provincia de Azuay conteniendo un nivel de pureza del 95%, siendo apta de acuerdo con la composición química requerida por la (NTE INEN 248, 2010) como se presenta en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Composición química de la cal viva.

	Cal de calcio	Cal de magnesio
Óxido de Calcio, % min	75	
Óxido de magnesio, % min		20
Óxido de calcio y magnesio, %min	95	95
Sílice, alúmina y óxido de hierro, %máx	5	5
Dióxido de carbono, %máx:		
Si la muestra es tomada en el lugar de fabricación	3	3
Si la muestra es tomada en cualquier otro lugar	10	10

Fuente: NTE INEN 248, 2010

Elaborado por: Jonathan Villa

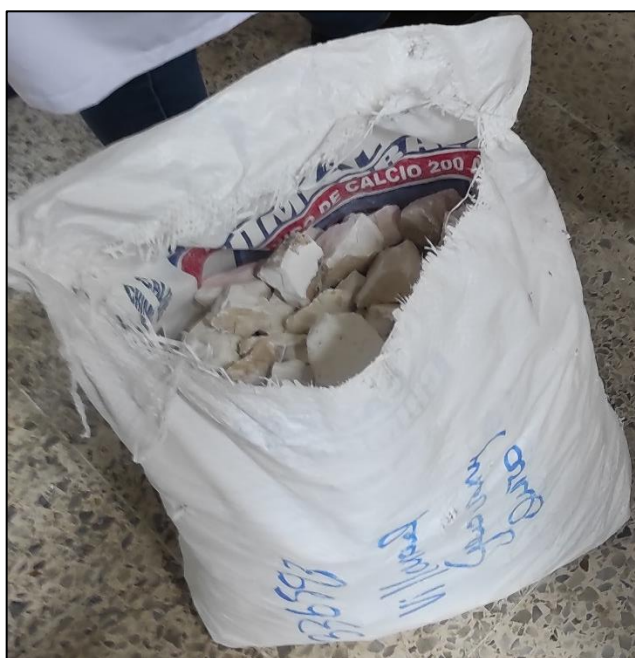


Figura 2.4 Cal Viva.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.1.5 Agua

El agua requerida para el proyecto es agua potable para consumo humano emitida por EPMAPS, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento que cumpla con los requisitos de la norma (NTE INEN 1108, 2014).

2.2 Preparación de muestras.

Las instalaciones en las cuales se realizó la preparación de muestras y los respectivos ensayos se presentan a continuación:

- Laboratorio de ensayo de materiales, mecánica de suelos y rocas (LEMSUR).
- Centro de investigaciones y control ambiental (CICAM).
- Laboratorio de materia condensada, Departamento de Física.

2.2.1 Preparación de la ceniza volcánica

Dado que la ceniza volcánica necesita ser muy fina para realizar los demás ensayos, se procede a realizar el siguiente proceso de preparación:

Equipos

- Mortero
- Pistilo
- Tamiz N°200
- Bandeja de tamices
- Recipientes
- Balanza
- Fundas Ziploc

Procedimiento

- Colocar la ceniza volcánica en el mortero limpio y seco.
- Triturar la muestra realizando golpes fuertes con el Pistilo, intentando dejar la muestra lo más fina posible.
- Tamizar la muestra triturada por el Tamiz N°200.
- Pesar y guardar en las fundas ziploc, el material por el Tamiz N°200.

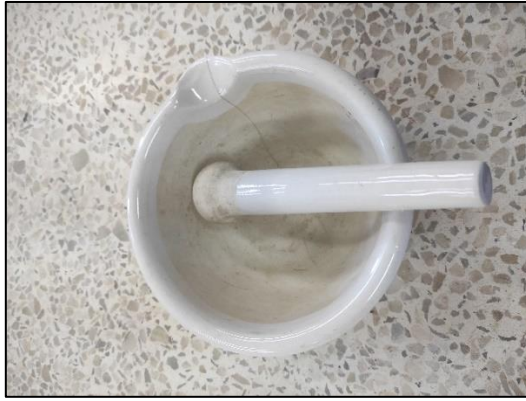


Figura 2.5 Mortero y Pistilo para trituración.

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.6 Tamiz N°200

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.7 Ceniza Volcánica tamizada.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.2.2 Apagado de la cal

El procedimiento para el apagado de la cal corresponde para cal de apagado medio mencionado en el apartado 1.4.2.2, donde se efectúa el proceso descrito a continuación:

Materiales utilizados

- Tanque metálico
- Palo de madera
- Baldes
- Cal viva
- Agua

Procedimiento

- Verter la cal en un tanque metálico con un espesor considerable ya que el proceso elevará la temperatura y podrá romper el tanque.



Figura 2.8 Preparación de cal para el apagado.

Elaborado por: Jonathan Villa

- Agregar agua al tanque con una proporción de 2:1, es decir, 2 volúmenes de agua por 1 volumen de cal.



Figura 2.9 Vertido de agua en la cal.

Elaborado por: Jonathan Villa

- Tapar el recipiente para evitar algún incidente en el proceso de la reacción.
- Una vez culminada la reacción, con el palo de madera se mezclará con el objetivo de deshacer grumos de cal que no pudo reaccionar por el gran tamaño.



Figura 2.10 Mezclado de la cal.

Elaborado por: Jonathan Villa

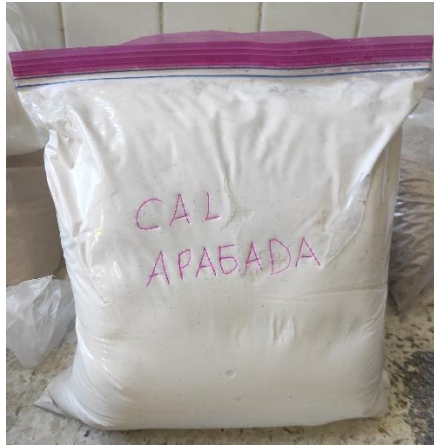


Figura 2.11 Cal apagada.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.3 Ensayos en la arena

2.3.1 Peso específico y absorción de agregados

El proceso para evaluar la gravedad específica y absorción de agregados se realizó siguiendo lo especificado por la norma (ASTM C127, 2017), la cual especifica lo siguiente:

Equipos

- Picnómetro
- Molde trono-cónico
- Bomba de vacío
- Apisonador
- Agua
- Balanza
- Bandejas
- Horno
- Embudo

Procedimiento

- Colocar la arena en un recipiente y llenar con agua hasta cubrirla por completo, lavarla con el objetivo de eliminar el polvo u otros revestimientos de la superficie, y proceder a saturar el agregado, se dejará sumergida la arena por 24 horas en agua.

- Una vez saturado el agregado, poner a secar en una bandeja una cantidad mayor a 500 gramos, para acelerar el proceso utilizar un horno.
- Comprobar si se ha alcanzado el estado de superficie saturada seca (S.S.S.), rellenando el tronco-cónico con el agregado y aplicando 25 golpes con el apisonador, dejando caer desde una altura de ± 3.5 cm.
- Eliminar los excesos y limpiar la parte externa del molde, con cuidado, retirar el molde y verificar la condición S.S.S. de la arena, observando si se desmorona ligeramente una vez retirado el molde, si no se desmorona, se procede a secar la muestra nuevamente hasta alcanzar esta condición.
- Una vez alcanzada la condición S.S.S., pesar entre 400 y 500 gramos de muestra (P1).
- Pesar el picnómetro lleno con agua hasta la marca de aforo (P2).
- Introducir la muestra en estado S.S.S. en el picnómetro, usando un embudo, junto con 200 ml de agua.
- Eliminar el aire atrapado en la arena del picnómetro con la ayuda de la bomba de vacíos.
- Llenar el picnómetro con agua hasta la marca de aforo, asegurándose de evitar la entrada de aire.
- Pesar el picnómetro lleno con agua y arena hasta la marca de aforo (P3).
- Transferir el contenido del picnómetro a un recipiente y permitir que se seque a una temperatura de 110°C durante un período de al menos 24 horas.
- Pesar el material seco excluyendo el recipiente (P4).

Cálculos

$$P_E = \frac{P_4}{P_1 + P_2 - P_3}$$

$$\delta_{SSS} = \frac{P_1}{P_1 + P_2 - P_3}$$

$$P_{AP} = \frac{P_4}{P_4 + P_2 - P_3}$$

$$\%Abs = \frac{P_1 - P_4}{P_4} \cdot 100\%$$

Donde:

P1: Peso del agregado en estado S.S.S., en gr.

P2: Peso del recipiente cuando está lleno con agua hasta la marca de aforo, en gr.

P3: Peso del recipiente lleno de agua y agregado hasta la marca de aforo, en gr.

P4: Peso seco del agregado, en gr.

P_E: Peso específico de la arena, en gr/cm³.

P_{SSS}: Peso específico de la arena en estado SSS en, gr/cm³.

P_{AP}: Peso específico aparente del agregado fino, en gr/cm³.

%Abs: Absorción, en %.



Figura 2.12 Equipos utilizados en el ensayo de peso específico y absorción de agregados.

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.13 Bomba de vacíos.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.3.2 Densidad aparente

La densidad aparente para la arena se la obtendrá siguiendo el proceso descrito por la norma (ASTM C29/C29M, 2017), mencionando lo siguiente:

Equipos

- Molde cilíndrico
- Barra de compactación
- Balanza
- Flexómetro
- Pala
- Bandeja

Procedimiento

Densidad Suelta

- Calcular el volumen del molde cilíndrico (V).
- Colocar el material en un horno para secar a una temperatura constante de 110°C por al menos 24 horas.
- Medir el peso del recipiente vacío (P1).
- Llenar delicadamente el molde con el material, eliminar cualquier exceso y nivelar la superficie.
- Registrar el peso del molde con el material dispuesto sin compactar (P2).

Densidad Compactada

- Calcular el volumen del molde cilíndrico (V).
- Colocar el material en un horno para secar a una temperatura constante de 110°C por al menos 24 horas.
- Medir el peso del recipiente vacío (P1).
- Verter el material en el molde en 3 capas de igual espesor, compactando cada capa mediante 25 aplicaciones de la barra de compactación, retirando el exceso y nivelando la superficie.
- Registrar el peso del molde con el material dispuesto sin compactar (P2).

Cálculos

La densidad aparente suelta o compactada se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\delta_A = \frac{P_2 - P_1}{V}$$

Donde:

δ_A : Densidad aparente de la arena, en gr/cm^3 .

P1: Peso del molde, en gr.

P2: Peso del molde con material, en gr.

V: Volumen del molde, en cm^3 .



Figura 2.14 Equipo para ensayo de densidad aparente.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.3.3 Análisis Granulométrico

La norma con la cual se realiza el análisis granulométrico en agregados es la (ASTM C136/C136M, 2020), describiendo lo siguiente:

Equipos

- Serie de tamices de Taylor (3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100)
- Tamizadora automática
- Balanza
- Bandejas
- Pala
- Horno

Procedimiento

- Colocar en el horno la arena a 110°C por aproximadamente 24 horas.

- Pesar la muestra seca inicial, que debería ser de alrededor de 400-500 gramos.
- Colocar los tamices en la tamizadora organizándolos de menor a mayor abertura, comenzando desde la bandeja de recolección hasta el tamiz con la abertura más grande.
- Tamizar la arena por un tiempo de 5 a 10 minutos.
- Retirar el conjunto de tamices de la tamizadora y pesar el material atrapado en cada uno de ellos.

Cálculos

Utilizando los pesos que quedan retenidos en los tamices, se calcula los porcentajes retenidos, retenidos acumulados y porcentaje que pasa, lo que nos permite obtener la curva granulométrica.

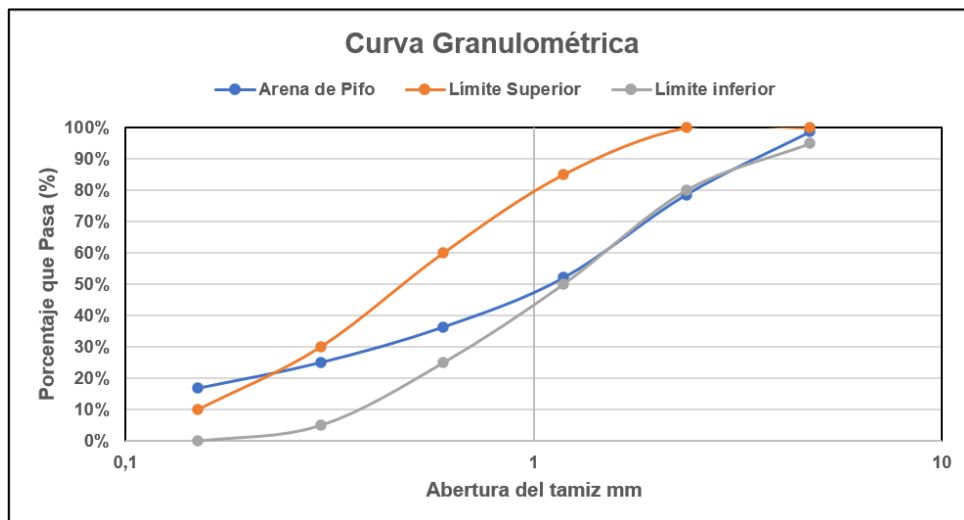


Figura 2.15 Granulometría de la arena de Pifo.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.3.4 Contenido Orgánico

Para la determinación del contenido orgánico en agregados finos, se realizará el ensayo de colorimetría especificado en la norma (ASTM C40/C40M, 2020), detallando lo siguiente:

Equipos

- Recipientes de vidrio de 12 onzas
- Reactivo estandarizado

- Placa de Gardner

Procedimiento

- Elaborar el reactivo como una solución de hidróxido de sodio al 3% utilizando agua destilada.
- Verter en un recipiente de vidrio el agregado fino hasta alcanzar 4.5 onzas (130 ml).
- Añadir el reactivo al recipiente de vidrio hasta llegar a un volumen total de 200 ml.
- Cerrar el recipiente y agitar vigorosamente antes de dejarlo reposar durante 24 horas.
- Pasadas las 24 horas, observar el color del líquido con la escala de color de Gardner utilizando la muestra en el recipiente.



Figura 2.16 Contenido Orgánico de la arena de Pifo

Elaborado por: Jonathan Villa

2.4 Elaboración de morteros

2.4.1 Dosificación

Para la elaboración de los morteros patrón y los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica se emplearán las cantidades mencionadas en la Tabla 2.8, cabe recalcar que el agua colocada en los morteros es con el propósito de obtener el flujo establecido por la norma (NTE INEN 488, 2009), es decir, un flujo de $100 \pm 5\%$.

Tabla 2.8 Dosificación de los morteros

ESPÉCIMEN	ARENA	CAL	AGUA	CENIZA VOLCÁNICA
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
PATRÓN OTAWA	1375	500	390	0
PATRÓN PIFO	1375	500	440	0
CV 5%	1375	475	433	25
CV 10%	1375	450	416	50
CV 20%	1375	400	397	100

Elaborado por: Jonathan Villa

2.4.2 Preparación de la mezcla

La norma con la cual se elaborará el proceso de preparación de la mezcla es la (NTE INEN 155, 2009), la cual se encuentra vigente y estipula lo siguiente:

Equipos

- Mezcladora
- Tazón de mezclado
- Paleta
- Espátula
- Balanza

Materiales

- Cal apagada
- Arena
- Agua
- Ceniza Volcánica

Procedimiento

- Armar la mezcladora colocando el tazón y la paleta, ambas deben estar secas.
- Verter completamente el agua en el recipiente y añadir la cal apagada. En caso de utilizar ceniza volcánica como sustituto parcial de la cal, agregar la ceniza junto con la cal.
- Iniciar la mezcladora a una baja velocidad de 140 ± 5 r/min durante un tiempo de 30 segundos, luego añadir la arena a la misma velocidad por otros 30 segundos. Después, cambiar a una velocidad intermedia de 285 ± 10 r/min por 30 segundos.

- Una vez finalizado este proceso, la máquina detendrá su mezclado durante 90 segundos, en los primeros 15 segundos, utilizar una espátula para raspar rápidamente el mortero que puede quedarse en los lados del recipiente.
- Por último, mezclar por un tiempo de 1 minuto a una velocidad intermedia (285 ± 10 r/min).



Figura 2.17 Mezcladora Controls.

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.18 Mezcla final de mortero

Elaborado por: Jonathan Villa

2.4.3 Obtención del flujo

La metodología para obtener el flujo en morteros se llevará a cabo siguiendo las directrices establecidas en la norma (NTE INEN 2502, 2009), la cual detalla:

Equipos

- Molde y mesa de flujo
- Flexómetro
- Apisonador manual
- Espátulas

Procedimiento

- Secar después de limpiar la mesa de flujo para insertar el molde en la mitad.
- Agregar el mortero en el molde, primero una capa con un espesor de 25 mm y compactar 20 veces utilizando el apisonador, aplicando una presión adecuada para asegurar el llenado del molde uniformemente.
- Llenar con mortero el molde y compactar de acuerdo con las instrucciones establecidas para la primera capa, enrasar con el filo de la espátula moviéndolo de forma oscilante a lo largo del borde del molde.
- Limpiar la superficie del molde y retirarlo luego de 60 segundos de haber culminado el llenado.
- Finalmente, en un lapso de 15 segundos dejar caer la mesa 25 veces, y medir con el flexómetro por lo menos 4 diámetros para obtener el flujo en porcentaje.

Cálculos

$$\%f = \frac{D_f - D_m}{D_m} * 100$$

Donde:

D_f: diámetro promedio de la mezcla final

D_m: diámetro del molde de flujo

%f: flujo en porcentaje



Figura 2.19 Mesa de Flujo
Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.20 Apisonamiento para determinación del flujo.
Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.21 Resultado de Flujo

Elaborado por: Jonathan Villa

2.4.4 Elaboración de los cubos

Equipos

- Moldes con 3 compartimientos para especímenes cúbicos de 50 mm.
- Compactador o apisonador manual
- Espátula

Procedimiento

- Armar y aceitar los moldes cúbicos previo al mezclado final, ya que el proceso de elaboración se debe realizar en los primeros 2.5 minutos de haber completado el mezclado.
- Agregar una capa de la mezcla en el molde con una altura aproximada de 25 mm en los 3 compartimientos y compactar con el apisonador en cada compartimiento, en 2 rondas, cada ronda de 8 golpes, repartiendo los golpes como se aprecia en la Figura 2.22.

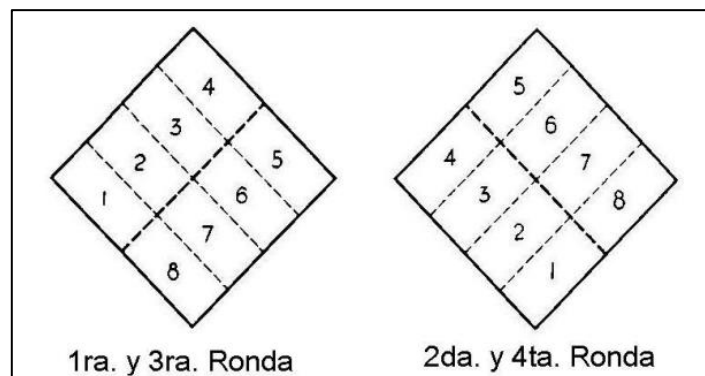


Figura 2.22 Orden de apisonado en el moldeado.

Fuente: NTE INEN 488, 2009

- Luego de terminar de compactar la primera capa en cada uno de los compartimientos, llenar completamente con la mezcla y repetir el proceso de compactación.
- Ajustar la cantidad de mezcla en el molde con la espátula, enrasando en sus dos direcciones.
- Separar los especímenes cúbicos del molde al cumplir los 8 días y esperar que cumpla con las edades.



Figura 2.23 Moldeado de los morteros

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.24 Morteros desmoldados.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.5 Ensayo de resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión se seguirá el proceso descrito en la norma (NTE INEN 488, 2009), que establece lo siguiente:

Equipos

- Máquina de compresión
- Balanza
- Calibrador

Procedimiento

- Tomar las dimensiones de una cara cualquiera del espécimen cúbico a excepción de la cara que quedó descubierta en el molde.
- Medir la altura del cubo y, por último, pesar la muestra.
- En la máquina de compresión ingresar el espécimen en la mitad de la placa, poniendo en contacto las dos caras planas que se midió previamente, la velocidad de compresión a utilizar es 900N/s y finalmente se obtiene la carga máxima en kN.

Cálculos

La ecuación para obtener la resistencia a compresión se presenta a continuación:

$$f'c = \frac{C}{A}$$

Donde:

f'c: Resistencia a la compresión en MPa.

C: Carga máxima de la falla, en N.

A: Área de la sección transversal del cubo a la que se aplica la carga, en mm²

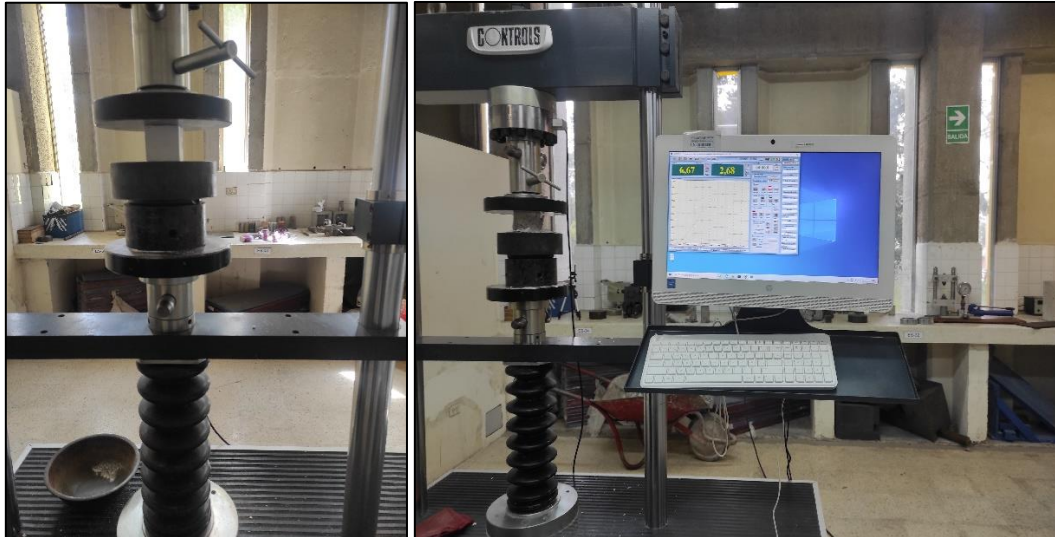


Figura 2.25 Determinación de la resistencia a la compresión.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.6 Interrupción de la hidratación de los morteros

Para interrumpir la hidratación en los morteros se utilizará la recomendación RILEM TC-238 SCM (Snellings et al., 2018), la cual establece lo siguiente:

Equipos

- Mortero para triturar
- Tamiz N°200
- Vaso de precipitación
- Filtro Büchner, matraz + bomba de vacío
- Campana extractora
- Horno
- Balanza
- Vidrio de reloj
- Mascarilla para gases

Materiales

- Restos de los especímenes cúbicos después del ensayo a compresión.
- Alcohol isopropílico
- Éter dietílico
- Papel de filtro

Procedimiento

Preparación de la muestra

- En el mortero para triturar se debe colocar la muestra restante del ensayo de compresión, teniendo previamente limpio y seco el equipo evitando la contaminación de la muestra.
- Triturar en el mortero hasta conseguir pasar el tamiz N°200, cabe recalcar que la muestra a triturar debe ser solo del núcleo y no los bordes superficiales.
- Verter lo que pase el tamiz N°200 en el vaso de precipitación para posterior a ello pesar 10 gramos.

Interrupción de la hidratación

- En la campana extractora realizar la instalación del matraz y filtro Büchner con la bomba de vacío.
- Fijar el papel filtro en el filtro Büchner, vertiendo poco isopropanol para asegurar la adecuada colocación y para evitar fugas.
- Sumergir los 10 gramos anteriormente obtenidos en 100 mL de isopropanol por 15 min, después, filtrar el isopropanol agitando y vertiendo la solución sobre el filtro.
- Una vez filtrada toda la solución enjuagar el recipiente con 20 mL de isopropanol y luego enjuagar con 20 mL de éter dietílico, como precaución se debe usar la mascarilla de gases debido a los gases altamente tóxicos.
- Finalmente se debe retirar el residuo del papel filtro y transferir al vidrio de reloj, dejando secar $8 \text{ min} \pm 30 \text{ segundos}$ en el horno a $40 \text{ }^\circ\text{C}$, por último, guardar las muestras en el desecador hasta cuando se vaya a realizar el ensayo de DRX.



Figura 2.26 Proceso de interrupción de hidratación

Elaborado por: Jonathan Villa



Figura 2.27 Desecador con las muestras finales.

Elaborado por: Jonathan Villa

2.7 Difracción de rayos x

El proceso para determinar la estructura mineralógica y cristalina mediante la técnica de Difracción de Rayos X se presenta a continuación:

Equipos

- Porta muestra estándar: 8,5 mm de altura, recepción de la muestra diámetro 25 mm, material PMMA
- Portaobjetos
- Cucharilla química con espátula
- Equipo Bruker D2 Phaser con detector LYNXEYE XE-T

Procedimiento

- Retirar la muestra del desecador anteriormente mencionado, y con la cucharilla se precede a llenar cuidadosamente el porta muestra, enrasar con la espátula la parte superior, hasta que quede completamente homogénea.
- Aplastar con el dedo índice el portaobjetos sobre el porta muestra, y mover de arriba hacia abajo hasta obtener el resultado deseado, retirar el portaobjetos e ingresar la muestra en el equipo.
- Ingresar los siguientes datos en el equipo de Difracción de Rayos X:
 - $2\theta = 10^\circ - 50^\circ$, incremento 0.02°
 - Tiempo de paso: 0.25 s/paso
 - Apertura del detector (PSD Opening): 5°

- En la obtención del difractograma no se considera la rotación de la muestra



Figura 2.28 Equipos para preparación de muestra

Elaborado por: Jonathan Villa

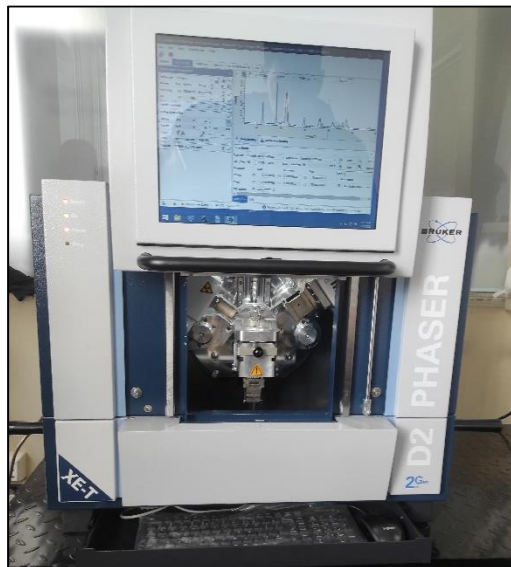


Figura 2.29 Equipo Bruker D2 Phaser

Elaborado por: Jonathan Villa

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados y Análisis

Se presenta un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de cada uno de los morteros fabricados.

3.1.1 Resultados de morteros patrón

3.1.1.1 Flujo morteros patrón

Se obtuvo el flujo del mortero patrón de cal apagada con arena normalizada y del mortero patrón de cal apagada con arena de Pifo como se muestra en la Tabla 3.1, teniendo como resultado 110% para ambos casos, encontrándose dentro del rango permitido por la norma NTE INEN 488.

Tabla 3.1 Obtención del flujo de los morteros patrón.

OBTENCIÓN DEL FLUJO			
Patrón Ottawa	D INICIAL	100	mm
	DF PROMEDIO	210	mm
	%	110	
Patrón Pifo	D INICIAL	100	mm
	DF PROMEDIO	210	mm
	%	110	

Elaborado por: Jonathan Villa

3.1.1.2 Resistencia a compresión

Se determinó la resistencia a la compresión de los morteros patrón para las edades de 28, 56 y 90 días, en la Tabla 3.2 se presenta el promedio obtenido para cada espécimen.

Tabla 3.2 Resistencia a la compresión de los morteros patrón.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPA			
ESPECÍMEN	28 días	56 días	90 días
PATRÓN OTTAWA	0,48	0,59	0,57
PATRÓN PIFO	0,51	0,67	0,84

Elaborado por: Jonathan Villa

A continuación, se presenta mediante una gráfica los resultados de la Tabla 3.2 en la Figura 3.1, donde se aprecia la variación de la resistencia a la compresión de los morteros patrón en el transcurso del tiempo. Se puede apreciar que los morteros patrón

a los 28 días tiene una diferencia mucho menor que a los 90 días, donde se produce una diferencia de 32% en cuanto a la resistencia a la compresión, siendo mayor el mortero patrón Pifo con 0,84 MPa.

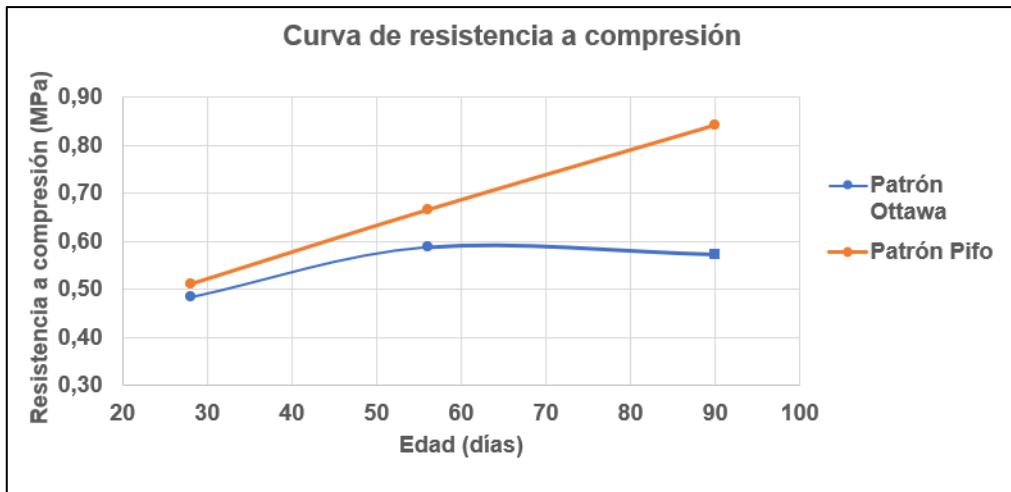


Figura 3.1 Curva de resistencia a la compresión de los morteros patrón.

Elaborado por: Jonathan Villa

En la Figura 3.2 se observa una clara diferencia de resistencia a la compresión entre los morteros patrón en las distintas edades, y se corrobora que el mortero patrón Pifo tiene una resistencia a compresión mayor que el mortero patrón Ottawa para todas las edades.

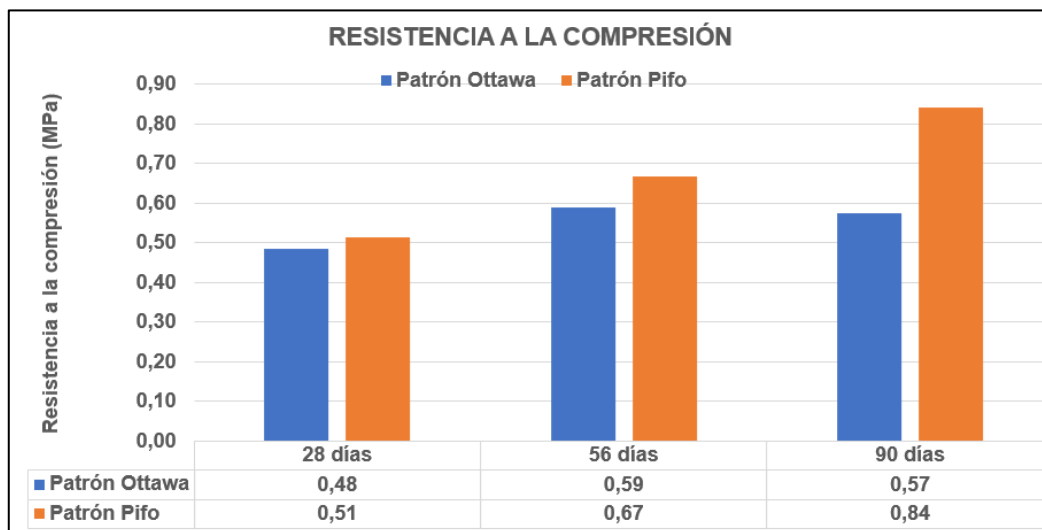


Figura 3.2 Resistencia a la compresión en MPa de los morteros patrón.

Elaborado por: Jonathan Villa

3.1.1.3 Difracción de Rayos X

A continuación, se presenta en la Figura 3.3 la Difracción de Rayos X para la edad de 90 días de los morteros patrón Pifo y Ottawa, donde se puede observar que los valores de intensidad del compuesto portlandita son mayores en el Patrón Ottawa, de igual manera sucede con los valores de intensidad de la Calcita. Sin embargo, el Patrón Pifo posee mayores valores de intensidad de Cuarzo.

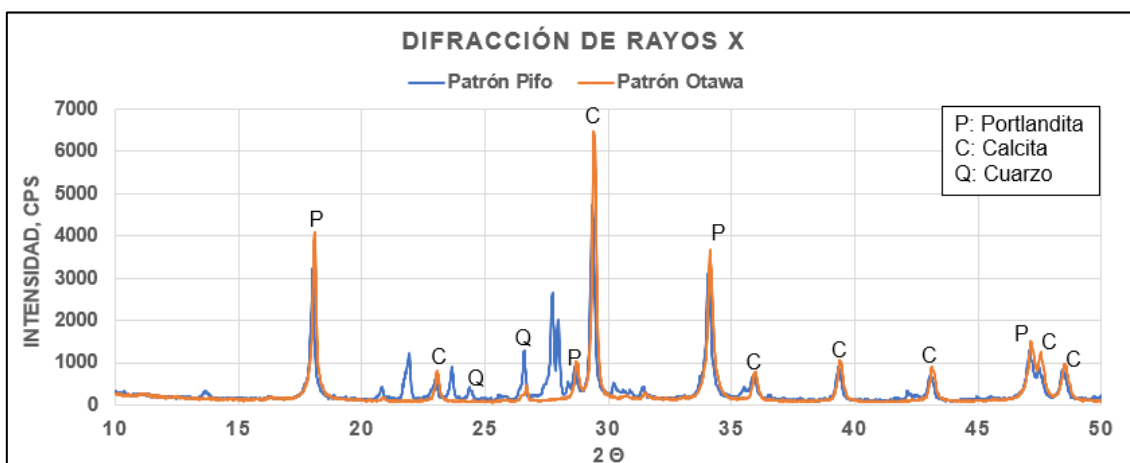


Figura 3.3 Difracción de Rayos X para los morteros patrón a la edad de 90 días.

Elaborado por: Jonathan Villa

3.1.2 Resultados de morteros de cal y arena con sustitución de ceniza volcánica en porcentajes de 5%, 10% y 20% de reemplazo en peso de cal.

3.1.2.1 Flujo morteros con sustitución

Se obtuvo el flujo de los morteros con ceniza volcánica con sustitución parcial del 5%, 10% y 20% de cal como se tiene en la Tabla 3.3, los resultados de flujo se sitúan en el rango permitido por la norma NTE INEN 488 que es $110 \pm 5\%$.

Tabla 3.3 Obtención del flujo de morteros con ceniza volcánica con sustitución parcial de 5%, 10% y 20%

OBTENCIÓN DEL FLUJO			
ESPÉCIMEN	D inicial (mm)	Df promedio (mm)	%
Ceniza Volcánica 5%	100	208,3	108,3
Ceniza Volcánica 10%	100	208,7	108,7
Ceniza Volcánica 20%	100	207,7	107,7

Elaborado por: Jonathan Villa

3.1.2.2 Resistencia a la compresión

En los morteros con ceniza volcánica se determinó la resistencia a compresión para las edades de 28, 56 y 90 días, como se presenta en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Resistencia a la compresión de los morteros con ceniza volcánica con sustitución parcial de 5%, 10% y 20%

ESPÉCIMEN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPa		
	28 días	56 días	90 días
PATRÓN OTAWA	0,48	0,59	0,57
PATRÓN PIFO	0,51	0,67	0,84
CV 5%	0,50	0,58	0,78
CV 10%	0,58	0,70	0,82
CV 20%	0,72	0,78	0,98

Elaborado por: Jonathan Villa

Como se puede apreciar en la Figura 3.4, los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica tienen mayores valores de resistencia a la compresión que los morteros patrón, esto se da para cada edad en la que fueron ensayados los especímenes. Hay que tener en cuenta que las curvas de resistencia a la compresión de los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica se asemejan con la curva del mortero patrón Pifo debido a que tienen una tendencia lineal de crecimiento, sin embargo, la curva del patrón Ottawa es diferente, ya que contrario a las demás a partir de los 56 días su resistencia va disminuyendo.

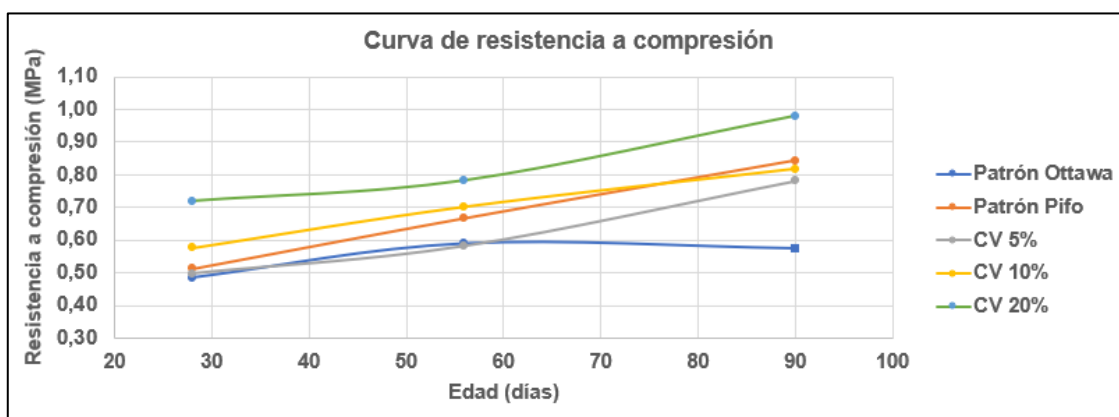


Figura 3.4. Curva de resistencia a la compresión de los morteros patrón y morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica

Elaborado por: Jonathan Villa

Además, en la Figura 3.4 se aprecia que la resistencia a la compresión tanto en los morteros patrón Pifo como en los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica aumenta conforme más edad tengan los especímenes, lo contrario sucede con el patrón

Ottawa que pasa de tener una resistencia a la compresión de 0.59 MPa en los 56 días a 0.57 MPa en los 90 días.

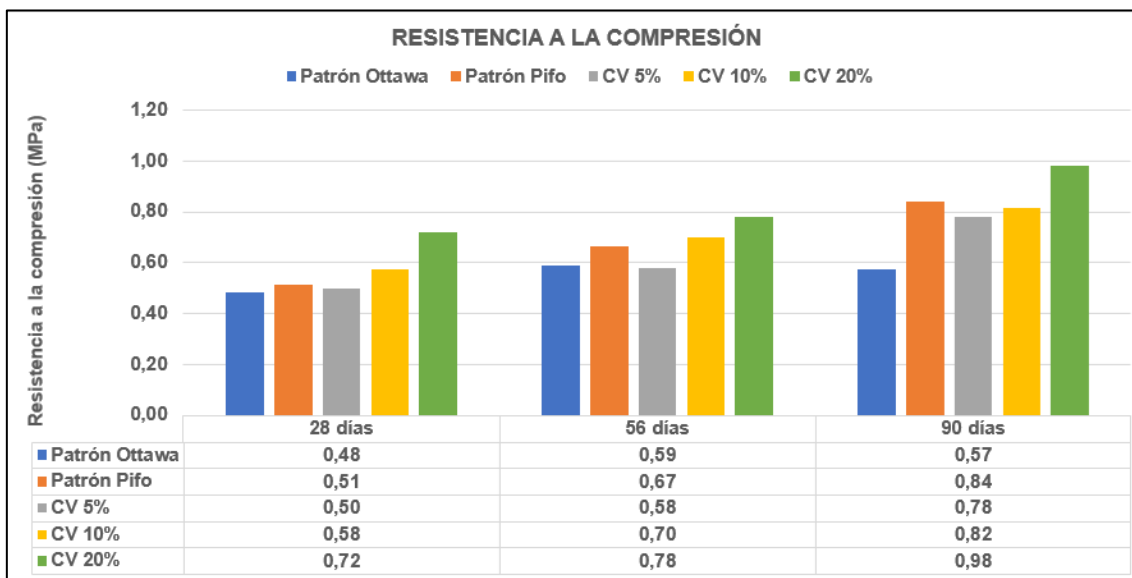


Figura 3.5. Resistencia a la compresión en MPa de los morteros patrón y morteros con sustitución parcial de cal por ceniza volcánica.

Elaborado por: Jonathan Villa

En la Figura 3.5 se evidencia que la resistencia a la compresión de los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica aumenta acorde al incremento de porcentaje de sustitución, es decir, a 5% se obtiene una baja resistencia y al 20% se obtiene una mayor resistencia a la compresión, esto sucede en todas las edades. Por otro lado, en comparación con los morteros patrón Pifo, la resistencia de los morteros con sustitución del 5% de ceniza volcánica es menor para todas las edades, en cambio los morteros con sustitución del 10% es menor para los 28 y 56 días y mayor a los 90 días, y para los morteros con sustitución del 20% la resistencia a la compresión es mayor para todas las edades.

3.1.2.3 Difracción de Rayos X

Las gráficas presentadas a continuación corresponden a la Difracción de Rayos X a la edad de 90 días de las muestras de morteros con sustitución parcial de 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y a las muestras de morteros patrón.

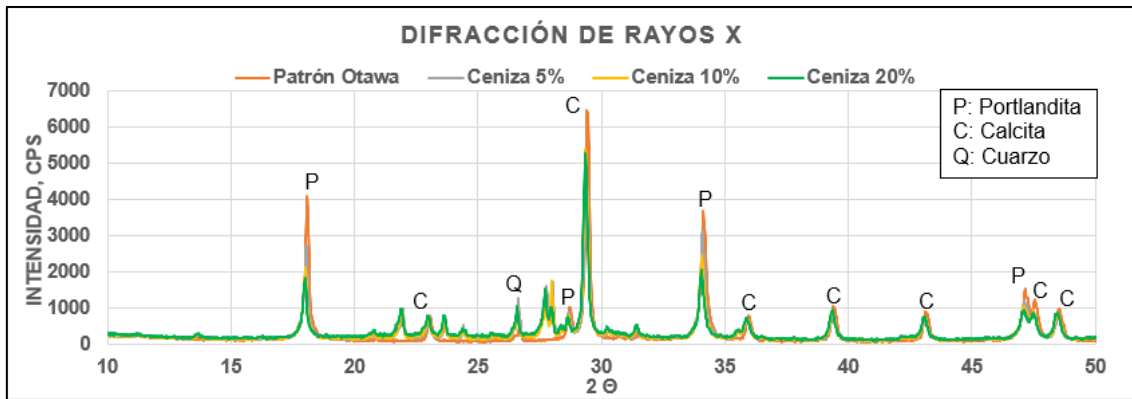


Figura 3.6. Difracción de Rayos X a 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.

Elaborado por: Jonathan Villa

Para cuantificar la cantidad tanto de portlandita, Cuarzo o calcita existente, se debe calcular el área bajo la curva, pero las limitaciones del equipo no permitió realizar un análisis más preciso de los datos resultantes en la difracción por rayos x sin embargo, se puede observar claramente que la cantidad de portlandita se reduce a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, lo que evidencia que la reacción de la ceniza volcánica con la portlandita y calcita produjeron mayores cantidades de silicatos de calcio hidratados.

En la Figura 3.6 se observan los picos más representativos de los compuestos de los morteros con sustitución de 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y del mortero patrón Ottawa, obteniendo en el rango 2θ de 15 - 20, 25 - 35 y 45 - 50 portlandita, de 20 - 30 y de 35 - 50 Calcita, y por último de 25 - 30 Cuarzo, extrayendo los valores de intensidad máxima de cada compuesto en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados de DRX a edad de 90 días de los morteros con sustitución del 5, 10 y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.

Compuesto	Patrón Ottawa	CV 5%	CV 10%	CV 20%
	(CPS)	(CPS)	(CPS)	(CPS)
P: Portlandita: 15 - 20	4092	2704	2123	1840
C: Calcita: 20 - 30	6475	4705	5395	5280
Q: Cuarzo: 25 - 30	474	1280	908	1060
P: Portlandita: 25 - 35	3680	3129	2447	2072
C: Calcita: 35 - 50	1242	848	936	872
P: Portlandita: 45 - 50	1523	1222	1069	959

Elaborado por: Jonathan Villa

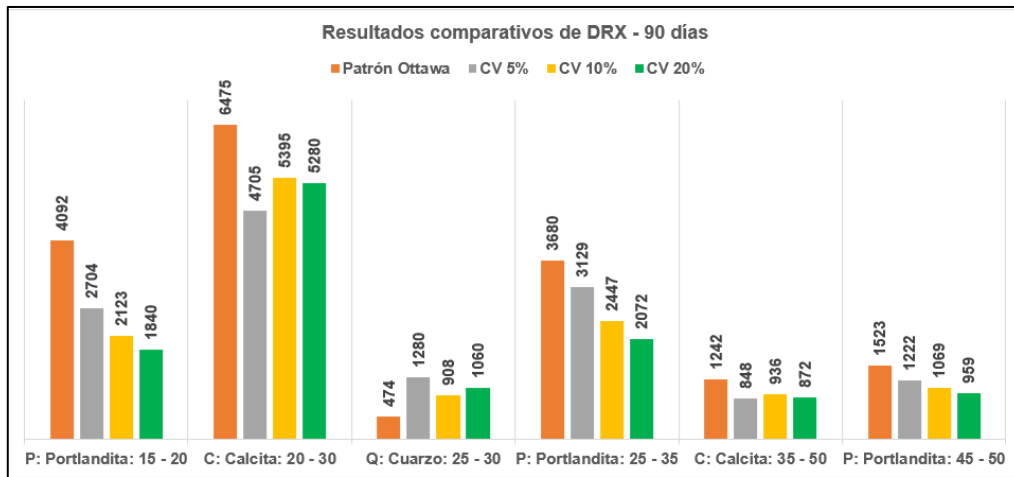


Figura 3.7 Resultados comparativos de DRX a 90 días de los morteros con sustitución del 5, 10 y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.

Elaborado por: Jonathan Villa

En la Figura 3.7 se representan gráficamente los valores de intensidad obtenidos en Tabla 3.5, donde, se evidencia que los valores más grandes de intensidad corresponden a la calcita en el rango 2θ de 20 – 30, esto sucede tanto para los morteros con sustitución de 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica como para el mortero patrón Ottawa, este último siendo el de mayor intensidad llegando a tener 6475 cps, además se observa que los valores de Portlandita disminuyen según se aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza volcánica, iniciando con una intensidad de 4092 cps en el mortero patrón Ottawa hasta 1840 cps en el mortero con sustitución al 20% de ceniza volcánica resultado una diferencia de 55% entre estas; por otro lado, el cuarzo en el mortero patrón Ottawa tiene la menor intensidad con un valor de 474 cps, sin embargo, los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica tienen una mayor intensidad, siendo mayor en el mortero con 5% de sustitución con un valor de 1280 cps.

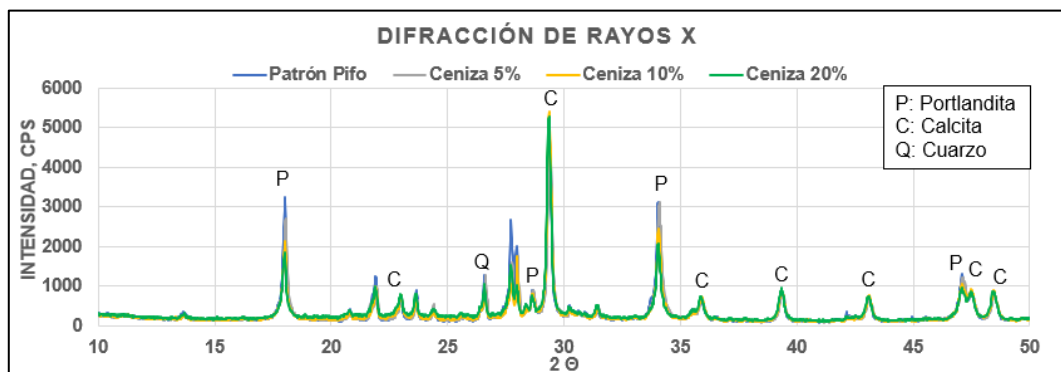


Figura 3.8. Difracción de Rayos X a 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Pifo.

Elaborado por: Jonathan Villa

En la Figura 3.8 se observan los picos más representativos de los compuestos de los morteros con sustitución de 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y del mortero patrón Ottawa, obteniendo en el rango 2θ de 15 - 20, 25 - 35 y 45 - 50 Portlandita, de 20 - 30 y de 35 - 50 Calcita, y por último de 25 - 30 Cuarzo, extrayendo los valores de intensidad máxima de cada compuesto en la Tabla 3.6

Tabla 3.6 Resultados de DRX a edad de 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Ottawa.

Compuesto	Patrón Pifo	CV 5%	CV 10%	CV 20%
	(CPS)	(CPS)	(CPS)	(CPS)
P: Portlandita: 15 - 20	3232	2704	2123	1840
C: Calcita: 20 - 30	4714	4705	5395	5280
Q: Cuarzo: 25 - 30	1273	1280	908	1060
P: Portlandita: 25 - 35	3108	3129	2447	2072
C: Calcita: 35 - 50	892	848	936	872
P: Portlandita: 45 - 50	1301	1222	1069	959

Elaborado por: Jonathan Villa

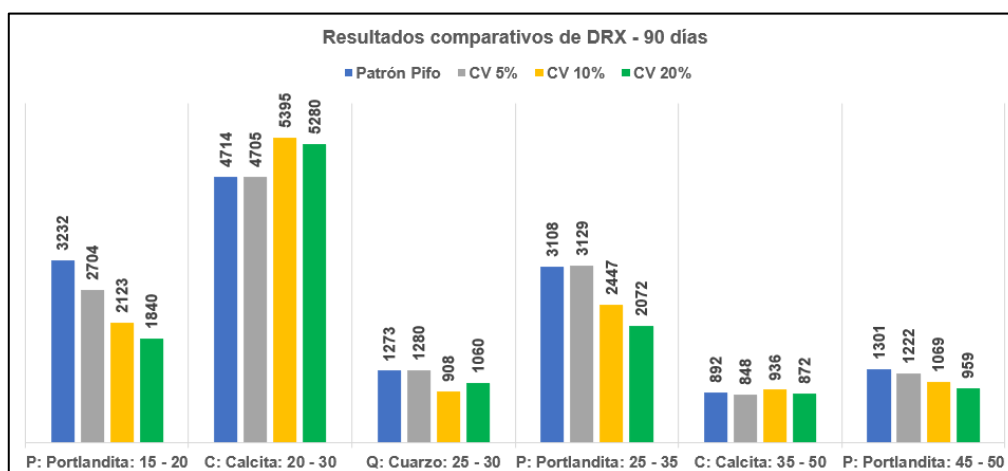


Figura 3.9 Resultados comparativos de DRX a 90 días de los morteros con sustitución del 5%, 10% y 20% de ceniza volcánica y mortero patrón Pifo.

Elaborado por: Jonathan Villa

En la Figura 3.9 se representan gráficamente los valores de intensidad obtenidos en la Tabla 3.6, donde, de la misma manera, se observa que los valores más grandes de intensidad corresponden a la calcita en el rango 2θ de 20 - 30, el mortero con sustitución de ceniza volcánica al 10% tiene la mayor intensidad con un valor de 5395 cps, además se observa que los valores de Portlandita disminuyen según se aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza volcánica, iniciando con una intensidad de 3232 cps en el mortero patrón Ottawa hasta 1840 cps en el mortero con sustitución al 20% de ceniza volcánica; por otro lado, el cuarzo en el mortero patrón Pifo ya no es muy bajo como sucedió con el patrón Ottawa, ya que tiene una intensidad de 1273 cps, acercándose mucho a la de mayor intensidad que corresponde al mortero con sustitución al 5% con un valor de 1280 cps.

3.1.2.4 Densidad

Los valores de densidad obtenidos para los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% y morteros patrón, se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Densidad de los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% y de los morteros patrón.

ESPÉCIMEN	DENSIDAD (g/cm ³)		
	28 días	56 días	90 días
PATRÓN OTTAWA	1,63	1,64	1,63
PATRÓN PIFO	1,64	1,65	1,67
CV 5%	1,54	1,61	1,65
CV 10%	1,65	1,63	1,66
CV 20%	1,65	1,69	1,68

Elaborado por: Jonathan Villa

En la Figura 3.10 se representa gráficamente los resultados de densidad obtenidos para los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% y morteros patrón, para las edades de 28, 56 y 90 días, donde podemos evidenciar la similitud de los valores de densidad entre todos los morteros fabricados y en todas las edades, en el mortero patrón Ottawa a los 28 y 90 días se observa que tiene la misma densidad con un valor de 1.63 g/cm³, y a los 56 días solamente varía por una centésima, es decir, 1.64 g/cm³. Sin embargo, el mortero con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5% a la edad de 28 días tiene la menor densidad de 1.54 g/cm³ siendo diferente a las demás.

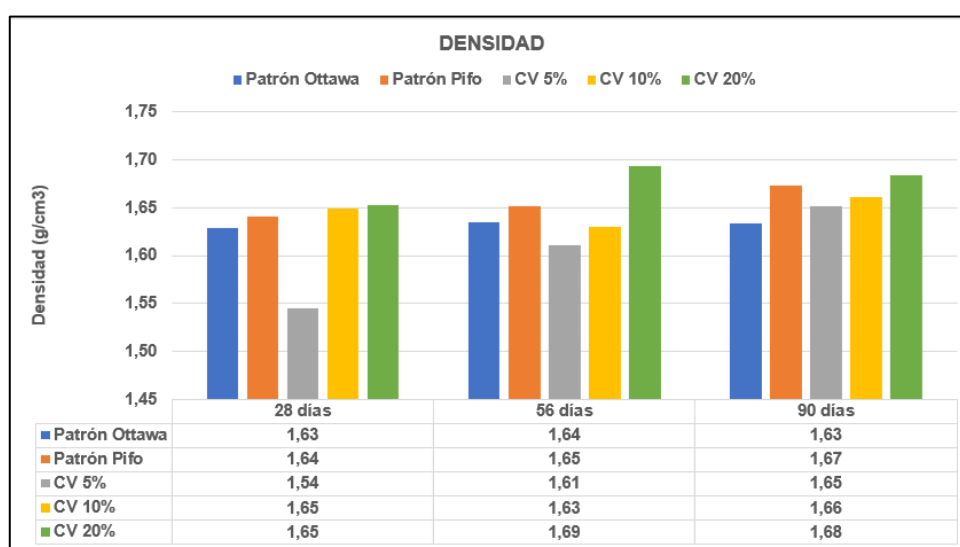


Figura 3.10 Resultados comparativos de densidad de los morteros con sustitución parcial de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% y de los morteros patrón.

Elaborado por: Jonathan Villa

3.2 Conclusiones

- Uno de los objetivos específicos planteados en este proyecto, contemplaba la realización del análisis de termogravimetría en las instalaciones del Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC). No obstante, debido a la ejecución de labores de mantenimiento en sus equipos, no existió la disponibilidad de dichas instalaciones y equipos, lo que no permitió llevar a cabo el análisis de termogravimetría en este proyecto.
- El procedimiento empleado en el apagado de la cal siguió el método correspondiente a la cal de apagado medio, tal como lo establece la norma NTE INEN 248:2010, se debe destacar que en dicha norma no se especifica el tiempo de reposo para lograr un mejor apagado, por lo que se optó acoger la recomendación por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural y se empleó un apagado de la cal por 60 días. Sin embargo, el procedimiento de apagado de la cal resultó en una pasta de consistencia muy húmeda, como medida para mejorar tanto la consistencia como el nivel de humedad de la pasta, se procedió a realizar un proceso de secado a 40°C. Este ajuste en el proceso de secado demostró ser efectivo en la mejora de la consistencia de la masilla, así como en la reducción del contenido de humedad presente en ella.
- Según los valores obtenidos en el ensayo de flujo realizado en cada muestra de mortero, se ha determinado que el porcentaje de flujo es del 110% tanto para el mortero patrón Pifo como para el mortero patrón Ottawa. Asimismo, se registraron porcentajes de flujo del 108.3%, 108.7% y 107.7% para los morteros con sustituciones de ceniza volcánica al 5%, 10% y 20% respectivamente. Es importante destacar que estos valores corresponden a lo establecido por la norma NTE INEN 488:2009, que especifica que el rango de flujo debe ser de $110 \pm 5\%$. Esta adecuación a los requisitos de la norma se logró mediante ajustes en la dosificación de agua en la elaboración de los morteros, lo que permitió alcanzar los mencionados porcentajes de flujo. Los resultados del ensayo reflejan que los distintos tipos de mortero cumplen con los estándares de flujo definidos por la norma, demostrando la efectividad de las modificaciones en la dosificación.
- Al examinar la resistencia a la compresión en los morteros elaborados con cal apagada, se observan los siguientes resultados: En el caso del mortero patrón de cal apagada combinada con arena normalizada o arena de Ottawa, los valores de resistencia a la compresión son de 0.48 MPa, 0.59 MPa y 0.57 MPa a las edades de 28, 56 y 90 días, respectivamente. Estos valores indican que la

resistencia a la compresión es notablemente baja, comparados con por ejemplo el valor a 28 días que debería tener la cal hidráulica hidratada que es de 3.4 MPa según la norma NTE INEN 246.2010.

- Al mezclar arena de Pifo con la cal apagada se obtiene mayor resistencia a la compresión de 0.51 MPa, 0.67 MPa y 0.84 MPa para las edades de 28, 56 y 90 días, respectivamente. La comparación entre los morteros patrón revela que la resistencia mejora ligeramente con el uso de arena de Pifo. Aunque las resistencias son casi equivalentes a los 28 días, se nota un incremento en la resistencia del patrón Pifo con el paso del tiempo, a los 90 días, la resistencia del mortero patrón Pifo es aproximadamente 1.5 veces mayor que la del mortero patrón Ottawa. En consecuencia, se puede inferir que, con el aumento del tiempo, también aumenta la resistencia a la compresión de los morteros.
- Al analizar cómo los morteros de cal apagada responden a la incorporación parcial de ceniza volcánica en reemplazo de porcentajes de cal apagada, se evidencian distintos comportamientos en relación con la resistencia a la compresión, en comparación con el mortero patrón Pifo. En el caso del mortero con una sustitución de cal por ceniza volcánica del 5%, a pesar de que su resistencia se incrementa a medida que avanza el tiempo, los resultados obtenidos son inferiores a las resistencias del Patrón Pifo.
- Para el mortero con sustitución al 10%, se aprecia un incremento de resistencia en el transcurso del tiempo, superando la resistencia del Patrón Pifo a los 28 y 56 días, sin embargo, a los 90 días, la resistencia a compresión queda por debajo de la del Patrón Pifo.
- En el caso del mortero con sustitución al 20%, se obtiene una resistencia mayor para todas las edades en comparación con los morteros patrón Pifo y los morteros con sustitución al 5% y 10%, este último alcanza una resistencia de 0.98 MPa a los 90 días, siendo la resistencia a compresión más alta entre todos los morteros analizados. En resumen, se concluye que mientras incrementa el porcentaje de sustitución de ceniza volcánica, las resistencias tienden a aumentar. También se evidencia que en general, las resistencias se incrementan con el transcurso del tiempo en todos los morteros con sustitución de ceniza volcánica.
- En relación con el ensayo de Difracción de Rayos X, es destacable la presencia significativa de portlandita y Calcita en los morteros elaborados con cal apagada, esto se evidencia en los picos de mayor intensidad en el espectro, los cuales corresponden a estos compuestos, y están acompañados por picos de

intensidad moderada relacionados con el cuarzo. La Figura 3.9 muestra claramente que, en el caso de la portlandita a la vez que incrementa el porcentaje de sustitución, los valores de intensidad disminuyen, esto es debido a que el área bajo las curvas con mayor porcentaje de ceniza volcánica disminuye, es decir hay menos portlandita y más silicatos de calcio hidratados (C-S-H).

- En contraste, la calcita presenta un aumento en los valores de intensidad con el incremento del porcentaje de sustitución, siendo los valores más altos en el mortero con una sustitución al 10%. Sin embargo, ocurre lo opuesto en el caso del cuarzo, donde el mortero con una sustitución al 10% exhibe el valor de intensidad más bajo. En síntesis, el análisis de Difracción de Rayos X revela una composición dominada por Portlandita y Calcita en los morteros de cal apagada, con indicios de cuarzo presente también. Además, los resultados demuestran una relación entre el porcentaje de sustitución de ceniza volcánica y las variaciones en la intensidad de estos compuestos, indicando cambios en la estructura cristalina de los morteros en función de las sustituciones efectuadas.
- La Figura 3.10 refleja un pequeño incremento en la densidad de los morteros a la vez que incrementa el porcentaje de sustitución, esto se puede interpretar que al existir el reemplazo de cal por ceniza la densidad crece, debido al valor de la densidad de la ceniza volcánica.

3.3 Recomendaciones

- Dado el incremento en la resistencia a compresión a la vez que se sustituye un mayor porcentaje de ceniza volcánica, se recomienda extender el análisis a niveles de sustitución más altos de los evaluados hasta ahora (máximo del 20%). Esta ampliación permitiría determinar si la tendencia de mejora persiste o si alcanza un punto máximo de resistencia a compresión.
- Establecer una coordinación segura y garantizada con la institución designada para llevar a cabo los ensayos de Difracción de Rayos X y termogravimetría, ya que la cancelación repentina de estos ensayos puede ocasionar retrasos significativos en el proyecto al tener que abordar soluciones alternativas para su realización.

4. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM C127. (2017). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate 1*. <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM C136/C136M. (2020). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. <https://doi.org/10.1520/C0136>
- ASTM C29/C29M. (2017). *Standard Test Method for Bulk Density (“ Unit Weight ”) and Voids in Aggregate*. <https://doi.org/10.1520/C0029>
- ASTM C40/C40M. (2020). *Standard Test Method for Organic Impurities in Aggregates for Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0040>
- Espitia, A., & Torres, N. (2018). Evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 112, 89-98.
- Gomez, J. (2000). *Materiales de construcción* (D. de I. C. ITESM (ed.)). 2000.
- Gonzales, J. (2016). *ESTUDIO DEL MORTERO DE PEGA USADO EN EL CANTÓN CUENCA. PROPUESTA DE MEJORA, UTILIZANDO ADICIONES DE CAL*. Universidad de Cuenca.
- González, J. (2020). *Desarrollo de nuevos morteros de restauración de cal con aditivos*. UNIVERSIDAD DE NAVARRA.
- Gutiérrez, L. (2003). *EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN* (2.^a ed.).
- León, E. (2022). *Clasificación y uso de metakaolin como material suplementario en el hormigón para el análisis de la resistencia a compresión*. Escuela Politecnica Del Ecuador.
- Maldonado, Y. (2021). *Cal [Tipos] Propiedades, Usos e Importancia*. <https://geologiaweb.com/materiales/cal/>
- Mas, X. (2006). *ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS COMPUESTOS, PARA SU APLICACIÓN EN INTERVENCIONES DE SELLADOS, REPOSICIONES Y RÉPLICAS, DE ELEMENTOS PÉTREOS ESCULTÓRICO-ORNAMENTALES*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Molina, T. (2021). *Análisis comparativo de las cenizas volcánicas provenientes de los volcanes Cotopaxi, Pululahua, Chalupas, Guagua Pichincha y Tungurahua para su*

uso en la fabricación de concreto. Escuela Politecnica Nacional.

NTE INEN 1108. (2014). *AGUA POTABLE. REQUISITOS.*
<http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1108-5.pdf>

NTE INEN 155. (2009). *CEMENTO HIDRAULICO. MEZCLADO MECÁNICO DE PASTAS Y MORTEROS DE CONSISTENCIA PLÁSTICA.*

NTE INEN 248. (2010). *CAL VIVA PARA PROPÓSITOS ESTRUCTURALES. REQUISITOS.*

NTE INEN 2502. (2009). *CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL FLUJO EN MORTEROS.*

NTE INEN 488. (2009). *CEMENTO HIDRÁULICO: DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE 50 MM DE ARISTA.*

Orrala, F., & Gómez, F. (2015). *ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE PUZOLANA OBTENIDA DE LA CALCINACIÓN DE RESIDUOS DEL CULTIVO DE MAÍZ PRODUCIDO EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA.* UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA.

Peruzzi, B. (2018). *Factibilidad de emplear mezclas cal-puzolana como reemplazo parcial del cemento en hormigones.* Universidad de Valparaiso.

Revelo-Garrigó, G. (2011). Influencia de los elementos climaticos en el deterioro de las fachadas de edificaciones del barrio colon. *Arquitectura y Urbanismo*, 32(3).

Snellings, R., Chwast, J., Cizer, Ö., De Belie, N., Dhandapani, Y., Durdzinski, P., Elsen, J., Haufe, J., Hooton, D., Patapy, C., Santhanam, M., Scrivener, K., Snoeck, D., Steger, L., Tongbo, S., Vollpracht, A., Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2018). RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(6). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1298-5>

Soria, F. (1963). Puzolanas y cementos puzolánicos. En C. S. de I. Científicas (Ed.), *Materiales de Construcción* (Vol. 13, Número 111, pp. 615-645). <https://doi.org/10.3989/mc.1963.v13.i111.1799>

Suárez, A., & Urgiles, M. (2010). *Caracterización de la ceniza volcánica del Tungurahua para la fabricación de un aglomerante cal - puzolana* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/715/1/ti844.pdf%0Ahttp://dspace>

ce.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3659/1/ENF08.pdf#page=1&zoom=auto,
-107,848

Terán, R. (2014). Repensar el patrimonio: el caso del Centro Histórico de Quito. *Patrimonio Cultural del Ecuador*, 5(1), 70-75.

Zaruma, L. A. (2018). *Mortero impermeable a base de plástico reciclado PET para revestimientos de edificaciones de la ciudad de Zamora* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30238>

5. ANEXOS

ANEXO I
OBTENCIÓN DEL FLUJO DE MORTEROS
MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE OTTAWA

Obtención del Flujo		
Di	100	mm
D1	210	mm
D2	210	mm
D3	210	mm
D4	210	mm
Dpromedio	210	mm
%Flujo	110,0%	

MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE PIFO

Obtención del Flujo		
Di	100	mm
D1	210	mm
D2	210	mm
D3	210	mm
D4	210	mm
Dpromedio	210	mm
%Flujo	110,0%	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 5% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL**

Obtención del Flujo		
Di	100	mm
D1	208	mm
D2	207	mm
D3	208	mm
D4	210	mm
Dpromedio	208,25	mm
%Flujo	108,3%	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 10% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL**

Obtención del Flujo		
Di	100	mm
D1	208	mm
D2	209,6	mm
D3	209	mm
D4	208	mm
Dpromedio	208,7	mm
%Flujo	108,7%	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 20% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL**

Obtención del Flujo		
Di	100	mm
D1	206,6	mm
D2	210	mm
D3	206	mm
D4	208	mm
Dpromedio	207,7	mm
%Flujo	107,7%	

ANEXO II
ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE OTTAWA A LOS
28, 56 Y 90 DÍAS

Morteros Patrón Ottawa 28 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1/2/2023	PO1	1/3/2023	194,7	1,3	24,6	0,52	0,48
1/2/2023	PO2	1/3/2023	194,1	1,1	23,6	0,45	

Morteros Patrón Ottawa 56 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1/2/2023	PO3	29/3/2023	197,3	1,3	24,4	0,52	0,59
1/2/2023	PO4	29/3/2023	196,8	1,6	24,0	0,66	

Morteros Patrón Ottawa 90 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1/2/2023	PO5	2/5/2023	197,7	1,3	24,6	0,54	0,57
1/2/2023	PO6	2/5/2023	197,7	1,5	24,1	0,61	

MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE PIFO A LOS
28,
56 Y 90 DÍAS

Morteros Patrón Pifo 28 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
2/2/2023	PP1	2/3/2023	188,9	1,2	23,7	0,51	0,51
2/2/2023	PP2	2/3/2023	190,4	1,2	23,5	0,51	

Morteros Patrón Pifo 56 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
2/2/2023	PP3	30/3/2023	189,7	1,7	23,2	0,74	0,67
2/2/2023	PP4	30/3/2023	207,1	1,5	25,3	0,59	

Morteros Patrón Pifo 90 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
2/2/2023	PP5	3/5/2023	210,8	2,1	24,7	0,84	0,84
2/2/2023	PP6	3/5/2023	208,5	2,1	24,4	0,84	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 5% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL A LOS 28, 56 Y 90 DÍAS**

Morteros Ceniza Volcánica - 5% 28 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
8/2/2023	CV5-1	8/3/2023	195,9	1,3	25,6	0,49	0,50
8/2/2023	CV5-2	8/3/2023	201,2	1,3	25,2	0,50	

Morteros Ceniza Volcánica - 5% 56 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
8/2/2023	CV5-3	5/4/2023	199,2	1,3	24,8	0,54	0,58
8/2/2023	CV5-4	5/4/2023	196,9	1,5	24,3	0,62	

Morteros Ceniza Volcánica - 5% 90 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
8/2/2023	CV5-5	9/5/2023	202,6	1,8	24,4	0,74	0,78
8/2/2023	CV5-6	9/5/2023	204,9	2,1	25,0	0,82	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 10% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL A LOS 28, 56 Y 90 DÍAS**

Morteros Ceniza Volcánica - 10% 28 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
15/2/2023	CV10-1	15/3/2023	202,1	1,4	24,1	0,60	0,58
15/2/2023	CV10-2	15/3/2023	203,0	1,4	24,8	0,55	

Morteros Ceniza Volcánica - 10% 56 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
15/2/2023	CV10-3	12/4/2023	205,5	1,7	25,1	0,69	0,70
15/2/2023	CV10-4	12/4/2023	205,3	1,8	25,1	0,72	

Morteros Ceniza Volcánica - 10% 90 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
15/2/2023	CV10-5	16/5/2023	212,2	2,2	25,3	0,85	0,82
15/2/2023	CV10-6	16/5/2023	205,7	1,9	24,3	0,79	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 20% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL A LOS 28, 56 Y 90 DÍAS**

Morteros Ceniza Volcánica - 20% 28 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
22/2/2023	CV20-1	22/3/2023	211,4	1,8	25,6	0,70	0,72
22/2/2023	CV20-2	22/3/2023	207,5	1,8	24,8	0,74	

Morteros Ceniza Volcánica - 20% 56 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
22/2/2023	CV20-3	19/4/2023	212,6	2,0	25,2	0,79	0,78
22/2/2023	CV20-4	19/4/2023	213,2	1,9	24,8	0,77	

Morteros Ceniza Volcánica - 20% 90 días							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (KN)	Área (cm²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
22/2/2023	CV20-5	23/5/2023	218,7	2,5	25,5	0,97	0,98
22/2/2023	CV20-6	23/5/2023	214,1	2,5	25,2	0,98	

ANEXO III
DENSIDAD DE LOS MORTEROS
MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE OTTAWA

Morteros Patrón Otawa 28 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
PO1	194,7	24,6	4,9	1,61	1,63
PO2	194,1	23,6	5,0	1,64	

Morteros Patrón Otawa 56 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
PO3	197,3	24,4	4,9	1,63	1,64
PO4	196,8	24,0	5,0	1,64	

Morteros Patrón Otawa 90 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
PO5	197,7	24,6	4,9	1,63	1,63
PO6	197,7	24,1	5,0	1,63	

MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE PIFO

Morteros Patrón Pifo 28 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
PP1	188,9	23,7	4,9	1,63	1,64
PP2	190,4	23,5	4,9	1,65	

Morteros Patrón Pifo 56 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
PP3	189,7	23,2	4,9	1,68	1,65
PP4	207,1	25,3	5,0	1,63	

Morteros Patrón Pifo 90 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
PP5	210,8	24,7	5,1	1,66	1,67
PP6	208,5	24,4	5,1	1,68	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 5% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL**

Morteros Ceniza Volcánica - 5% 28 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV5-1	195,9	25,6	5,1	1,51	1,54
CV5-2	201,2	25,2	5,1	1,58	

Morteros Ceniza Volcánica - 5% 56 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV5-3	199,2	24,8	5,0	1,61	1,61
CV5-4	196,9	24,3	5,0	1,61	

Morteros Ceniza Volcánica - 5% 90 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV5-5	202,6	24,4	5,0	1,66	1,65
CV5-6	204,9	25,0	5,0	1,64	

**MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 10% DE CENIZA
VOLCÁNICA EN PESO DE CAL**

Morteros Ceniza Volcánica - 10% 28 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV10-1	202,1	24,1	5,1	1,66	1,65
CV10-2	203,0	24,8	5,0	1,64	

Morteros Ceniza Volcánica - 10% 56 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV10-3	205,5	25,1	5,1	1,62	1,63
CV10-4	205,3	25,1	5,0	1,64	

Morteros Ceniza Volcánica - 10% 90 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV10-5	212,2	25,3	5,0	1,66	1,66
CV10-6	205,7	24,3	5,1	1,66	

MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 20% DE CENIZA VOLCÁNICA EN PESO DE CAL

Morteros Ceniza Volcánica - 20% 28 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV20-1	211,4	25,6	5,0	1,64	1,65
CV20-2	207,5	24,8	5,0	1,67	

Morteros Ceniza Volcánica - 20% 56 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV20-3	212,6	25,2	5,0	1,68	1,69
CV20-4	213,2	24,8	5,0	1,70	

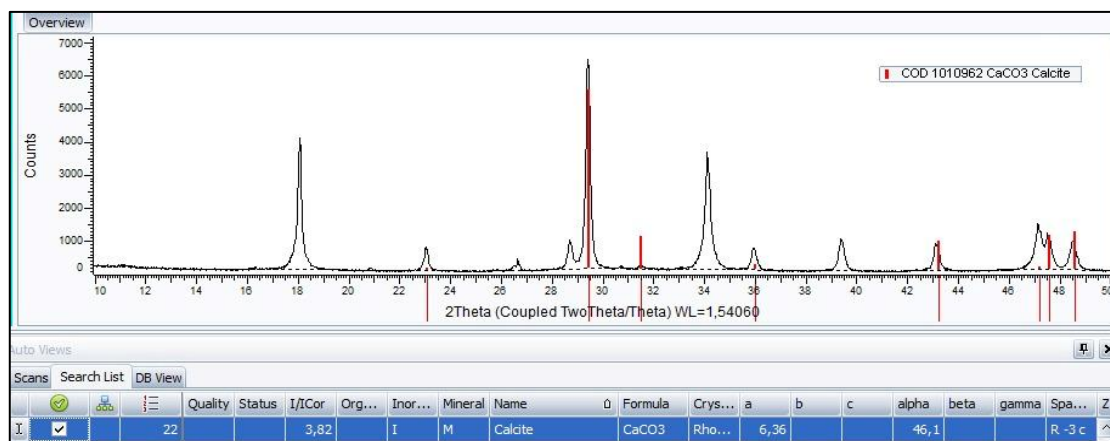
Morteros Ceniza Volcánica - 20% 90 días					
Descripción	Peso (g)	Área (cm²)	Altura (cm)	Densidad (g/cm³)	Densidad (g/cm³)
CV20-5	218,7	25,5	5,1	1,69	1,68
CV20-6	214,1	25,2	5,1	1,68	

ANEXO IV

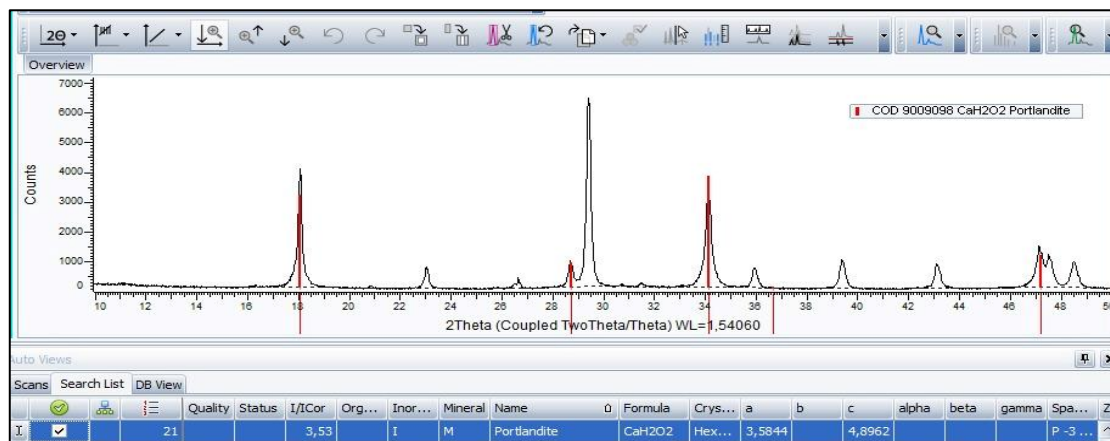
DIFRACCIÓN DE RAYOS X

MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE OTTAWA A 90 DÍAS

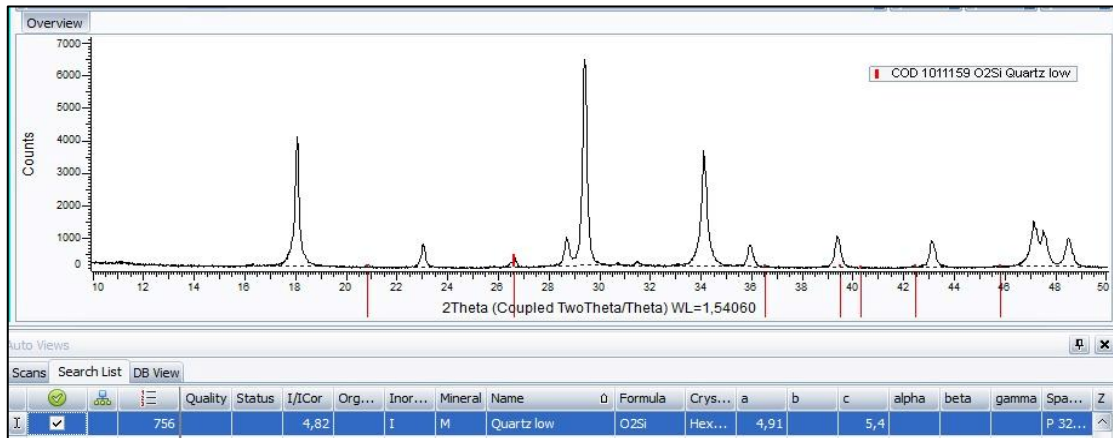
CALCITA



PORTLANDITA

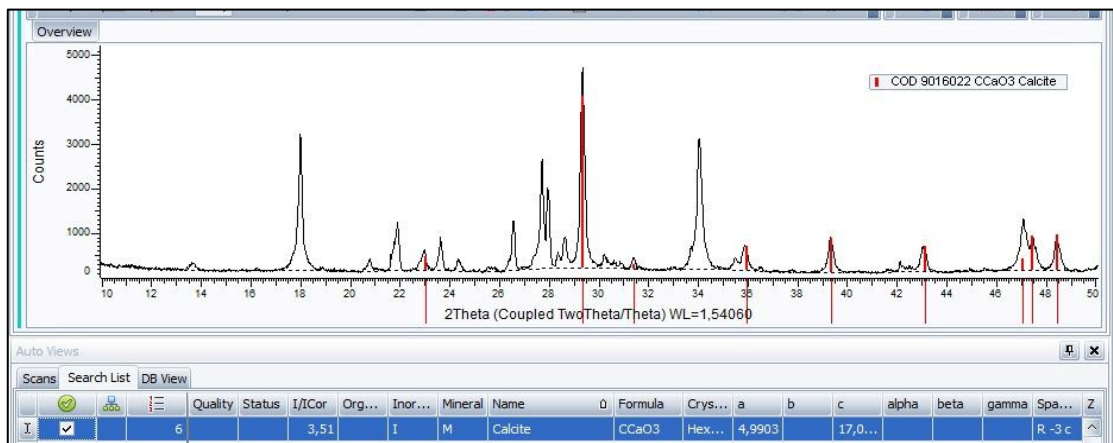


CUARZO

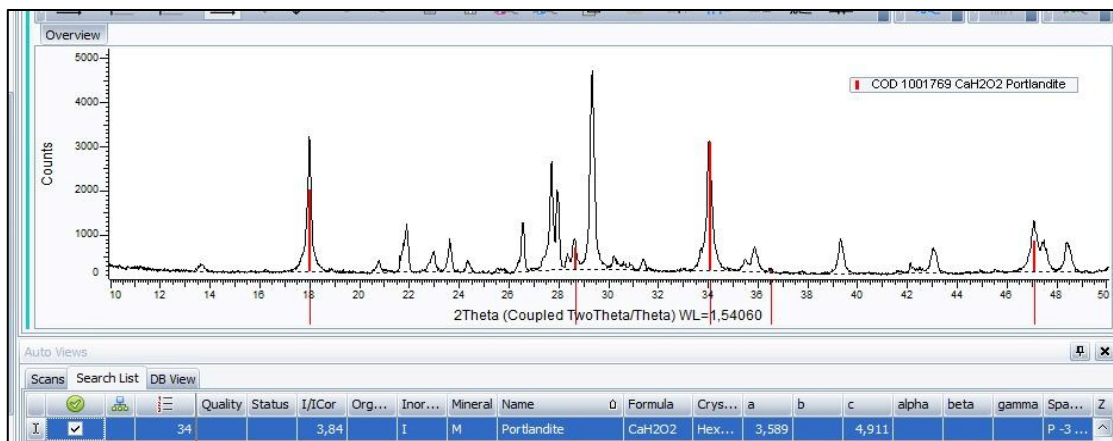


MORTERO PATRÓN DE CAL CON ARENA DE PIFO A 90 DÍAS

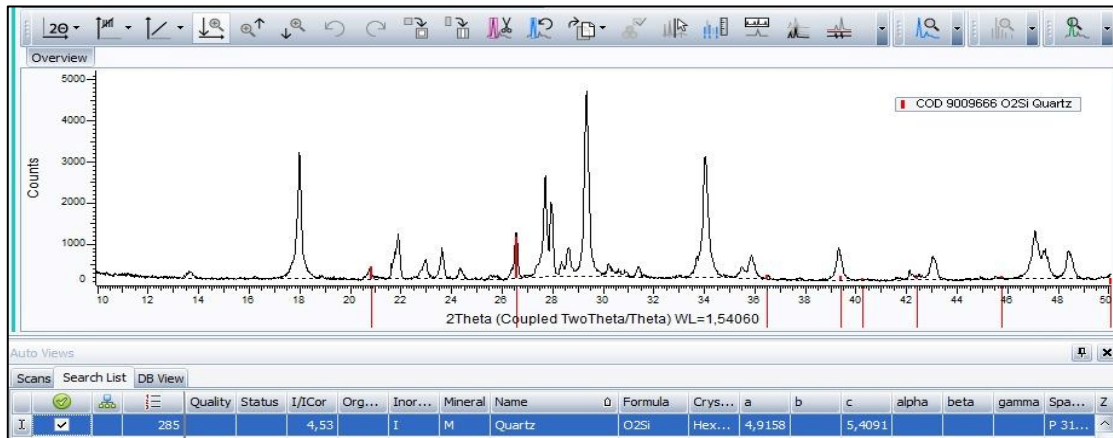
CALCITA



PORTLANDITA

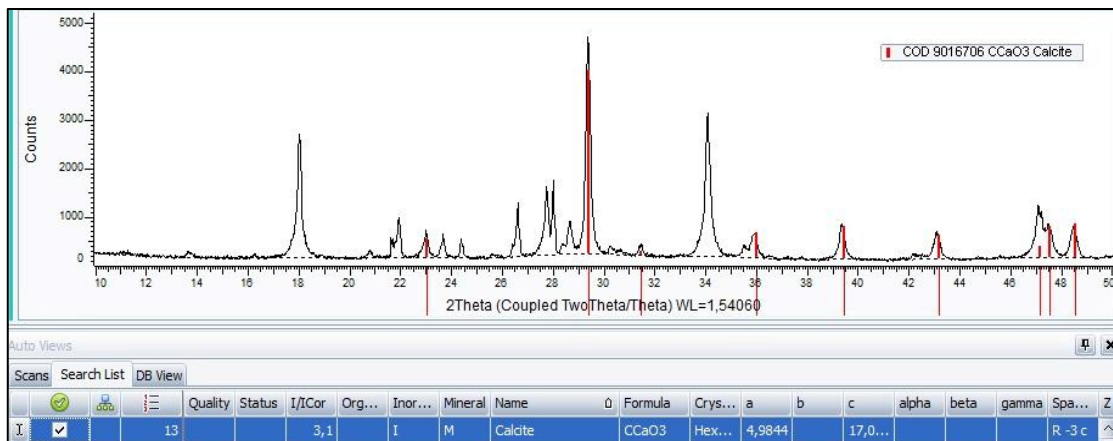


CUARZO

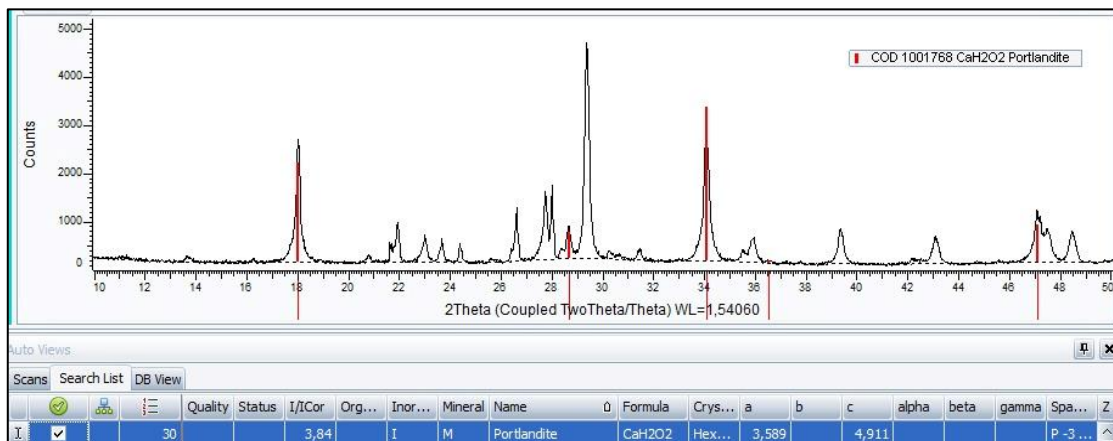


MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 5% DE CENIZA VOLCÁNICA EN PESO DE CAL A 90 DÍAS

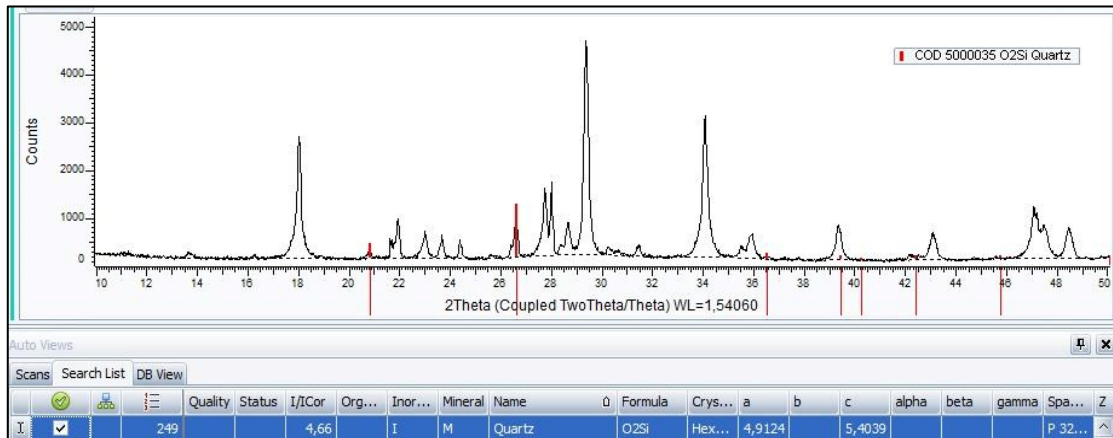
CALCITA



PORTLANDITA

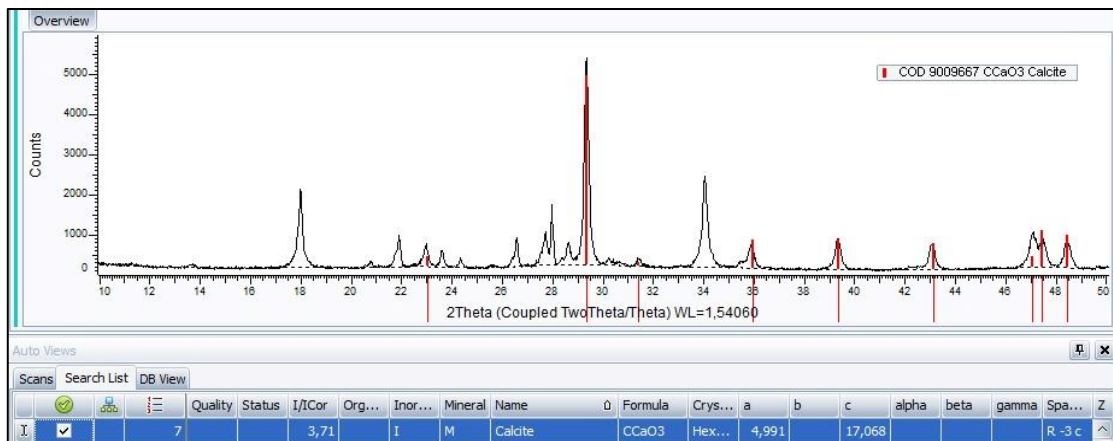


CUARZO

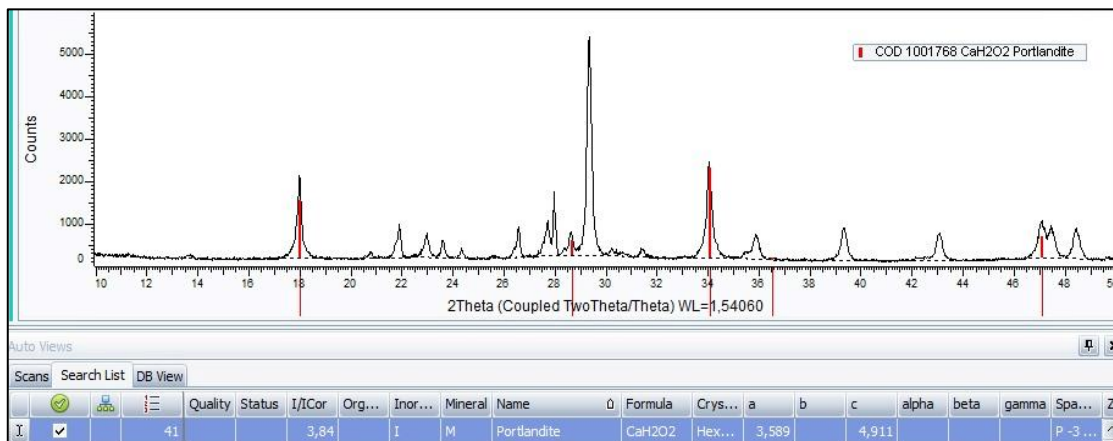


MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 10% DE CENIZA VOLCÁNICA EN PESO DE CAL A 90 DÍAS

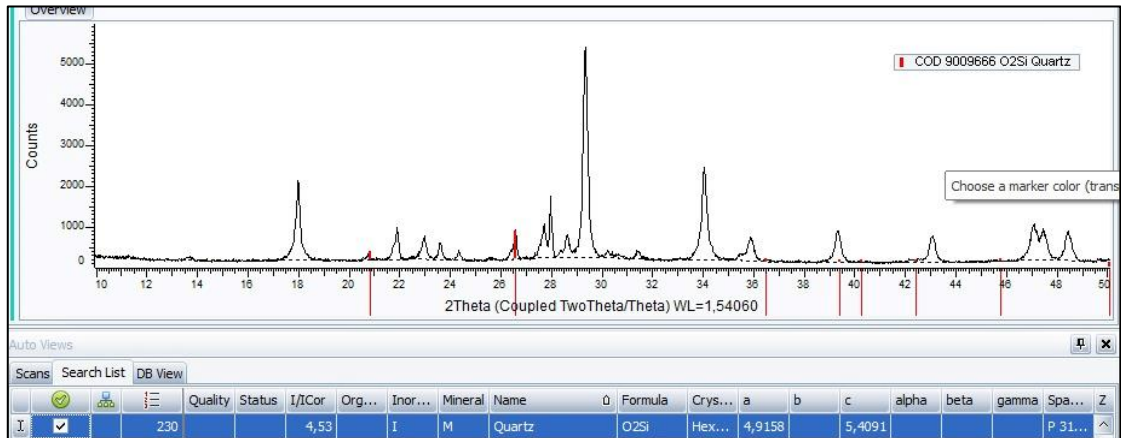
CALCITA



PORTLANDITA

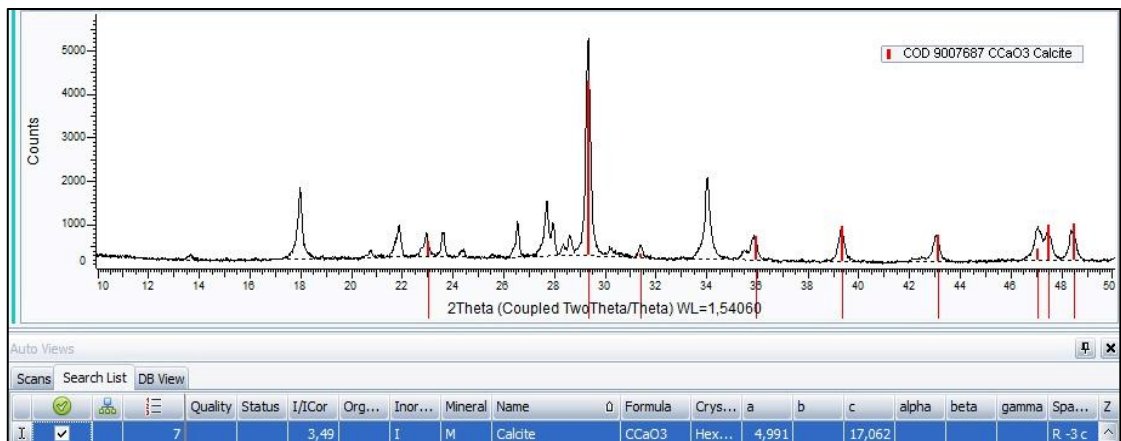


CUARZO

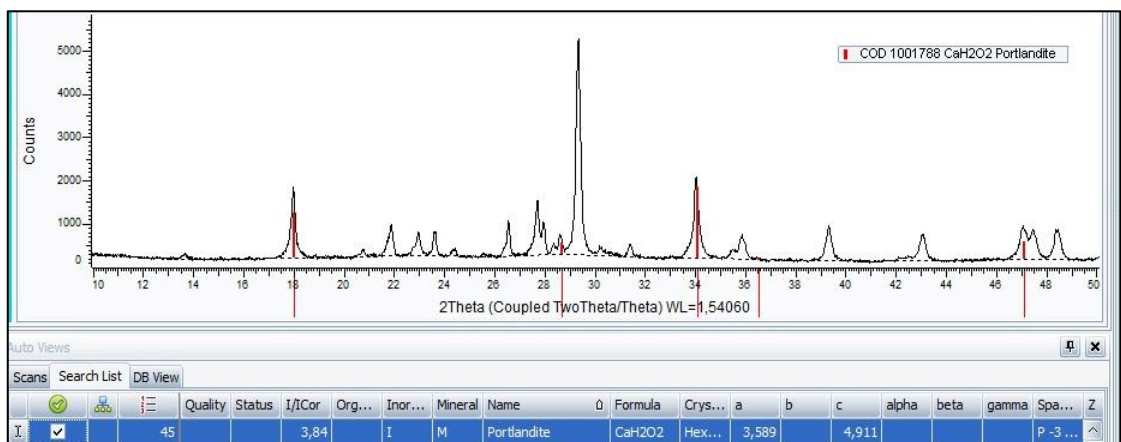


MORTERO DE CAL CON SUSTITUCIÓN DE 20% DE CENIZA VOLCÁNICA EN PESO DE CAL A 90 DÍAS

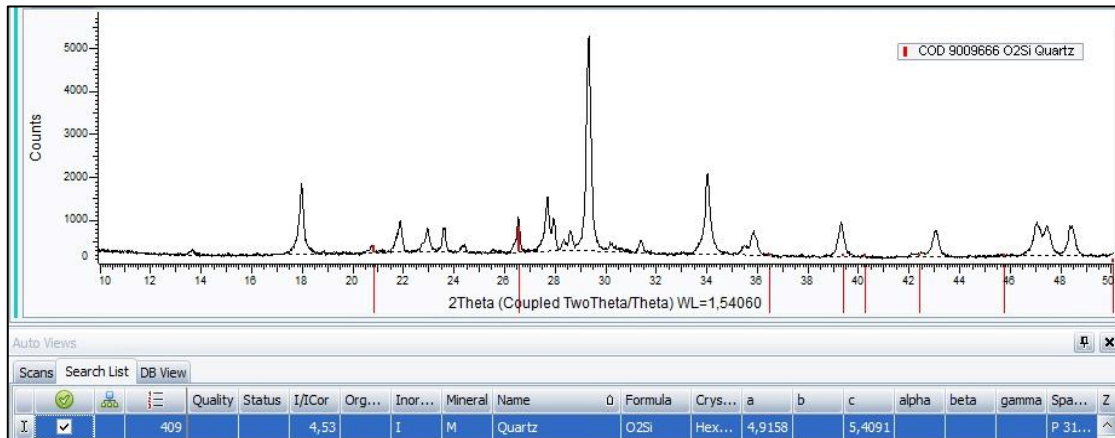
CALCITA



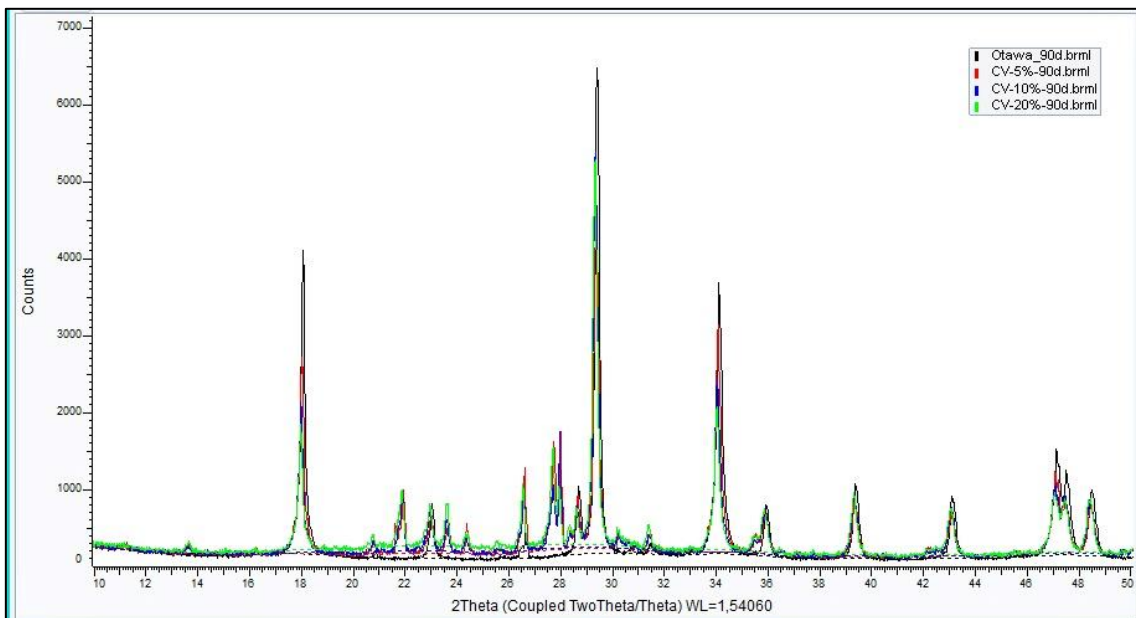
PORTLANDITA



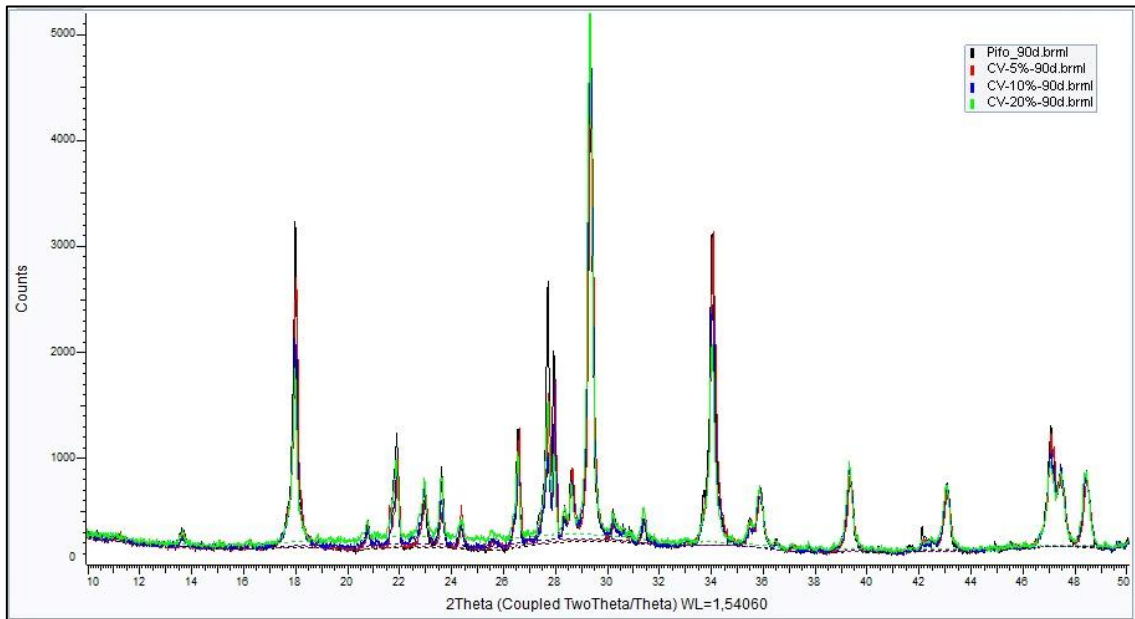
CUARZO



COMPARACIÓN ENTRE MORTERO PATRÓN OTTAWA Y MORTEROS CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CENIZA VOLCÁNICA A 90 DÍAS



COMPARACIÓN ENTRE MORTERO PATRÓN OTTAWA Y MORTEROS CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CENIZA VOLCÁNICA A 90 DÍAS



ANEXO V

INFORMES DE RESULTADOS EMITIDOS POR EL LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS

Código de informe: GSA-23-002-I
Fecha de informe: 2023-06-23

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE


Razón Social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
PROCEDENCIA: Pifo
TIPO DE MUESTRA: Arena
NORMA: ASTM C127
FECHA DE ENSAYO: 2023-03-02

RESULTADOS DEL ENSAYO					
Identificación	Descripción	Densidad relativa seca	Densidad relativa S.S.S	Densidad relativa aparente	Absorción de agua (%)
30-I-031	Arena Pifo	2,38	2,46	2,59	3,35

Observaciones: El término "Densidad relativa S.S.S" se refiere a la densidad de la muestra determinada bajo la condición saturada y superficialmente seca. La información proporcionada por el cliente, tal como, procedencia y tipo de muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones del Laboratorio. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.


Ing. Mercedes Villacís
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec



DENSIDAD APARENTE

Código de Informe: DA-23-004-I
Fecha de informe : 2023-06-23

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
PROCEDENCIA: Pifo
TIPO DE MUESTRA: Arena
FECHA DE ENSAYO: 2023-03-02
NORMA: ASTM C29

DENSIDAD APARENTE DE AGREGADOS					
Identificación	Descripción	Muestra Suelta		Muestra Compactada	
		Densidad seca (kg/m ³)	Contenido de vacíos (%)	Densidad seca (kg/m ³)	Contenido de vacíos (%)
30-I-031	Arena	1545	35	1694	29

Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Villacís
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609



CONTENIDO ORGÁNICO

Código de Informe: CO-23-004-I
Fecha de informe : 2023-06-23

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica

Contratante: ***

Contratista: ***

Fiscalizador: ***

PROCEDENCIA: Pífo

TIPO DE MUESTRA: Arena

FECHA DE ENSAYO: 2023-03-02

NORMA: ASTM C40



Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Villacís
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Código de Informe: GRF-23-004-I
Fecha de informe : 2023-06-23

Hoja 01 de 01

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

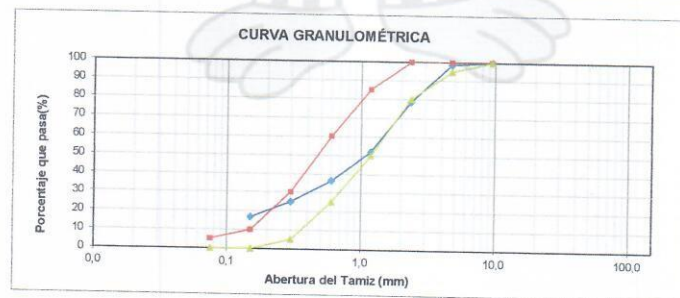
Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
MUESTRA: Arena
PROCEDENCIA: Piño
FECHA DE ENSAYO: 2023-03-02
NORMA: ASTM C136M

Tamiz No.	Tamaño Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9,5	0,0	0,0	0,0	100,0
No. 4	4,750	6,3	1,3	1,3	98,7
No. 8	2,360	100,4	20,1	21,4	78,6
No. 16	1,180	132,8	26,6	48,0	52,0
No. 30	0,600	78,2	15,7	63,6	36,4
No. 50	0,300	56,7	11,4	75,0	25,0
No. 100	0,150	41,0	8,2	83,2	16,8
BANDEJA	-	83,9	16,8	100,0	0,0
Total		499,3			

Observaciones: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra y procedencia, involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.



Ing. Mercedes Villacís
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

Código de Informe: CCM-23-001-I-A
Fecha de Informe: 2023-07-28

Hoja 01 de 03

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***

NORMA DE REFERENCIA: ASTM C109/C109M

FECHA DE ENSAYO: Indicadas

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo %	Edad (días)	Masa (g)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	030-I-H-01	Patrón: Otawa 28 días	2023-02-01	2023-03-01	110	28	194,727	1,27	0,5
2	030-I-H-02	Patrón: Otawa 28 días	2023-02-01	2023-03-01	110	28	194,106	1,07	0,4
3	030-I-H-03	Patrón: Pílo 28 días	2023-02-02	2023-03-02	110	28	188,941	1,22	0,5
4	030-I-H-04	Patrón: Pílo 28 días	2023-02-02	2023-03-02	110	28	190,33	1,20	0,5
5	030-I-H-05	Ceniza 5% 28 días	2023-02-08	2023-03-08	108,3	28	195,948	1,25	0,5
6	030-I-H-06	Ceniza 5% 28 días	2023-02-08	2023-03-08	108,3	28	201,159	1,27	0,5
7	030-I-H-07	Ceniza 10% 28 días	2023-02-15	2023-03-15	108,7	28	202,088	1,44	0,6
8	030-I-H-08	Ceniza 10% 28 días	2023-02-15	2023-03-15	108,7	28	202,997	1,37	0,6
9	030-I-H-09	Ceniza 20% 28 días	2023-02-22	2023-03-22	107,7	28	211,38	1,78	0,7
10	030-I-H-10	Ceniza 20% 28 días	2023-02-22	2023-03-22	107,7	28	207,487	1,84	0,7

Observaciones:

El presente informe reemplaza al informe: CCM-23-001-I.
El cambio se realiza por solicitud del cliente modificándose el porcentaje de flujo para los ítems de 5%, 10% y 20%, así como la descripción de los ítems de ensayo.
La información proporcionada por el cliente, tal como, descripción y fecha de fábrica, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR

Ing. Mercedes Villacis
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

Código de Informe: CCM-23-001-I-A
Fecha de Informe: 2023-07-28

Hoja 02 de 03

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica

Contratante: ***

Contratista: ***

Fiscalizador: ***

NORMA DE REFERENCIA: ASTM C109/C109M

FECHA DE ENSAYO: Indicadas

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo %	Edad (días)	Masa (g)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
11	030-I-H-11	Patrón: Ctawa 56 días	2023-02-01	2023-03-29	110	56	197,337	1,27	0,5
12	030-I-H-12	Patrón: Ctawa 56 días	2023-02-01	2023-03-29	110	56	196,833	1,56	0,7
13	030-I-H-13	Patrón: Pifo 56 días	2023-02-02	2023-03-30	110	56	189,699	1,72	0,7
14	030-I-H-14	Patrón: Pifo 56 días	2023-02-02	2023-03-30	110	56	207,073	1,49	0,6
15	030-I-H-15	Ceniza 5% 56 días	2023-02-08	2023-04-05	108,3	56	199,240	1,34	0,5
16	030-I-H-16	Ceniza 5% 56 días	2023-02-08	2023-04-05	108,3	56	196,930	1,51	0,6
17	030-I-H-17	Ceniza 10% 56 días	2023-02-15	2023-04-12	108,7	56	205,534	1,72	0,7
18	030-I-H-18	Ceniza 10% 56 días	2023-02-15	2023-04-12	108,7	56	205,319	1,80	0,7
19	030-I-H-19	Ceniza 20% 56 días	2023-02-22	2023-04-19	107,7	56	212,624	1,99	0,8
20	030-I-H-20	Ceniza 20% 56 días	2023-02-22	2023-04-19	107,7	56	213,249	1,92	0,8

Observaciones:

El presente informe reemplaza al informe: CCM-23-001-I.
El cambio se realiza por solicitud del cliente modificándose el porcentaje de flujo para los ítems de 5%, 10% y 20%, así como la descripción de los ítems de ensayo.
La información proporcionada por el cliente, tal como descripción y fecha de fábrica, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing. Mercedes Villacis
JEFE DE LABORATORIO



Tel.: 2976300
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

Código de Informe: CCM-23-001-4-A
Fecha de Informe: 2023-07-28

Hoja 03 de 03

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: Jonathan Abel Villa Orozco
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía
Teléfono: 0960494705

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio de morteros para preparación arqueológica y patrimonial - Morteros mezcla de cal - ceniza volcánica
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***

NORMA DE REFERENCIA: ASTM C109/C109M

FECHA DE ENSAYO: Indicadas

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo %	Edad (días)	Masa (g)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
21	030-I-H-21	Patrón: Clawa 90 días	2023-02-01	2023-05-02	110	90	197,703	1,32	0,5
22	030-I-H-22	Patrón: Clawa 90 días	2023-02-01	2023-05-02	110	90	197,702	1,47	0,6
23	030-I-H-23	Patrón: Pífo 90 días	2023-02-02	2023-05-03	110	90	210,822	2,09	0,8
24	030-I-H-24	Patrón: Pífo 90 días	2023-02-02	2023-05-03	110	90	208,467	2,05	0,8
25	030-I-H-25	Ceniza 5% 90 días	2023-02-08	2023-05-09	108,3	90	202,602	1,80	0,7
26	030-I-H-26	Ceniza 5% 90 días	2023-02-08	2023-05-09	108,3	90	204,912	2,06	0,8
27	030-I-H-27	Ceniza 10% 90 días	2023-02-15	2023-05-16	108,7	90	212,174	2,15	0,8
28	030-I-H-28	Ceniza 10% 90 días	2023-02-15	2023-05-16	108,7	90	205,725	1,91	0,8
29	030-I-H-29	Ceniza 20% 90 días	2023-02-22	2023-05-23	107,7	90	216,65	2,48	1,0
30	030-I-H-30	Ceniza 20% 90 días	2023-02-22	2023-05-23	107,7	90	214,12	2,48	1,0

Observaciones:

El presente informe reemplaza al informe CCM-23-001-1.
El cambio se realiza por solicitud del cliente modificándose el porcentaje de flujo para los ítems de 5%, 10% y 20%, así como la descripción de los ítems de ensayo.
La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, ubicación y profundidad, involucra su total responsabilidad.
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio.
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

Ing Mercedes Villacis
JEFE DE LABORATORIO



Tel.: 2976300
Ext.: 1609