UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Aprovechamiento de finos residuales de Dunita Serpentinizada provenientes de cantera como reemplazo parcial del agregado fino en mortero de revoque y su efecto en la resistencia y respuesta al intemperismo acelerado

Jonatan Alexander Arboleda Monsalve

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Modalidad de Práctica

Trabajo de Grado

Asesoras

Eliana Patricia Llano Cardona, Doctor (PhD) en Ingeniería de Materiales

Gloria María Restrepo Vásquez, Doctor (PhD) en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	(Arboleda, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Arboleda, J. (2025). *Aprovechamiento de finos residuales de Dunita Serpentinizada provenientes de cantera como reemplazo parcial del agregado fino en mortero de revoque y su efecto en la resistencia y respuesta al intemperismo acelerado* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Grupo de Investigación. Procesos Fisicoquímicos Aplicados (PFA)

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Al enigma del cerebro humano y al *dueño supremo* del conocimiento

Agradecimientos

Infinita gratitud por su presencia en mi vida y su apoyo incondicional a mi compañero Viktor, a mi hermano Duban (cuya colaboración se extendió desde la vida cotidiana hasta las tareas de campo de esta investigación) y a mi familia (padres, tías, tíos, abuela, primas).

Agradezco al equipo del grupo de investigación Procesos Fisicoquímicos Aplicados, en el cual me desempeñé como Joven Investigador, y de manera especial a las asesoras de este trabajo de grado: la doctora Gloria, coordinadora del grupo, y la doctora Eliana, líder del proyecto que dio origen a esta investigación. Su orientación y acompañamiento constante, tanto en los últimos años como durante el desarrollo de este estudio, fueron esenciales para la materialización de este documento.

Gracias a mis amigos, compañeros y docentes por las múltiples formas en las que me inspiraron, contribuyeron a mi formación y acompañaron mi experiencia universitaria.

Agradezco a los laboratorios del grupo PFA, al Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Facultad de ingeniería de la Universidad de Antioquia, al Laboratorio de Civil del área de laboratorios de EPM, y al profesor Julián Lenis por facilitarme el uso de equipos, aparatos e instalaciones.

Gracias también al Gobierno de Colombia por posibilitarme el acceso a la educación en todos los niveles y a la UdeA, por haber sido el escenario donde transcurrieron unos años valiosos y gratificantes que marcaron un periodo de crecimiento y aprendizaje profundo en mi vida.

Tabla de contenido

Resumen 12

Abstract 13

1. Introducción 14

2. Objetivos 16

2.1. Objetivo general 16

2.2. Objetivos específicos 16

3. MARCO TEÓRICO 17

3.1. Mortero 17

3.1.1. Usos del mortero 18

3.1.2. Calidad de la arena para morteros 21

3.1.3. Durabilidad 22

3.2. Mecanismos de reacción entre compuestos cementantes y FFRR en morteros 23

3.2.1. Cemento hidráulico 23

3.2.2. Reacciones puzolánicas 24

3.2.3. Activadores Alcalinos 26

3.3. Intemperismo acelerado 27

3.4. Unidad Metaharzburgítica de Medellín: “Dunita Serpentinizada” en el valle de Aburrá 27

3.4.1. Composición y mineralogía de la Dunita Serpentinizada 29

3.5. Generación de FFRR en la explotación de áridos en cantera 31

3.6. Mineralogía de FFRR de cantera y su efecto en mezclas cementicias 33

4. Metodología 37

4.1 Revisión bibliográfica 37

4.2 Caracterización de materiales 38
4.2.1 FFRR de cantera 38
4.2.2 Arena 44
4.2.3 Cemento 48
4.2.4 Agua 49
4.3 Etapa experimental 50
4.3.1 Pruebas de desempeño 50
4.3.2 Pruebas de intemperismo acelerado 56
4.3.3 Pruebas en campo 58
4.4 Esquema resumen 62
5 Análisis de resultados 63
5.1 Caracterización de los FFRR 63
5.2 Caracterización de la arena 68
5.3 Control de expansión durante curado del mortero 70
5.4 Fluidez 72
5.5 Pruebas de desempeño 73
5.5.1 Resistencia a la compresión simple 73
5.5.2 Absorción de agua por capilaridad 75
5.6 Pruebas de intemperismo acelerado 77
5.6.1 Resistencia a la compresión simple 77
5.6.2 Microscopía electrónica de barrido 80
5.7 Pruebas de campo 83
5.7.1 Integridad del revoque 83
5.7.2 Control de calidad 84

6 Conclusiones y recomendaciones 88

6.1 Conclusiones 88

6.2 Recomendaciones 89

Referencias 91

Anexos 98

Lista de tablas

Tabla 1 Uso de los morteros de cemento 19

Tabla 2 Requisitos generales para morteros (Tabla D.3.4-1, NRS-10) 20

Tabla 3 Fluidez recomendada del mortero para diversos tipos de estructuras y condiciones de colocación 21

Tabla 4 Gradación del agregado para uso en revoques a base de cemento Portland 22

Tabla 5 Contenido de óxidos en muestras de Dunita Serpentinizada tomadas cerca de la zona de origen de los FFRR usados en este estudio 31

Tabla 6 Principales componentes de algunos FFRR de canteras. 35

Tabla 7 Especificaciones técnicas del cemento gris de uso general 49

Tabla 8 Dosificación mezclas de mortero de revoque 51

Tabla 9 Especificaciones técnicas del ciclo de intemperismo acelerado 56

Tabla 10 Caracterización inicial del lodo 63

Tabla 11 Resultados de prueba para determinar el tamaño de partícula por difracción láser 64

Tabla 12 Óxidos presentes en la muestra de FFRR 64

Tabla 13 Composición mineralógica de la muestra de FFRR 65

Tabla 14 Resultados EDS sobre las superficies de la muestra 66

Tabla 15 Distribución de tamaño de partícula de la arena 68

Tabla 16 Parámetros de gradación y finura de la arena 68

Tabla 17 Resultados de ensayos de densidad y absorción 69

Tabla 18 Fluidez de los morteros 72

Tabla 19 Resultados EDS sobre las superficies de las muestras 81

Lista de figuras

Figura 1 Fabricación del Cemento Portland por vía seca 23

Figura 2 Hidratación del cemento Portland 24

Figura 3 Síntesis esquemática de reacciones puzolánicas.....26

Figura 4 Mapa geológico del área circundante a la zona de origen de los FFRR.....28

Figura 5 Distribución mineralógica típica en rocas ígneas y en los magmas que las generan 29

Figura 6 Diagrama de la clasificación de rocas ultramáficas (ultrabásicas) basada en los contenidos de Olivino-Piroxenos. 30

Figura 7 Proceso de extracción de materiales en cantera.....32

Figura 8 Funcionamiento típico de lavado y disposición de residuos en una cantera 33

Figura 9 FFRR en diferentes estados 38

Figura 10 FFRR Observados con microscopio digital. 39

Figura 11 Analizador de tamaño de partícula por difracción láser 39

Figura 12 Ensayo de Límite líquido y límite plástico 40

Figura 13 Muestras en Mufla para ensayo de contenido de materia orgánica por ignición.....41

Figura 14 Montaje experimental para ensayo de Actividad puzolánica por método de Chapelle 42

Figura 15 Ensayo para medición de pH en muestras de FFRR.....42

Figura 16 Ensayo para determinar la conductividad del residuo 43

Figura 17 Microscopio electrónico de barrido 44

Figura 18 Arena de revoque utilizada en este estudio.....45

Figura 19 Determinación del tamaño de partículas mediante método mecánico.....46

Figura 20 Ensayo de densidad relativa y absorción. 47

Figura 21 Ensayo de densidad bulk 47

Figura 22 Ensayo para determinar impurezas orgánicas por colorimetría.....48

Figura 23 Esquema del plan experimental inicial.....50

Figura 24 Elaboración cubos de mortero.....52

Figura 25 Probetas en recipiente de curado.....53

Figura 26 Máquina multi ensayos usada para pruebas de resistencia a la compresión simple.....53

Figura 27 Control de expansión durante curado- medición con calibrador Vernier.....54

Figura 28 Ejecución ensayos de absorción de agua por capilaridad.....55

Figura 29 Porta muestras con probetas para cámara de intemperismo acelerado.....56

Figura 30 Cámara QUV.....57

Figura 31 Esquema diseño experimental para pruebas de intemperismo acelerado.....58

Figura 32 Preparación previa de la superficie para prueba de campo.....59

Figura 33 Pared de prueba lista para la aplicación.....59

Figura 34 Aplicación del mortero de revoque sobre la pared de prueba.....60

Figura 35 Rociado de agua durante el curado y pared completa en proceso de secado.....60

Figura 36 Prueba con esclerómetro.....61

Figura 37 Diagrama resumen de la metodología.....62

Figura 38 Distribución del tamaño de partícula del material fino residual.....63

Figura 39 Difractograma de rayos X (DRX).....65

Figura 40 FFRR bajo microscopio electrónico de barrido.....66

Figura 41 Curva granulométrica de la arena.....68

Figura 42 Resultados del ensayo de impurezas orgánicas en la arena por colorimetría.....69

Figura 43 Variación en las dimensiones de las probetas.....70

Figura 44 Fracturas de cubos de mortero.....73

Figura 45 Resistencia a la compresión simple vs. Días de curado.....73

Figura 46 Absorción capilar en g/100 cm^2 75

Figura 47 Absorción capilar relativa 75

Figura 48 Fracturas de cubos de mortero sometidos a intemperismo acelerado 77

Figura 49 Resistencia a la compresión simple vs. Horas de intemperismo acelerado 77

Figura 50 Variación de masa de las probetas vs. Horas de intemperismo acelerado 78

Figura 51 Imágenes por microscopía electrónica de barrido para FR00 80

Figura 52 Imágenes por microscopía electrónica de barrido para FR20 80

Figura 53 Imágenes por microscopía electrónica de barrido para FR30 81

Figura 54 Grietas en pared revocada con FR30 83

Figura 55 Paños revocados con las diferentes dosificaciones 83

Figura 56 Prueba de raya con palustre sobre los paños revocados 84

Figura 57 Resistencia a la compresión simple vs. Índice de revote a los 28 días 85

Figura 58 Marcas dejadas por el esclerómetro sobre los paños de revoque 85

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials — Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte
ASTM	American Society for Testing and Materials — Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
DRX	Difracción de Rayos X — (en inglés: XRD, X-Ray Diffraction)
EDS	Espectroscopía de Energía Dispersiva (acoplada a SEM para análisis químico) (en inglés: Energy Dispersive Spectroscopy)
FFRR	Finos residuales
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
INVIAS	Instituto Nacional de Vías (Colombia)
Mm	Milímetro(s)
MPa	Megapascales
NTC	Norma técnca colombiana
QUV	Equipo de intemperismo acelerado
RCS	Resistencia a la compresión simple
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido (en inglés: Scanning Electron Microscope)
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje (Colombia)
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos
XRF	Fluorescencia de Rayos X—(en inglés: X-Ray Fluorescence)
µm	Micrómetro (micra)

Resumen

Se utilizaron finos residuales (FFRR) generados durante la producción de agregados en una cantera de Dunita Serpentinizada, caracterizados mediante ensayos físicos, mecánicos y mineralógicos. Con este material se elaboraron morteros de revoque sustituyendo parcialmente la arena en proporciones de 0 %, 10 %, 20 % y 30 %. En cada mezcla se evaluó la absorción de agua por capilaridad a los 28 días y la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días. Durante el curado se monitorearon variaciones dimensionales para descartar expansión o contracción. Probetas curadas durante 28 días fueron secadas al horno y sometidas a ciclos de intemperismo acelerado de 192, 384 y 576 h en cámara QUV, con exposición a radiación ultravioleta y variaciones de humedad y temperatura. Tras cada ciclo se evaluó la resistencia a compresión y se seleccionaron algunas muestras para microscopía electrónica de barrido. Finalmente, se realizaron pruebas de campo aplicando los morteros sobre una pared para observar su desempeño en condiciones reales.

Los resultados mostraron que el FFRR es un material ultramáfico, muy fino y con alto contenido amorfo, que actúa principalmente como micro relleno. En compresión, las mezclas con residuo igualaron o superaron al control, destacando FR20 con 2,9 MPa a 28 días (≈7 % superior a FR00). La absorción capilar reveló que FR20 constituye un punto crítico, pues presenta mayor succión inicial, lo que puede comprometer la durabilidad. Las pruebas QUV evidenciaron buena resistencia global, aunque en obra FR20 y FR30 presentaron fisuras por retracción plástica. Los hallazgos identifican al 20 % de sustitución como formulación umbral, donde los beneficios comienzan a equilibrarse con los riesgos.

Palabras clave: Mortero de revoque, finos residuales, cantera, Dunita Serpentinizada, economía circular.

Abstract

Residual fines (FFRR) generated during aggregate production from a Serpentinized Dunite quarry were characterized through physical, mechanical, and mineralogical tests. Plaster mortars were produced by partially replacing sand with FFRR at 0 %, 10 %, 20 %, and 30 %. For each mixture, water absorption by capillarity was measured at 28 days, and compressive strength was tested at 7, 14, and 28 days. Dimensional variations were monitored during curing to rule out expansion or contraction. Specimens cured for 28 days were oven-dried and subjected to accelerated weathering cycles of 192, 384, and 576 h in a QUV chamber, alternating ultraviolet radiation and variations in humidity and temperature. After each cycle, compressive strength was assessed, and selected samples were analyzed by scanning electron microscopy. Finally, field tests were conducted by applying the mortars on a wall to evaluate their performance under real conditions.

The results showed that FFRR is an ultramafic, highly fine material with a high amorphous content, acting mainly as a microfiller. In compression, mortars with FFRR equaled or exceeded the control, with FR20 reaching 2.9 MPa at 28 days (≈7% higher than FR00). Capillary absorption revealed FR20 as a critical point, since it exhibited higher initial suction, which may compromise durability. QUV tests indicated good overall resistance; however, in field applications FR20 and FR30 developed early plastic shrinkage cracks. The findings identify 20 % replacement as a threshold formulation, where the benefits begin to balance against the associated risks.

Keywords: Plaster mortar, residual fines, quarry, Serpentinized Dunite, circular economy

1. Introducción

La producción, fabricación y uso de materiales de construcción seguirán incrementándose según previsiones, debido a la creciente demanda de infraestructura a nivel mundial. Este aumento genera serios impactos ambientales que reflejan la urgente necesidad de implementar estrategias sostenibles para contribuir a la preservación del planeta. La extracción de materia prima para materiales de construcción ocasiona deterioro del paisaje y la biodiversidad en las áreas de explotación, así como erosión, deforestación y contaminación del aire, el agua y el suelo por la emisión de gases y el vertimiento de residuos sólidos y líquidos. (Álvarez et al., 2023)

Según datos del 2020 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE citado en Álvarez et al., (2023), el sector de la construcción en Colombia es responsable de aproximadamente el 60 % del consumo de recursos no renovables, del 40 % de la demanda energética, contribuye con el 30 % de las emisiones de CO_2 y produce residuos que exceden el 20 % del total de los materiales empleados en la ejecución de proyectos constructivos. Alrededor de 35 mil millones de toneladas de material de cantera se producen anualmente en todo el mundo, generando grandes cantidades de residuos mediante el proceso de trituración de la roca y lavado de los productos (de Matos et al., 2020); según la Unidad de Planeación Minero-Energética (Álvarez et al., 2023), unidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía de Colombia, en el país durante el 2023 se extrajeron 19,74 millones de metros cúbicos de materiales de construcción (asfaltita, diabasas, gravas, arenas y recebos). Se estima que aproximadamente el 1 % de la piedra gruesa triturada en una cantera se convierte en residuo y en cuanto a árido fino producido respecta, el porcentaje de residuos es de aproximadamente el 5 % (Polydorou et al., 2021).

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante (cemento o cal), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos; los morteros de cemento son los más utilizados en Colombia para pega de ladrillos y baldosines, impermeabilizaciones, revoques, rellenos, pisos y mampostería en general (Gutierrez, 2003). El revoque es un sistema de recubrimiento compuesto por una o múltiples capas de mortero, aplicadas sobre paredes y cielorrasos (SENA, 2003). Para preparar la mezcla de revoque se utiliza una arena fina, conocida de forma coloquial como *arena de revoque*, cuya producción generalmente no está industrializada; por lo tanto, su origen es natural y se extrae de ríos y quebradas (Argos, s/f). En

otros lugares como en Bogotá, se usa *arena de peña* explotada en cantera sin ser sometida a lavado (Sánchez, 2001)

Los finos residuales (FFRR) utilizados en este estudio proceden de una cantera ubicada al norte del Valle de Aburrá. La empresa que actualmente explota el yacimiento reporta el material como "Dunita Serpentinizada" (Argos Colombia, n.d.-b); denominación tradicionalmente empleada en la industria local, al tratarse de un afloramiento de la unidad conocida como "Dunita de Medellín". Sin embargo, la investigación petrográfica y geoquímica actual ha revelado que, a pesar de dos eventos metamórficos subsecuentes que "oscurecieron su composición mineralógica primaria", esta unidad tiene una naturaleza predominantemente harzburgítica, razón por la cual se propuso el nombre de "Unidad Metaharzburgítica de Medellín" para unir en una sola expresión el origen geológico de estas rocas y el metamorfismo que las afectó (García-Casco et al., 2020; Servicio Geológico Colombiano, 2020). García-Casco et al. (2020) estudiaron 49 muestras de esta unidad (unas reportadas en la literatura y otras propias) encontrando que los óxidos mayoritarios presentes en la roca son el óxido de magnesio (MgO) y el dióxido de silicio (SiO_2) con rangos en porcentaje del peso de entre 32.65-51.34 % y 34.13-48.14 % respectivamente.

Para el desarrollo de este trabajo se acogió el nombre "Dunita Serpentinizada" al referirse a la roca del punto específico de extracción, con el fin de mantener coherencia con la nomenclatura utilizada en el ámbito productivo. Se evaluó el aprovechamiento de los FFRR generados en esa cantera, incorporándolos en mortero de revoque como reemplazo parcial de la arena y sometiéndolos a pruebas de desempeño mecánico y ensayos de intemperismo acelerado; estos últimos son inusuales en los estudios realizados al mortero y buscan simular y comprender cómo estos materiales responden a largos periodos de exposición a factores ambientales como la radiación ultravioleta, la humedad y los cambios de temperatura, evaluando técnicamente el desempeño de estos morteros a largo plazo. Previo a la formulación de mezclas, tanto los residuos finos de roca como la arena de referencia fueron caracterizados física y químicamente bajo estándares nacionales (NTC, INVIAS) e internacionales (ASTM), con el fin de asegurar la calidad, trazabilidad y comparabilidad de los resultados. Aunque se han desarrollado múltiples estudios sobre el uso y comportamiento de FFRR de distintas fuentes en morteros, no se han hallado reportes de estudios centrados en esta roca en particular.

Frente al impacto ambiental derivado de las actividades extractivas, el enfoque de economía circular adquiere relevancia al proponer estrategias de aprovechamiento y reincorporación de subproductos al ciclo productivo, mediante procesos que permitan su valorización como insumos útiles en nuevas aplicaciones industriales (Kępniak & Łukowski, 2024). En este sentido, este trabajo demuestra el potencial de estos FFRR para que se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, proponiendo soluciones técnicas que pueden integrarse en prácticas locales de edificación, prolongando la vida útil de los residuos de la industria extractiva al reconceptualizarlos como materias primas secundarias, reduciendo la generación de desechos y la extracción de arenas de río o cantera contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la incorporación de diferentes proporciones de finos residuales provenientes de una cantera en las propiedades físicas y mecánicas de un mortero de revoque, bajo condiciones de intemperismo acelerado como estrategia de aprovechamiento del residuo.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar la fórmula de trabajo para las mezclas de mortero que incorporen diferentes proporciones de FFRR de cantera.
- Evaluar en campo y laboratorio el desempeño de los morteros modificados mediante ensayos convencionales y pruebas de intemperismo acelerado utilizando probetas estándar.
- Analizar los resultados obtenidos comparando el desempeño de los morteros con y sin incorporación de FFRR antes y después de ser sometidos a condiciones de intemperismo acelerado.

3. MARCO TEÓRICO

En investigaciones previas se han incorporado materiales FFRR (nombrados a veces como lodos residuales o polvo de cantera) en morteros, buscando estrategias para su disposición final; estos se han trabajado calcinados y sin calcinar, procedentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Chen & Poon, 2017; Grabowski et al., 2023; Guerrero & Regalado, 2021; Serna, 2020), Plantas de Tratamiento de Agua Potable (Daza, 2022; Daza & Medina, 2018; Jia et al., 2022; Márquez, 2009) canteras de distintos tipos de rocas como arenisca, basalto, caliza, cuarcita, diabasa, dolomita, granito y mármol (Altheeb, 2022; Cohen et al., 2019; He et al., 2021; Polydorou et al., 2021; Singh et al., 2019) y otros provenientes de diversos tipos de industria como cuero (Karthikeyan et al., 2014), piscicultura (S. Rodríguez, 2022), vidrio (Chen & Poon, 2017; Mymrin et al., 2020) y minería de metales base (Jiménez et al., 2023; Larenas, 2024). Se ha concluido que estos residuos pueden ser empleados como reemplazo del material cementante o como reemplazo del agregado fino, mejorando en algunos casos las propiedades mecánicas de los morteros. Sin embargo, el desempeño de estas mezclas depende significativamente de la composición química del residuo, su mineralogía y la dosificación empleada. Si bien el uso de FFRR en materiales de construcción ha sido objeto de numerosos estudios, la integración en morteros de estos residuos generados en la explotación de Dunita Serpentinizada representa un área de investigación menos explorada.

3.1. Mortero

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante, un material de relleno (arena o agregado fino), agua y a veces aditivos (plastificantes, aireantes, acelerantes, retardantes, etc.) similar al hormigón, pero sin agregado grueso; existen morteros calcáreos que usan cal como aglomerante, morteros de cal y cemento que se caracterizan por su gran trabajabilidad y buena retención de agua, y morteros de cemento. La proporción de material cementicio y arena usada en la mezcla determina su resistencia, fluidez y por ende el uso que pueda hacerse de ella; se pueden diseñar morteros estructurales capaces de soportar cargas y morteros de pega que mantienen unidos los mampuestos en su lugar deseado. Según su proceso de endurecimiento, los morteros se pueden clasificar en dos tipos: los morteros aéreos, que endurecen al exponerse al aire mediante la pérdida

de agua por secado y fraguan de forma lenta a través de la carbonatación, y los morteros hidráulicos, también llamados acuáticos, que tienen la capacidad de endurecer incluso bajo el agua gracias a su composición, la cual les permite alcanzar resistencias iniciales relativamente elevadas. (Sánchez, 2001)

3.1.1. Usos del mortero

Los usos que se le dan principalmente al mortero son: pega de ladrillos en mampostería, revoque, nivel de pisos y rellenos.

El *mortero de pega* es usado para unir las unidades de mampostería. Dentro de los morteros de pega están los de mampostería simple, es decir, donde no hay inclusión de acero de refuerzo ni rellenos estructurales (ASTM C-270) y los de mampostería reforzada (ASTM C-476); estos requieren alcanzar cierta resistencia a la compresión según su tipo.

El *mortero de revoque*, también conocido comúnmente como pañete, repello, aplanado, enlucido, o enfoscado, es un sistema de recubrimiento compuesto por una o múltiples capas de mortero, aplicadas sobre paredes y cielorrasos. Su composición favorece la adherencia, permitiendo que, tras su proceso de endurecimiento, se genere una superficie homogénea y continua, apta para recibir tratamientos de acabado. Este revestimiento es compatible con mamposterías de bloque y ladrillo, estructuras de concreto, metálicas o de madera, sin importar la geometría de la superficie, ya sea plana o curva. (SENA, 2003).

El mortero de cemento hidráulico es el más usado en Colombia y según la relación cemento: arena se pueden categorizar sus usos de la siguiente manera, Tabla 1:

Tabla 1

Uso de los morteros de cemento

MORTERO	USOS
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones. Rellenos
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanques subterráneos. Rellenos
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos
1:5	Pañetes exteriores. Pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:6 y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones

Fuente. (Sánchez, 2001)

El Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente [NRS-10] (2010)Título D-Mampostería estructural y Título E -casas de uno y dos pisos, recopila las normas de ensayos para garantizar la calidad de los materiales y brinda los criterios técnicos que se deben seguir para diseñar moteros de buen desempeño:

> Título D, Capítulo D.3.4 MORTERO DE PEGA
>
> D.3.4.1 — REQUISITOS GENERALES — Los morteros de pega utilizados en construcciones de mampostería deben cumplir la norma NTC 3329 (ASTM C270) y con lo especificado en la Tabla 2. El mortero premezclado para pega de unidades de mampostería debe cumplir con la norma NTC 3356 (ASTM C1142). Los morteros de pega deben tener buena plasticidad, consistencia y ser capaces de retener el agua mínima para la hidratación del cemento y, además, garantizar su adherencia con las unidades de mampostería para desarrollar su acción cementante, Tabla 2.

Tabla 2

Requisitos generales para morteros (Tabla D.3.4-1, NRS-10)

Mortero Tipo	Especificación de los morteros por propiedad (1)			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la compresión fc'(MPa) (2)	Flujo en (%) (3)	Retención mínima de agua	Cemento Portland	Cal hidratada (4)	Cemento para mampostería (7)	Arena/Material cementante (5)	
							Mín.	Máx.
H	22,5	115-125	75 %	1	0,25	no aplica	2,00	2,5
M	17,5	115-125	75 %	1	0,25	no aplica	2,25	3,0
				1	no aplica	1	2,25	2,5
S	12,5	110-120	75 %	1	0,25 a 0,50	no aplica	2,50	3,5
				0,5	no aplica	1	2,50	3,0
N(6)	7,5	105-115	75 %	1	0,50 a 1,25	no aplica	3,00	4,5
				0	no aplica	1	3,00	4,0

Notas.

1. Solo para el diseño de mezclas de morteros en laboratorio, con base en los materiales que van a ser utilizados en obra. El control de morteros en obra se debe realizar de acuerdo con la norma NTC 3546 (ASTM C780).
2. Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días en cubos de 50 mm de lado.
3. Ensayo realizado según NTC 4050 (ASTM C91).
4. Se puede utilizar cal hidratada en polvo tipo N o S.
5. Para este cálculo no se incluye como cementante la cal.
6. El mortero tipo N solo se permite en sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (*DMI*).
7. El tipo de cemento para mampostería (M, S o N) será el mismo que el tipo de mortero de pega.

Fuente. (Ministerio de Ambiente, 2010)

Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción. (NRS-10)

Título D, Capítulo D.12.1.2.3 — Mortero de revoque — Los morteros de recubrimiento o de revoque (pañete) son similares a los morteros de pega descritos en D.3.4, pero utilizando arenas finas que cumplan con las especificaciones de las Normas ASTM C-926 y ASTM C-897.

Título E, Capítulo E.7.4.3.1 — La calidad del mortero de cemento para el revoque de muros y para el relleno de cañutos se regirá por D.3.4. La clasificación mínima requerida será la correspondiente al mortero tipo N, con una proporción en volumen de máximo 4 partes de arena por una parte de cementante.

Otra propiedad importante del mortero es la *fluidez* (manejabilidad) que se determina siguiendo la norma NTC-111 (ICONTEC, 1997). según la fluidez, se categorizan los siguientes usos, Tabla 3:

Tabla 3
Fluidez recomendada del mortero para diversos tipos de estructuras y condiciones de colocación

CONSIS-TENCIA	FLUIDEZ %	CONDICIÓN DE COLOCACIÓN	EJEMPLO DE TIPOS DE ESTRUCTURA	EJEMPLO DE SISTEMA DE COLOCACIÓN
Dura (seca)	80 - 100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
Media (plástica)	100 - 120	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres
Fluida (húmeda)	120 - 150	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección

Fuente. (Sánchez, 2001).

3.1.2. Calidad de la arena para morteros

Existen recomendaciones como las de Sánchez (2001), en las que se habla de la limpieza de la arena:

> Los morteros 1:1 a 1:3 son morteros de gran resistencia y deben hacerse con arena limpia. Los morteros 1:4 a 1:6 se deben hacer con arena limpia o semi lavada y para los morteros 1:7 a 1:9 se puede usar arena sucia, pues estos morteros tienen muy poca resistencia.

En la práctica, cuando la cantidad de material que pasa por la malla No. 200 (75 μm) supera los límites establecidos, el árido solo puede utilizarse después de ser lavado. Esto se debe a que dicho material se considera fino y, por tanto, se asume que contiene arcillas, limos, materia orgánica y otras impurezas que pueden afectar negativamente el fraguado del mortero. (Kan et al., 2020); Por ejemplo, según la Norma ASTM C-897 (Especificación estándar para agregado en

revoques a base de cemento Portland mezclados en obra) el máximo porcentaje permitido de material que pasa el tamiz N.º 200 es del 3 %, Tabla 4.

Tabla 4
Gradación del agregado para uso en revoques a base de cemento Portland

Tamíz No.	Máx.	Mín
4 (4,75 mm)	0	0
8 (2,36 mm)	10	0
16 (1,18 mm)	40	10
30 (600 µm)	65	30
50 (300 µm)	90	70
100 (150 µm)	100	95
200 (75 µm)	100	97

Fuente. (ASTM., 2020).

En manuales prácticos de revoque, por ejemplo, en SENA (2003), se recomienda hacer una verificación visual a la arena fina para revoques: un color del material muy pardo está relacionado con alto contenido de lodos. En (Argos, n.d.) se especifica que es necesario seguir la recomendación de la ASTM, pero se considera aceptable contenido de lodos hasta del 12 %. Un alto contenido de lodos puede generar grietas después de curado y falta de cohesión en el mortero.

3.1.3. Durabilidad

La durabilidad del mortero se define como su capacidad para mantener su integridad y sus propiedades fisicoquímicas a lo largo del tiempo, frente a la acción de diversos factores ambientales que pueden inducir su deterioro. Estos factores incluyen, por ejemplo, la exposición prolongada a ciclos de congelamiento y deshielo, la penetración de agua, el ataque de agentes químicos agresivos (ácidos y sulfatos), la abrasión mecánica, la retracción por secado, así como choques térmicos y la acción de sales o contaminantes presentes en el entorno. Aunque comúnmente se piensa que un mortero más resistente también será más duradero, esta relación no siempre es tan simple ni directa. La durabilidad depende también de otros factores importantes, como la cantidad de poros, cómo están conectados entre sí, la proporción entre agua y cemento en la mezcla, y la calidad de la pasta una vez que se ha endurecido.(Sánchez, 2001)

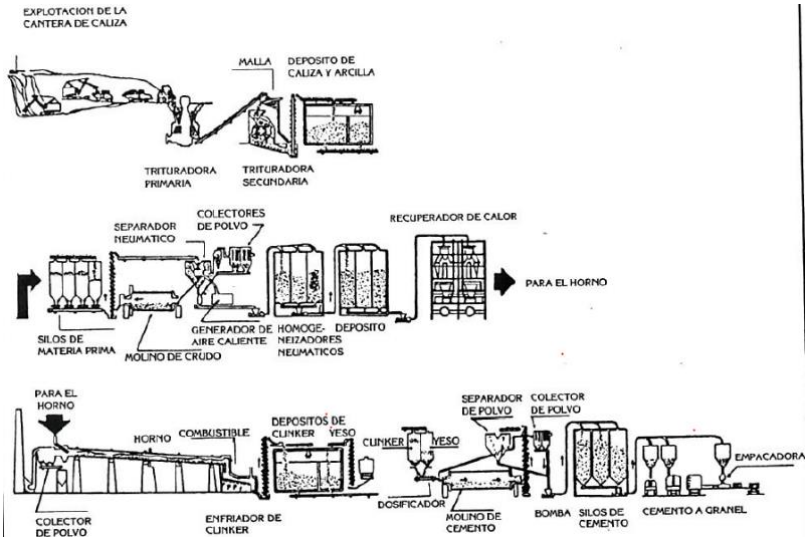
3.2. Mecanismos de reacción entre compuestos cementantes y FFRR en morteros

3.2.1. Cemento hidráulico

El cemento es un polvo de color gris, finamente molido, que se obtiene a partir de la combinación química de materias primas ricas en óxido de calcio (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). Su fabricación se puede llevar a cabo mediante dos tipos de procesos: la vía seca y la vía húmeda. En la actualidad, la vía seca es la más utilizada debido a su mayor eficiencia energética. Este método inicia con la extracción y trituración de las materias primas principales: caliza (fuente de calcio) y arcilla (fuente de sílice, alúmina y óxidos de hierro). Luego, estos materiales se secan y muelen hasta obtener un polvo fino y homogéneo; esta mezcla se introduce en un horno rotatorio, donde se somete a temperaturas cercanas a los 1400 °C; durante este proceso se forman compuestos como Alita (silicato tricálcico-C_3S) y Belita (silicato dicálcico -C_2S) (fases silicatadas) y aluminato de calcio (aluminato tricálcico-C_3A) y ferroaluminato de calcio (ferrita tetracálcica aluminoférrica -C_4AF) (fases aluminosas); las reacciones químicas dan lugar al clínker, un material nodular duro. Finalmente, el clínker se muele junto con una pequeña proporción de yeso para obtener el cemento Portland. (Mehta & Monteiro, 2005; Sánchez, 2001), Figura 1.

Figura 1

Fabricación del Cemento Portland por vía seca

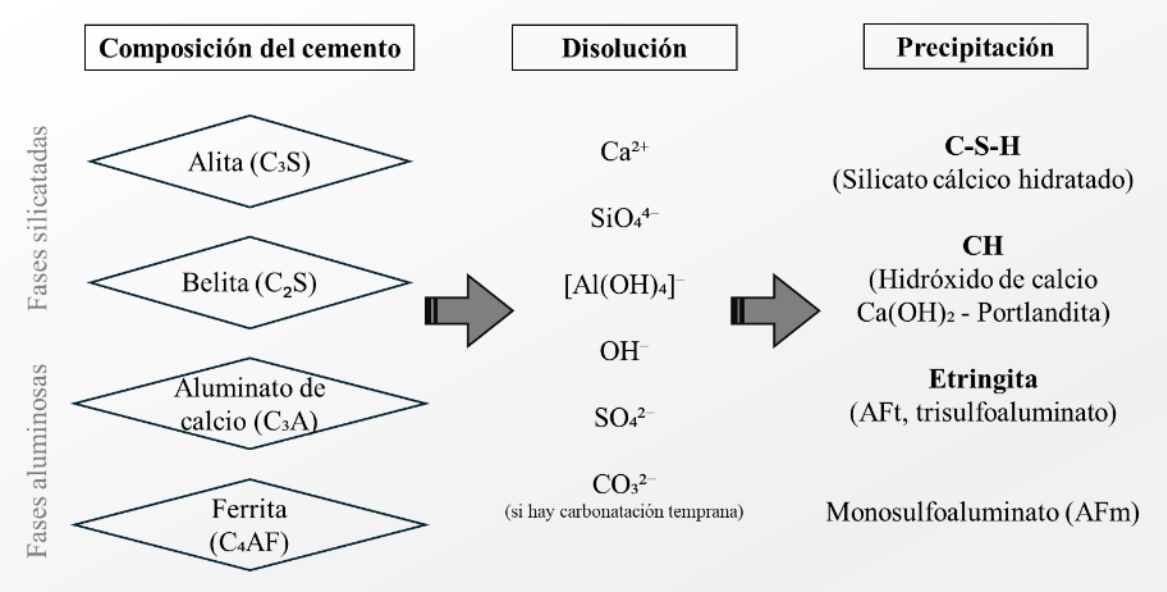


Fuente. (Sánchez, 2001).

La *hidratación del cemento* es un proceso mediante el cual sus componentes reaccionan químicamente con el agua, generando compuestos hidratados que proporcionan cohesión y resistencia a la mezcla. Esta reacción implica la disolución de los compuestos anhidros y la posterior precipitación de productos como el gel C-S-H (calcio-silicato-hidratado) y el hidróxido de calcio (Portlandita) que confieren la resistencia mecánica. El fraguado inicial ocurre por la rápida hidratación de los aluminatos, especialmente el aluminato de Calcio (C_3A), y es controlado por el yeso para evitar un endurecimiento prematuro. Por otro lado, la contribución a la resistencia a largo plazo proviene principalmente de la Alita (C_3S), que reacciona más rápidamente, y de la Belita (C_2S), que reacciona más lentamente, pero confiere mayor durabilidad. (Mehta & Monteiro, 2005), Figura 2.

Figura 2

Hidratación del cemento Portland



Nota. Modificado de Herrera (2019).

3.2.2. Reacciones puzolánicas

Una reacción puzolánica implica la disolución de compuestos amorfos o escasamente cristalinos de sílice y alúmina en un medio altamente alcalino, lo que da lugar a la formación de fases hidratadas de aluminosilicatos de calcio, principalmente en sus formas dicálcica y tricálcica. Este comportamiento se presenta en distintos materiales que pueden ser de origen natural (como

cenizas volcánicas, piedra pómez, otras rocas ígneas y algunos finos y lodos residuales) o artificial (como cenizas volantes, escorias de fundición y cenizas provenientes de residuos agrícolas). La capacidad cementante de estos materiales, conocida como actividad puzolánica, depende de la estructura interna del material, su composición química, el grado de finura alcanzado tras su procesamiento y la temperatura a la que han sido expuestos durante su formación o tratamiento (Llano, 2021; Mehta & Monteiro, 2005)

La norma ASTM C618- Especificación para la ceniza volante de carbón y la puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto., (2003) especifica las características físicas y químicas que debe cumplir cualquier material para que pueda clasificarse en la categoría de aditivo puzolánico. Una de esas características para el caso de las puzolanas naturales (Clase N) es que el contenido de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ debe ser de al menos el 70 %; para garantizar esto se hacen análisis composicionales por fluorescencia de rayos X (XRF); Este método de laboratorio detecta los elementos presentes en una muestra y los reporta como óxidos correspondientes. Lo que interesa en las puzolanas es su capacidad para reaccionar con la portlandita (hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$)) y formar compuestos cementantes. Esta capacidad depende principalmente del contenido de los tres óxidos mencionados.

En cuanto a las propiedades físicas, la norma incluye el requisito de una finura adecuada que favorezca su reactividad, determinada por el porcentaje de material retenido al tamiz 45 µm (No. 325), cuyo valor no debe superar el 34 %. La reactividad de la puzolana se evalúa mediante el índice de actividad con cemento portland, el cual exige alcanzar como mínimo el 75 % de la resistencia a compresión del mortero de referencia a los 7 y 28 días de curado. Con respecto a la demanda de agua (que se evalúa preparando morteros normalizados y ajustando el contenido de agua hasta alcanzar una fluidez de 110 ± 5 %) esta no debe exceder el 115 % (clase N) o el 105 % (clase F) respecto a la del mortero control, a fin de garantizar una trabajabilidad adecuada. Por último, se establece una uniformidad estricta entre lotes, permitiendo una variación máxima del 5 % en densidad y una dispersión de ±5 puntos porcentuales en la fracción retenida al tamiz de 45 µm.

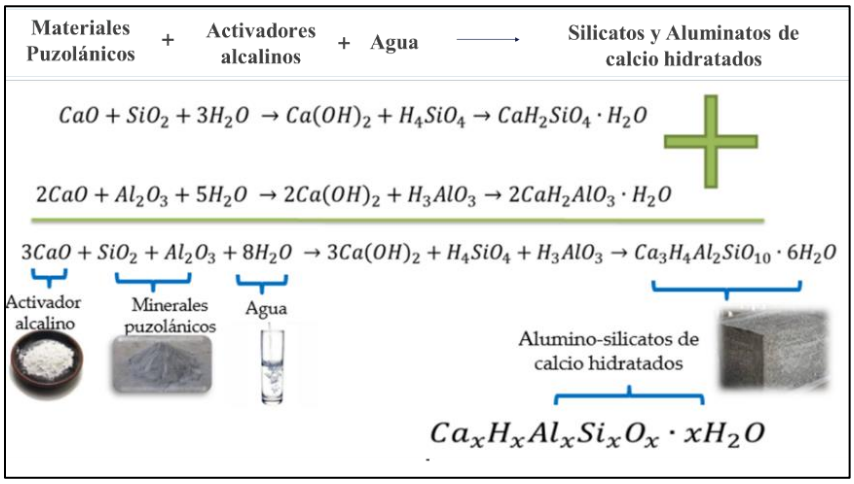
3.2.3. Activadores Alcalinos

En una reacción puzolánica, los activadores alcalinos son los materiales que elevan el pH del medio, condición indispensable para disolver los compuestos de sílice y alúmina presentes en la fuente aluminosilicática. Las fases amorfas o poco cristalinas de la puzolana están formadas por enlaces covalentes muy estables, poco reactivos en condiciones neutras o ácidas. En un medio básico, los iones hidroxilo (OH^-) atacan estos enlaces y rompen la red, liberando especies solubles que reaccionan con el calcio para formar geles hidratados de silicato y aluminosilicato cálcico (C-S-H y C-A-S-H). En medios ácidos, en cambio, predominan los protones (H^+), que solo se adhieren a los oxígenos sin romper eficazmente los enlaces, lo que limita la solubilidad de la sílice y la alúmina. La función principal de los activadores alcalinos es acelerar y sostener la reacción, favoreciendo la formación de hidratos estables y poco solubles que densifican la microestructura y mejoran tanto la resistencia mecánica como la durabilidad del material. Entre los activadores más comunes se encuentran compuestos como hidróxidos, silicatos o carbonatos de sodio y potasio, siendo la cal y el cemento los activadores tradicionalmente empleados en morteros y concretos. (Pacheco-Torgal et al., 2008; Torres-Carrasco & Puertas, 2017)

En la Figura 3 se resume el proceso típico de una reacción puzolánica y se muestra la participación del activador alcalino en ella.

Figura 3

Síntesis esquemática de reacciones puzolánicas



Fuente. (Llano, 2021).

3.3. Intemperismo acelerado

La radiación (ultravioleta, visible e infrarroja), la humedad (rocío, lluvia, nieve) y la temperatura, son variables ambientales que causan modificaciones en la superficie de los materiales, siendo la naturaleza del material un factor influyente en estos cambios. Esta interacción conduce al envejecimiento, un proceso lento e irreversible que afecta las propiedades físicas y químicas del material. Para estudiar la evolución de estas propiedades, se utilizan cámaras de intemperismo o envejecimiento acelerado, que exponen los materiales a ciclos alternados de luz ultravioleta, humedad y temperaturas controladas, simulando en días o semanas los efectos de meses o años de exposición natural. Los daños resultantes incluyen decoloración, erosión, fisuración y pérdida de consistencia. Este método ayuda a evaluar la durabilidad de materiales expuestos al ambiente, ya que permiten estimar su vida útil y conocer cómo se degradan bajo la influencia de factores químicos, mecánicos y energéticos. (Fuentes-Talavera et al., 2015; Llano, 2021)

No existe una equivalencia universal entre las horas de intemperismo acelerado en laboratorio y la exposición natural, ya que la relación varía según la ubicación geográfica, las condiciones climáticas y el protocolo de ensayo utilizado. Aun así, algunos estudios ofrecen referencias particulares: por ejemplo, en pruebas con lámparas fluorescentes UVA-340 se ha estimado que un año de exposición solar en Florida, Estados Unidos, corresponde a unas 2.400 h de intemperismo acelerado en laboratorio sobre elementos de fibra de vidrio. (Zhu & Schoenoff, 2020)

3.4. Unidad Metaharzburgítica de Medellín: “Dunita Serpentinizada” en el valle de Aburrá

En la Cordillera Central de Colombia afloran varios cuerpos ultramáficos que muestran distintos grados de serpentinización y metamorfismo. El más extenso de estos se ha conocido clásicamente como Dunita de Medellín (recientemente Unidad Metaharzburgítica de Medellín) y aflora hacia el oriente y norte del Valle de Aburrá. Este macizo ultramáfico está compuesto por tres afloramientos principales separados por la quebrada Santa Elena y el río Medellín. En conjunto, presenta una orientación noroeste (NNO), con una longitud aproximada de 35 km, un ancho de 5

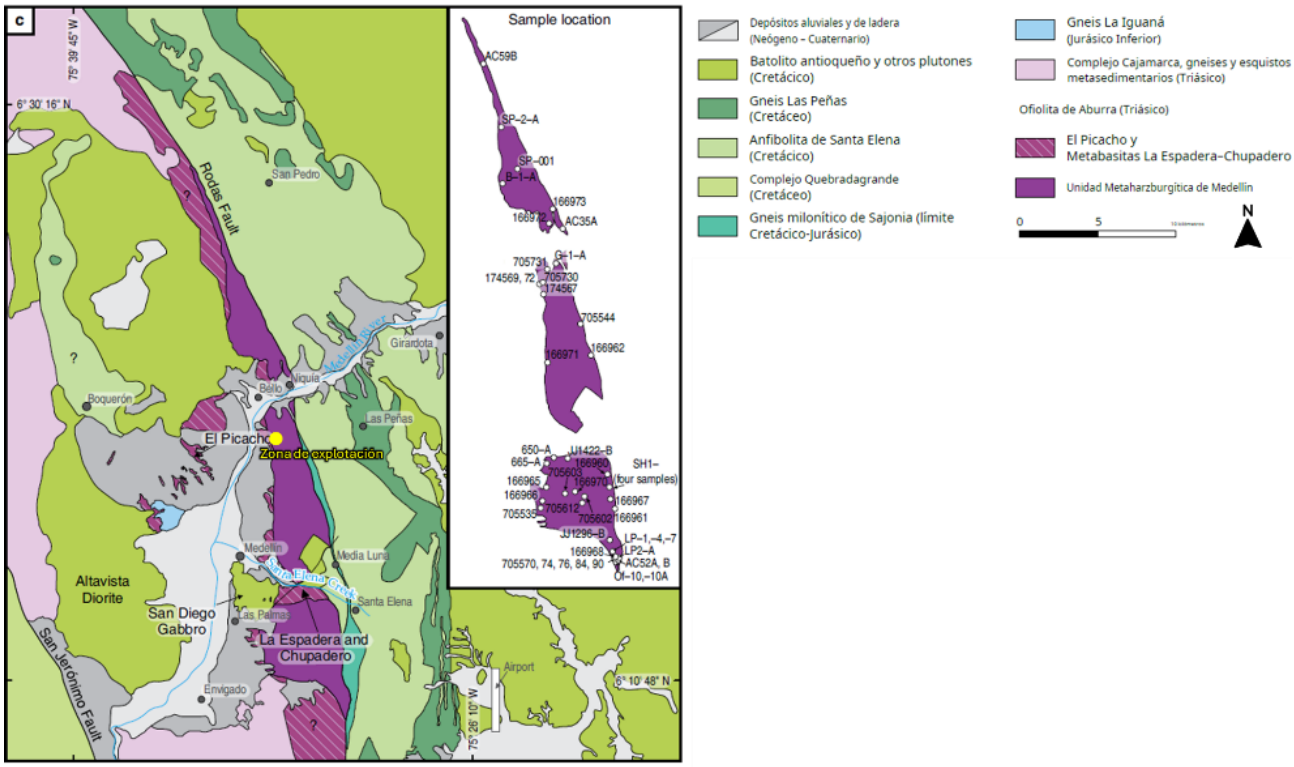
km y una superficie cercana a 71 km², lo que lo convierte en uno de los cuerpos ultramáficos aflorantes más extensos reportados en los Andes. (García-Casco et al., 2020)

En términos simples, este cuerpo representa fragmentos de corteza oceánica que fueron incorporados al continente debido a procesos tectónicos. Estas rocas ultramáficas ricas en olivino constituyen un fragmento de manto litosférico oceánico formado en un ambiente de cuenca de retroarco/arco incipiente emplazado sobre el margen continental occidental de Pangea durante el periodo Triásico. Posteriormente, durante el Cenozoico, estas rocas fueron llevadas hacia la superficie como resultado de la colisión y acreción de placas tectónicas en el contexto de la subducción del océano proto-Caribe bajo el margen noroccidental de América del Sur. (García-Casco et al., 2020)

En la Figura 4 se muestra el punto de explotación en cantera de Dunita Serpentinizada (Argos Colombia, n.d.-b) en un mapa geológico simplificado del Valle de Aburrá (García-Casco et al., 2020)

Figura 4

Mapa geológico del área circundante a la zona de origen de los FFRR



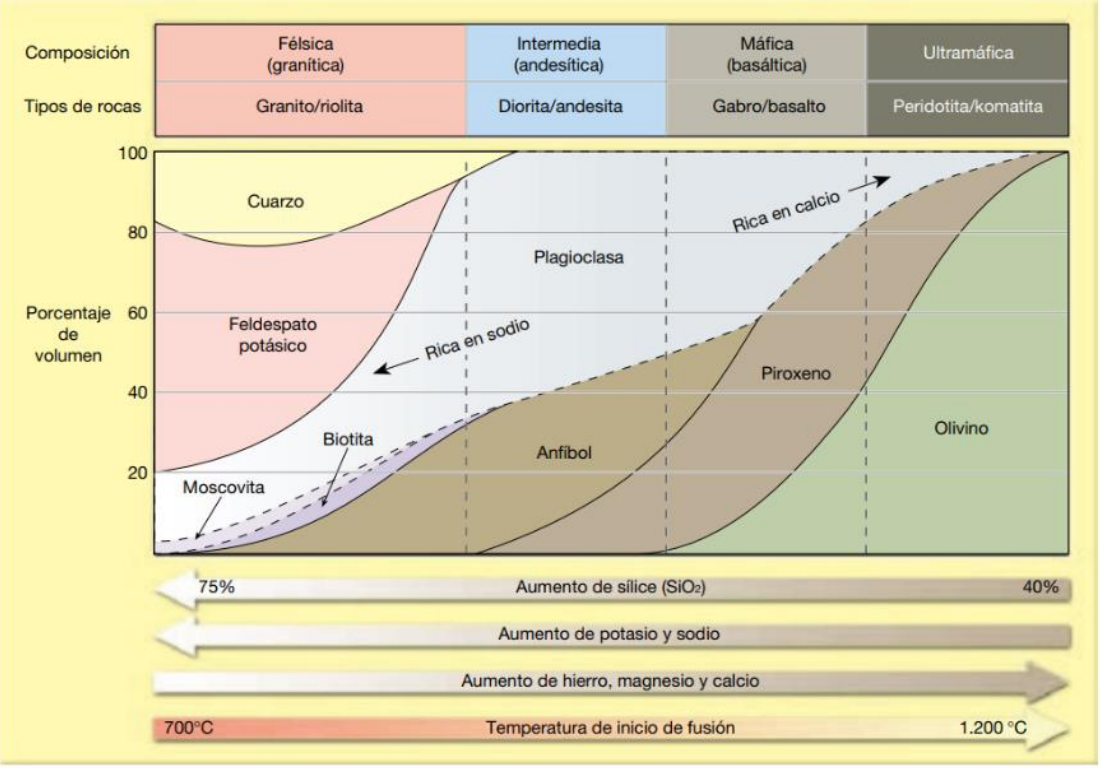
Nota. El punto amarillo representa la ubicación de la cantera. Mapa modificado de García-Casco et al. (2020).

3.4.1. Composición y mineralogía de la Dunita Serpentinizada

Las *rocas ultramáficas* corresponden a la fracción más rica en minerales ferromagnesianos dentro de las ígneas, dominadas principalmente por olivino y piroxenos, con contenidos de sílice inferiores al 45 %. Presentan una mineralogía simple, con escasa participación de feldespatos y cuarzo, y suelen mostrar altas densidades junto con tonalidades verdosas a oscuras. Dentro de esta clasificación se encuentran variedades como la dunita, constituida casi exclusivamente por olivino, la harzburguita, rica en ortopiroxeno, y la wehrlita, con mayor proporción de clinopiroxeno. Estas diferencias composicionales permiten distinguir su posición dentro del grupo de las peridotitas y establecer su importancia como representantes de magmas primitivos de origen mantélico. (Huertas, 2019; Tarbuck et al., 2005), Figura 5 y Figura 6.

Figura 5

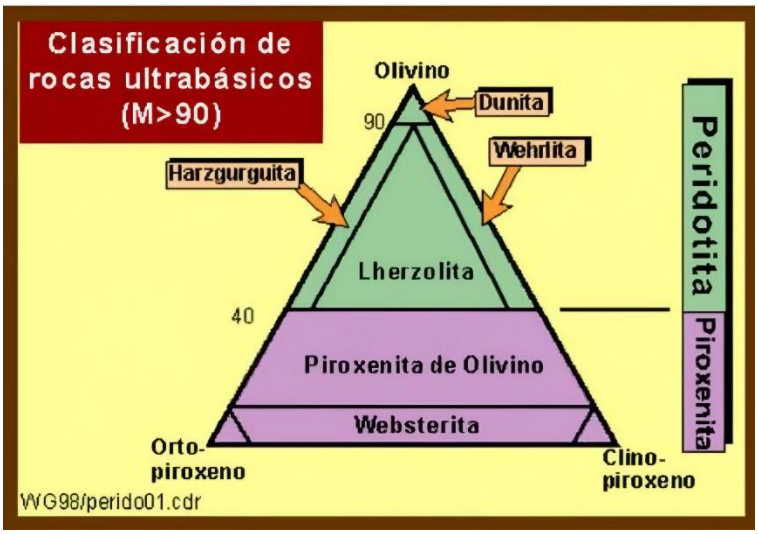
Distribución mineralógica típica en rocas ígneas y en los magmas que las generan



Fuente. (Tarbuck et al., 2005)

Figura 6

Diagrama de la clasificación de rocas ultramáficas (ultrabásicas) basada en los contenidos de Olivino-Piroxenos.



Fuente. (Huertas, 2019)

La *serpentinización* es un proceso metamórfico que ocurre cuando la roca se expone procesos hidrotermales típicamente a temperaturas por debajo de los 500 °C. El olivino reacciona con agua y dióxido de carbono formando minerales hidratados, transformando gran parte de sus minerales primarios en minerales del grupo serpentino como lizardita, antigorita y crisotilo, además de iddingsita, que suele generarse como producto de alteración secundaria del olivino en condiciones más superficiales; este proceso sobreimprime y corta la foliación primaria de las rocas. (García-Casco et al., 2020; Meza-Ochoa et al., 2023).

García-Casco et al. (2020) recopilaron información composicional de 49 muestras representativas de la Unidad Metaharzburgítica de Medellín a partir de ensayos propios y de datos previamente reportados en la literatura. Los resultados muestran que los óxidos mayoritarios en estas rocas son el óxido de magnesio (MgO), con un contenido que oscila entre 32.65-51.34 % y el dióxido de silicio (SiO_2), con valores entre 34.13-48.14 % en peso. Muestras con alto MgO y bajo SiO2 se comparan con composiciones duníticas, mientras que aquellas con alto SiO2 y bajo MgO, sugieren composiciones no duníticas. Es común que el MgO se encuentre integrado estructuralmente dentro de minerales silicatados, como forsterita (Mg_2SiO_4) (la fase magnésica del

olivino) y lizardita (Mg3Si2O5(OH)4.); esto implica que una porción significativa del MgO presente podría estar en una fase cristalina estable.

En la Tabla 5 se presenta la composición de cinco muestras en particular que fueron extraídas cerca de la cantera cuyos FFRR generados son objeto de estudio en este trabajo; en ellas se evidencia un rango ligeramente más bajo al descrito; Resulta consistente suponer que los residuos conservan proporciones semejantes de estos óxidos.

Tabla 5

Contenido de óxidos en muestras de Dunita Serpentinizada tomadas cerca de la zona de origen de los FFRR usados en este estudio

Muestra	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	LOI**	Total	Referencia
705730	40,30	0,02	0,74	0,26	8,08	0,10	39,65	0.04	0,03	0,01	9,74	98,98	Rodríguez et al. (2005)
705731	40,70	0,03	0,62	0,32	7,88	0,12	42,40	0,56	0,20	0,02	6,37	99,21	Rodríguez et al. (2005)
174567	30,12	0,00	9,25	0,19	13,47	0,13	30,00	4,90	0,35	0,02	7,00	95,43	Álvarez (1987)
174569	31,06	0,00	4,06	0,29	10,17	0,09	43,74	0,08	0,01	0,01	9,36	98,87	Álvarez (1987)
174572	32,82	0,00	7,31	0,45	9,98	0,10	38,61	0,01	0,01	0,01	8,93	98,23	Álvarez (1987)

* Fe total expresado como FeO.

** LOI: Pérdida por ignición.

Nota. Las etiquetas de las muestras y los análisis de Álvarez (1987) y Rodríguez et al. (2005) fueron tomados de (García-Casco et al., 2020)

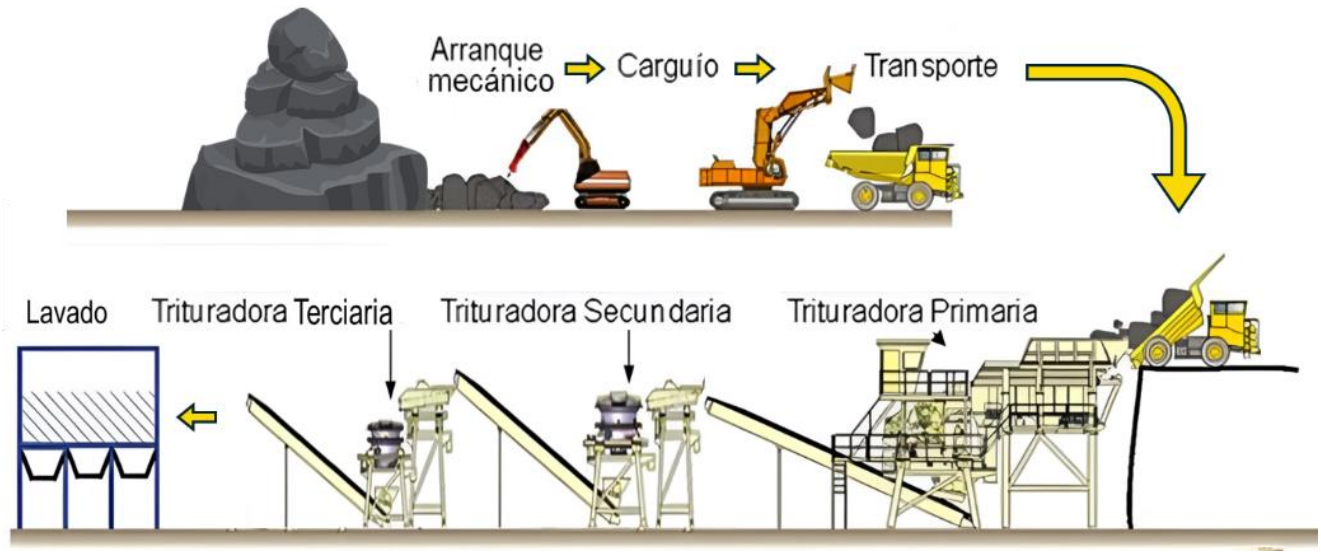
3.5. Generación de FFRR en la explotación de áridos en cantera

Se entiende por *cantera* el sistema de explotación a cielo abierto para extraer de él rocas o minerales no disgregados, utilizados como material de construcción. Las canteras de roca, comúnmente denominadas canteras de peña son fuentes limitadas de materiales que se originan a partir de la formación geológica de una región determinada, pudiendo pertenecer a unidades sedimentarias, ígneas o metamórficas. Las propiedades físicas de estos materiales reflejan la historia geológica de la región y permiten la producción de agregados aptos para diversas aplicaciones industriales. La explotación de estas canteras se lleva a cabo mediante cortes o excavaciones en los depósitos. (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPÚBLICA DE COLOMBIA, 2003).

La materia prima, en este caso la Dunita Serpentinizada, se extrae mediante arranque mecánico y se transporta en camiones hasta la planta de beneficio, donde inicia su transformación en producto terminado (arenas y grava). Este proceso comprende etapas de trituración primaria, secundaria y terciaria, así como tres fases de cribado, tanto en seco como en húmedo; se implementa un sistema de lavado que garantiza el cumplimiento de las especificaciones técnicas del producto, además de un sistema de aspersión diseñado para controlar las emisiones durante la trituración. Adicionalmente, se lleva a cabo un proceso de floculación que permite separar los sólidos del agua, optimizando el manejo de los residuos y facilitando la recirculación del agua para su reutilización. (Argos Colombia, n.d.-b), Figura 7.

Figura 7

Proceso de extracción de materiales en cantera

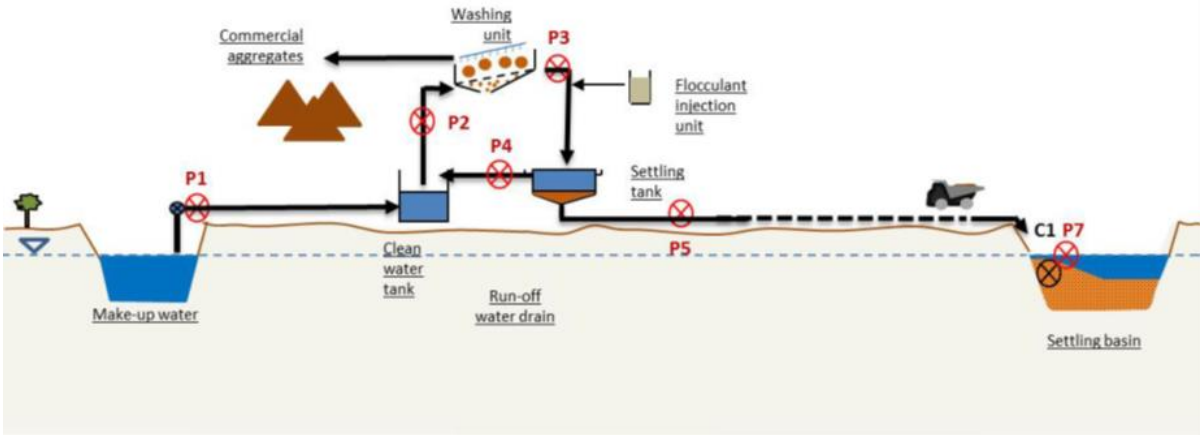


Nota. Modificado de Álvarez et al. (2023)

Los residuos de cantera tienen altos contenidos de humedad y deben tratarse y disponerse adecuadamente para prevenir la contaminación del suelo y el agua. Generalmente, la gestión de estos materiales se basa en utilizarlos como material de relleno en las fases de restauración de minas, la reutilización del agua de proceso a través de mecanismos de decantación y deshidratación y mediante la implementación de un sistema de almacenamiento de residuos en grandes superficies (Cabrales-Clapé et al., 2018; Menéndez & Moyo, 2011), Figura 8.

Figura 8

Funcionamiento típico de lavado y disposición de residuos en una cantera



Fuente. (Guezennec et al., 2015)

3.6. Mineralogía de FFRR de cantera y su efecto en mezclas cementicias

Existen numerosos estudios que han explorado el uso, la caracterización y el comportamiento de residuos finos de diversas fuentes en morteros. Dependiendo de la composición del residuo, este puede usarse como reemplazo parcial de los agregados finos o del material cementante. La mineralogía de los FFRR de cantera responde a la composición química y mineralógica del material original, el proceso de extracción y tratamiento, y las condiciones de activación térmica o química.

Algunos FFRR empleados en mezclas de mortero se componen de aluminosilicatos, que cumplen con los requisitos químicos normados por la ASTM C618-03 para ser considerados puzolanas naturales y pueden reaccionar con la portlandita generada por la hidratación del cemento para formar geles cementicios adicionales, mientras que otros residuos son calcinados a diferentes temperaturas para alcanzar un material con características de este tipo y contribuir a las mejoras en la resistencia mecánica observadas. Este comportamiento se acentúa especialmente cuando dichos residuos se combinan con otros materiales de naturaleza cementante, favoreciendo el desarrollo de productos de hidratación adicionales que densifican la matriz del mortero y optimizan su desempeño estructural. (Altheeb, 2022; Polydorou et al., 2021; Singh et al., 2019)

A continuación, se presentan algunos casos sobre usos de FFRR de cantera en mortero encontrados en la literatura:

- Cohen et al. (2019), Usaron polvo de cantera de dolomita como relleno en mezclas geopoliméricas (morteros) basadas en cemento y cenizas volantes con sustituciones del 0 % al 40 % de los materiales cementantes mostrando mejoras en resistencia mecánica y estabilidad térmica. Estos efectos positivos se atribuyen a interacciones físicas y químicas con el medio alcalino. Un aumento en el contenido del residuo disminuye la trabajabilidad debido a su elevada finura; Sin embargo, este mismo factor favorece la resistencia a la compresión, al actuar como puntos de nucleación que aceleran la hidratación del cemento, según lo evidencian estudios de calorimetría.

- Singh et al. (2019) Hicieron una revisión de 27 trabajos sobre la incorporación de materiales residuales finos procedentes de rocas ornamentales como caliza, mármol, granito y otros residuos cerámicos finos como reemplazo de arena o cemento en morteros. Cuando los residuos (especialmente de granito y caliza) se usan como sustitutos parciales del cemento, algunos estudios muestran efectos negativos sobre las propiedades mecánicas del mortero: por ejemplo, la incorporación en porcentajes elevados de polvo de granito como reemplazo de cemento puede disminuir la resistencia a la compresión, aumentar la porosidad, la absorción de agua y la pérdida por abrasión. Cuando los residuos se emplean como reemplazo parcial del agregado fino, los resultados son generalmente positivos. Las mezclas con hasta un 30-40 % de residuos muestran mejoras en resistencia a la compresión, flexión, adherencia y resistencia al ataque ácido. La finura de estos residuos permite una mejor compactación al actuar como *micro relleno (microfiller)*, mejoran la gradación de los finos y densifican la matriz, aunque también aumentan la demanda de agua para conservar la trabajabilidad y, en el caso de la caliza y el granito, si el reemplazo excede aproximadamente el 20 % pueden elevar la retracción por secado y la porosidad por lo que es fundamental ajustar adecuadamente la relación agua/cemento para no desmejorar la resistencia a la compresión; este comportamiento se asocia con la elevada superficie específica del residuo, su comportamiento tixotrópico, su capacidad de absorber agua y la posible formación de carboaluminatos en la matriz del mortero.

En la Tabla 6 se observa que las principales fracciones de óxidos difieren según la roca de origen: en los residuos de caliza predomina el CaO que denota el contenido de carbonatos, lo cual se vincula a mejoras en resistencia y durabilidad frente al ataque ácido. En cambio, los residuos de granito presentan altos porcentajes de SiO_2 y Al_2O_3, formando una matriz más silícea que puede aumentar la cohesión y el endurecimiento siempre que no se incremente excesivamente la porosidad. Por su parte, los residuos de mármol tienen contenidos relevantes de CaO y, en ocasiones, MgO, que pueden favorecer la formación de compuestos como carboaluminatos o magnesianos que mejoran la microestructura, pero que también pueden causar expansiones si superan ciertos umbrales. La composición química de cada residuo determina en gran medida si el mortero mejorará su resistencia y durabilidad o si, por el contrario, requerirá medidas adicionales para minimizar la retracción o la expansión.

Tabla 6

Principales componentes de algunos FFRR de canteras.

Origen del residuo	Estudios analizados	Principales componentes	Rango de valores (% en peso)
Caliza	8	CaO	37,85 - 86,94
		SiO_2	0,45 -23,5
		LOI*	1,72- 43,63
Granito	2	SiO_2	58,17 - 74,39
		Al_2O_3	11,96 -13,5
		Fe_2O_3	0,86 - 13,35
Mármol	2	CaO	32,19 - 33,12
		MgO	17,91
		LOI*	45,07

*LOI: Pérdida por ignición.

Nota. Elaborada con datos en Singh et al. (2019).

- Altheeb, (2022), realizó la revisión de 20 investigaciones sobre el uso de polvo de cantera (finos residuales) de algunas rocas ornamentales (caliza, mármol y granito) y de rocas de otro tipo como basalto, cuarcita, arenisca y dolomita, cuyos residuos presentaron un índice de bajo a moderado de actividad puzolánica. El residuo de *basalto,* usado como reemplazo parcial del cemento, mostró

mejoras en la resistencia a la compresión, reducción de permeabilidad y mayor densificación de la matriz, atribuidas a la presencia de sílice con cierta reactividad. Por su parte, el residuo de *cuarcita*, aunque rico en sílice cristalina de baja reactividad, se comporta eficazmente como relleno inerte, aumentando la densidad del mortero sin aportar propiedades cementantes, aunque en proporciones controladas puede contribuir mecánicamente. En el caso de la *arenisca*, su bajo contenido de componentes cementantes reactivos limita su aporte a la resistencia, aunque mejora la trabajabilidad; sin embargo, reemplazos superiores al 30 % incrementan la porosidad y absorción de agua. Finalmente, el residuo de *dolomita*, debido a su elevado contenido de CaO y MgO, favorece reacciones cementantes secundarias que elevan la resistencia y compactación. La presencia de MgO en morteros ha sido estudiada por otros autores como (He et al., 2021),que estudiaron el efecto del MgO reactivo en la hidratación de pastas de escoria con diferentes activadores, concluyendo que el MgO reactivo es particularmente beneficioso para cementos de escoria activados con carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el sulfato de sodio (Na_2SO_4), ya que acelera la hidratación, permite el desarrollo de resistencia mecánica, densifica la microestructura y contribuye a la formación de productos hidratados estables. En otros sistemas, como los activados con silicato de sodio, puede optimizar la resistencia si se usa en la dosis correcta. Sin embargo, su efecto depende de la dosificación: en cantidades adecuadas potencia el desempeño mecánico, mientras que en exceso reduce la fluidez, disminuye la resistencia a compresión y puede generar expansiones indeseadas asociadas a la formación de brucita. Aunque en ese trabajo no se detectó dicha fase, otros estudios han confirmado este riesgo bajo determinadas condiciones.

4. Metodología

La metodología adoptada en el presenta trabajo de grado se basó principalmente en un enfoque cuantitativo, orientado a la medición precisa de variables físicas, mecánicas y de durabilidad bajo condiciones de intemperismo acelerado. Se emplearon herramientas estadísticas para analizar comparativamente el desempeño de mezclas con diferentes proporciones de reemplazo de arena por FFRR, contrastando los cambios experimentados por las unidades de ensayo antes y después de la exposición.

De manera complementaria, la fase de campo incluyó un componente cualitativo considerando que ciertas propiedades relevantes para el comportamiento del revoque (como cohesión, plasticidad, fisuración o presencia de grietas) no se cuantificaron mediante ensayos normalizados, sino que fueron observadas, descritas y registradas.

Esta investigación se clasifica como comparativa ya que contrasta mezclas con y sin incorporación de residuos y aplica un método de corte empírico-analítico, estructurado en una lógica antes-después, que permite interpretar los efectos inducidos por la adición del fino residual y su interacción con factores ambientales simulados. Con ello se busca aportar evidencia técnica sobre la viabilidad del aprovechamiento de estos residuos en morteros, promoviendo alternativas sostenibles en el sector de la construcción y contribuyendo tanto a la economía circular como a la mitigación del impacto ambiental asociado al uso de materiales convencionales.

4.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se hizo usando bases de datos accesibles a través del sistema de bibliotecas de la Universidad de Antioquia y comenzó con la búsqueda de información sobre las características geológicas y mineralógicas de la roca madre con el fin de comprender el origen y comportamiento potencial de los finos residuales generados en su proceso de explotación. A partir de allí, se profundizó en literatura técnica y científica enfocada en el uso de residuos de cantera en morteros, priorizando el análisis de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como su influencia en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad de las mezclas. Esta etapa también incluyó el estudio de investigaciones relacionadas con ensayos de intemperismo acelerado aplicados a materiales de construcción, considerando su utilidad para simular condiciones ambientales

extremas en periodos cortos de tiempo. Se buscó establecer un estado del arte que permitiera sustentar técnicamente la viabilidad de incorporar residuos de Dunita Serpentinizada como sustituto parcial del agregado fino en morteros de revoque, e identificar enfoques metodológicos aplicables a la evaluación de su desempeño.

4.2 Caracterización de materiales

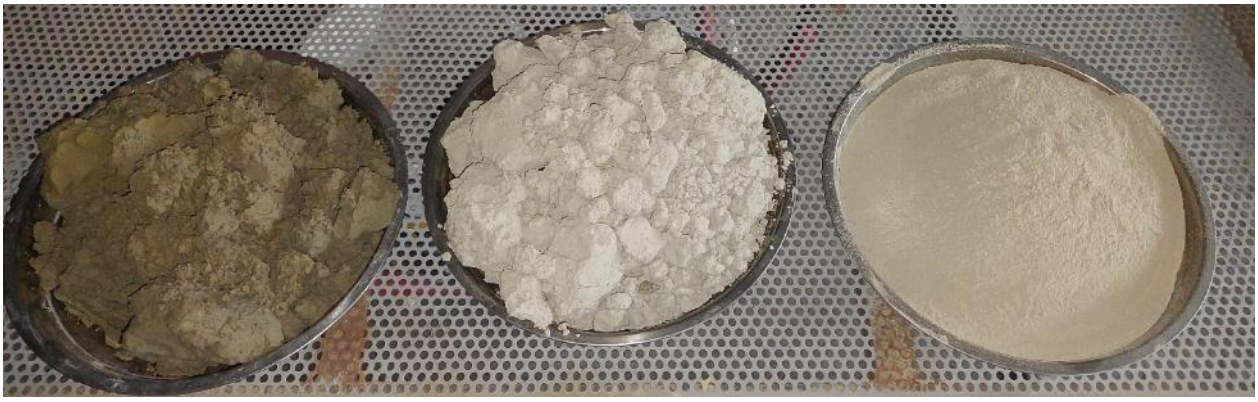
4.2.1 FFRR de cantera

Para la caracterización del residuo proveniente de la explotación en cantera de Dunita Serpentinizada se llevaron a cabo ensayos con protocolos basados en normas y estándares nacionales e internacionales que posibilitaron la determinación integral de la composición química, las propiedades físicas y la reactividad potencial de los FFRR, para comprender su influencia en el comportamiento mecánico, durabilidad y desempeño general de los morteros.

El material es homogéneo de un color gris verdoso muy claro en estado seco; sin embargo, la percepción del color varía en función de la cantidad e intensidad de la luz incidente; al ser observado bajo un Microscopio Digital USB mostró una tonalidad más verdosa, atribuible a la presencia de minerales característicos de la roca ultramáfica de la que procede. El color del residuo se determinó con la carta de colores de Munsell. El material fue recolectado en estado húmedo, secado en horno a 110 °C durante 24 h y posteriormente sometido a disgregación manual hasta obtener un tamaño máximo de 1,19 mm con el fin de garantizar la uniformidad granulométrica para su utilización en los ensayos, Figura 9 y Figura 10.

Figura 9

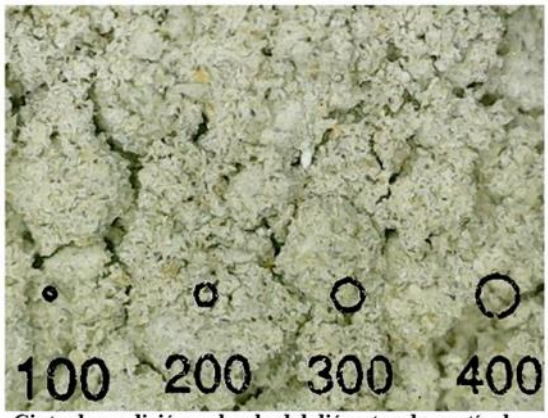
FFRR en diferentes estados



Nota. De izquierda a derecha: FFRR húmedos, secos y disgregados.

Figura 10

FFRR Observados con microscopio digital.



Cinta de medición redonda del diámetro de partícula. Unidades: µm

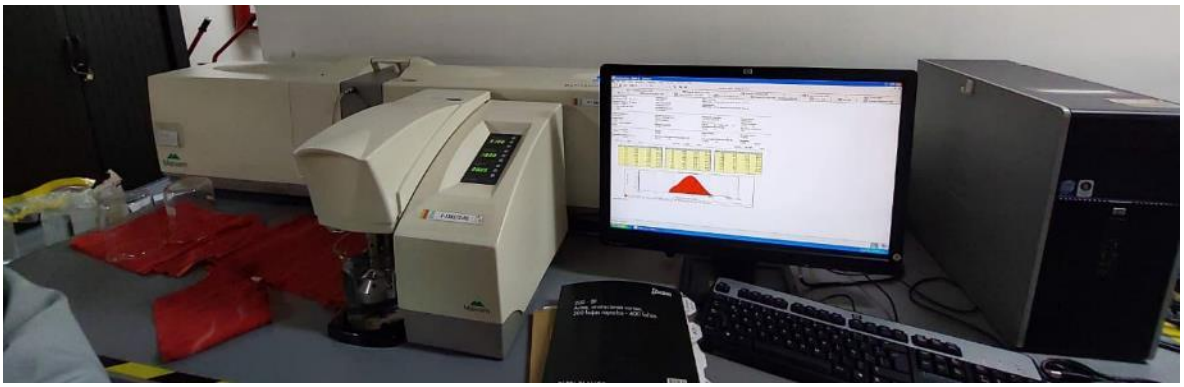
A continuación, se presentan los ensayos realizados y su descripción.

- **Tamaño de partículas por difracción laser**

Este ensayo determina la distribución del tamaño de partículas de un material sólido mediante la dispersión de un haz láser. A medida que las partículas interfieren con el haz, se genera un patrón de difracción que es procesado por el equipo para estimar el rango de tamaños presentes. Este método es altamente preciso y adecuado para partículas con tamaños entre 0,01 y 2000 µm, ofreciendo un perfil completo de la granulometría del material. Equipo utilizado: Analizador de tamaño de partícula por difracción láser marca MALVERN, Figura 11.

Figura 11

Analizador de tamaño de partícula por difracción láser



- **Límites de Atterberg** (ASTM D4318. Métodos de ensayo para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, 2017)

Se hallaron los límites líquido, plástico e índice de plasticidad. Estas pruebas permiten identificar cómo cambia la consistencia del suelo según los cambios en su humedad. El límite plástico es el punto en el que el suelo deja de estar semisólido y se vuelve plástico, mientras que el límite líquido marca el paso de plástico a líquido. La diferencia entre ambos se conoce como índice de plasticidad. La determinación de la plasticidad es necesaria para la clasificación del suelo según los métodos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Figura 12.

Figura 12
Ensayo de Límite líquido y límite plástico



- **Contenido de agua**

Este análisis determina el porcentaje de humedad presente en el FFRR mediante calentamiento controlado y pérdida de masa. Este ensayo realizado tanto en balanza de humedad

como en horno es importante para determinar de la humedad de los materiales y controlar el secado previo al procesamiento o formulación de morteros.

- **Contenido de materia orgánica por ignición** (AASHTO T267 - Contenido orgánico en suelos por pérdida por ignición, 2022; INV-E-121-13 determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición, 2013)

Este método permite cuantificar la porción de materia orgánica total presente en el material mediante su combustión y tener en cuenta la posible influencia de esta en la reacción de fraguado del mortero, Figura 13.

Figura 13

Muestras en Mufla para ensayo de contenido de materia orgánica por ignición

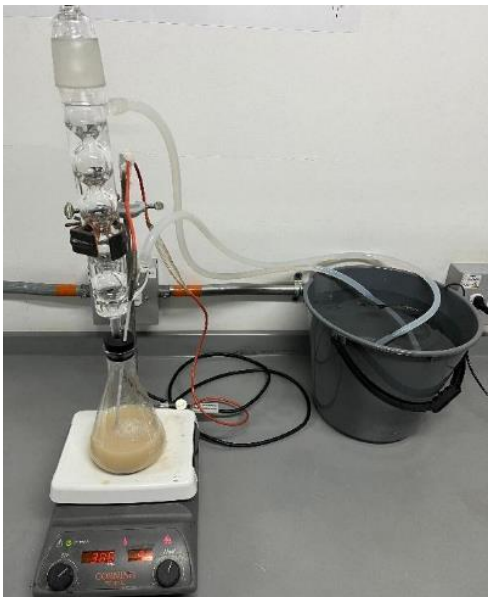


- **Actividad puzolánica por método de Chapelle** (Norma ABNT NBR Materiales Puzolánicos -Determinación del contenido de hidróxido de calcio fijado - Método Chapelle modificado, 2010)

El índice de actividad puzolánica mide la capacidad del material para reaccionar con hidróxido de calcio, formando compuestos cementantes. El método de Chapelle cuantifica el consumo de $Ca(OH)_2$ (cuantificación teórica del óxido fijado mediante una reacción química) revelando el potencial cementante del FFRR. Figura 14

Figura 14

Montaje experimental para ensayo de Actividad puzolánica por método de Chapelle



- **Potencial de Hidrógeno (pH)** (NTC 5264. Calidad Del Suelo. determinación Del pH., 2018)

Este ensayo permite medir el nivel de acidez o alcalinidad de un material. Se realiza en una suspensión suelo-agua, y su resultado permite comprender las condiciones químicas del medio, especialmente su capacidad para participar en reacciones de disolución o precipitación de minerales, así como su influencia sobre la reactividad de compuestos cementantes, Figura 15.

Figura 15

Ensayo para medición de pH en muestras de FFRR



- **Conductividad** (NTC 5596. Calidad de Suelo. Conductividad, 2022)

A través de las mediciones de la conductividad eléctrica se obtiene información sobre la concentración total de componentes ionizados en la solución. Mide la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica a través de una disolución, lo que indica la cantidad de sales disueltas y permite analizar su influencia en procesos de hidratación, Figura 16.

Figura 16

Ensayo para determinar la conductividad del residuo



- **Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)**

Este análisis permite determinar la composición química elemental de un material, expresada en forma de óxidos. Se basa en la emisión de rayos X fluorescentes cuando el material es excitado por una fuente de energía. Es ampliamente usado para identificar los elementos químicos predominantes en la muestra y establecer su potencial como componente cementante.

Equipo utilizado: XRF THERMO Modelo OPTIM‘X.

- **Difracción de rayos X (DRX)**

Se identifican las fases cristalinas presentes en una muestra sólida mediante el análisis del patrón de difracción de rayos X. Es útil para conocer la mineralogía del residuo e identificar fases reactivas y no reactivas. Determina la mineralogía y es útil para inferir potencial puzolánico o expansivo. Equipo utilizado: XPert PANalytical Empyrean Serie II - Alpha1 Modelo 2012.

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Este método se utiliza para observar la morfología superficial y la textura de partículas a nivel micrométrico o nanométrico. A través de imágenes de alta resolución, permite analizar la forma, tamaño y distribución de las partículas la muestra, así como identificar productos de reacción o estructuras gelificadas en matrices cementantes. El equipo tiene incorporado un detector de rayos X del tipo "dispersivo" en energía (EDS) que permite identificar cuáles son las energías de los rayos X emitidos por la muestra y determinar qué elementos químicos están presentes en ella. Equipo utilizado: Microscopio Electrónico de Barrido, Figura 17.

Figura 17

Microscopio electrónico de barrido



4.2.2 Arena

El agregado fino que se utilizó en este estudio fue una arena de revoque comercial sin tratamiento industrial, utilizada tradicionalmente en obras de construcción, Figura 18. Su origen es natural; ha sido arrastrada por un río, proviene de la desintegración de rocas cristalinas y su comercialización no incluye procesos de clasificación o lavado, lo que refleja las condiciones reales de uso tradicional de morteros para revoque. Esta característica la convierte en un insumo representativo del contexto constructivo local, permitiendo evaluar de forma más veraz el comportamiento de las mezclas modificadas. En todas las pruebas la arena se secó en horno a 110°C durante 24 h.

Figura 18

Arena de revoque utilizada en este estudio



Nota. b) Arena de revoque vista con un microscopio digital.

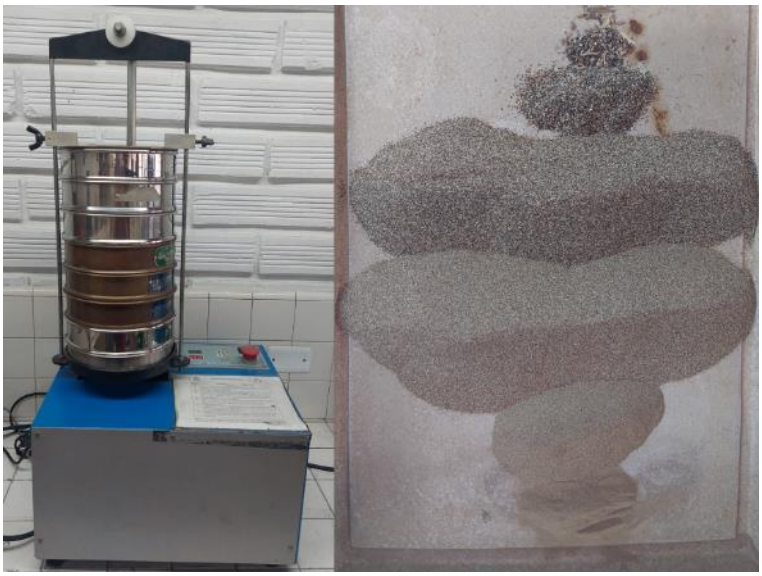
La caracterización de esta arena se realizó mediante los siguientes ensayos:

Determinación del tamaño de partículas mediante método mecánico (NTC-77. Concretos. Método de Ensayo Para El Análisis Por Tamizado de Los Agregados Finos y Gruesos., 2018; NTC-78. Método de Ensayo Para Determinar Por Lavado El Material Que Pasa El Tamiz 75 Mm (No. 200) En Agregados Minerales., 2019)

Este ensayo tiene como finalidad cuantificar la distribución del tamaño de partículas en una muestra, obteniendo como resultado una curva granulométrica que representa la proporción relativa de partículas en función de su tamaño. Para las partículas de tamaño superior a 0,075 mm (correspondiente al tamiz N.º 200), la determinación se realiza mediante tamizado mecánico, Figura 19. Para las partículas más finas, con tamaño inferior a 0,075 mm, se emplea un método de lavado. La curva granulométrica permite conocer si el material está bien o mal gradado y los porcentajes retenidos se usan para conocer si la arena cumple con los estándares para la respectiva aplicación.

Figura 19

Determinación del tamaño de partículas mediante método mecánico



- **Densidad relativa y absorción** (INV E-222-13. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS, 2013)

Este ensayo determina la densidad relativa (gravedad específica) y la capacidad de absorción de los agregados finos. Se toma una muestra representativa de agregado fino, se seca hasta alcanzar masa constante y luego se somete a inmersión en agua por 24 ± 4 h para lograr su saturación. Posteriormente, se elimina el exceso de agua superficial hasta obtener la condición saturada y superficialmente seca (SSD), y se determinan las masas en aire y en agua tanto en estado seco como en SSD. Para estas mediciones se utiliza el picnómetro, con el cual se obtiene el volumen desplazado por la muestra al llenarse con agua, lo que permite calcular con precisión la densidad relativa en sus diferentes condiciones (seca, SSD y aparente) y la absorción del agregado fino, Figura 20.

Figura 20

Ensayo de densidad relativa y absorción.



- **Peso unitario** (INV-E-217-13 densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto, 2013)

El peso unitario o densidad aparente de un agregado fino se determina al llenar un recipiente de volumen conocido con el material sin compactar o compactado, según el método. Este valor representa la masa por unidad de volumen incluyendo los vacíos entre partículas, Figura 21.

Figura 21

Ensayo de densidad bulk

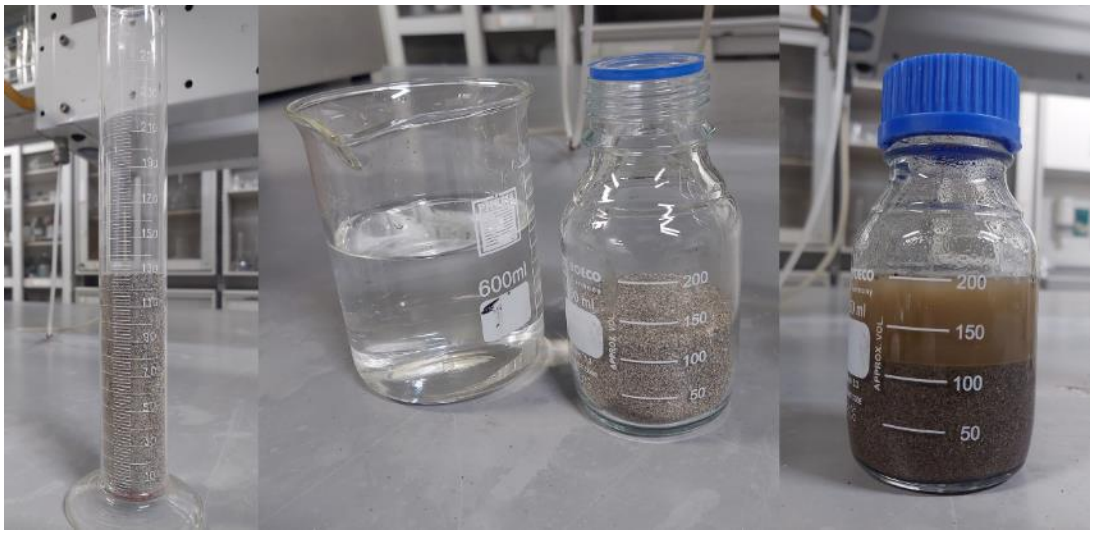


- **Materia orgánica por colorimetría** (ASTM-C40. Método de ensayo para impurezas orgánicas en agregados finos para concreto, 2004; NTC 127 Método de Ensayo Para Determinar Las Impurezas Orgánicas En Agregado Fino Para Concreto., 2000)

Este ensayo evalúa la presencia de materia orgánica en agregados finos mediante una reacción colorimétrica con hidróxido de sodio. Se compara el color del extracto con un color patrón, lo cual indica el nivel de impurezas orgánicas presentes, Figura 22.

Figura 22

Ensayo para determinar impurezas orgánicas por colorimetría



4.2.3 Cemento

Para la elaboración de los morteros, se utilizó un cemento hidráulico gris comercial de uso general que cumple con los valores de la Norma Técnica Colombiana NTC 121 (Especificación de desempeño para cemento hidráulico) Tipo UG. La caracterización se obtiene a partir de los datos consignados en su ficha técnica, Tabla 7.

Tabla 7

Especificaciones técnicas del cemento gris de uso general

PARÁMETROS FÍSICOS		NORMA DE ENSAYO	NTC 121 TIPO UG
Finura	Blaine, min. (cm^2/gr)	NTC 33	A
	Retenido Tamiz 45 µm (%)	NTC 294 o NTC 4985	A
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat[B]	No menos de, minutos	NTC 118	45
	No más de, minutos	NTC 118	420
Contenido de Aire en Volumen de mortero, máx. (%)		NTC 224	12
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx.		NTC 4927	0,020
RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN (MPa)			
	3 días	NTC 220	8,0
	7 días	NTC 220	15,0
	28 días	NTC 220	24,0

Notas.

A: Los resultados de estos ensayos deben ser informados en todos los reportes que sean solicitados.

B: El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTC 118.

Fuente. (Argos Colombia, n.d.-a).

4.2.4 Agua

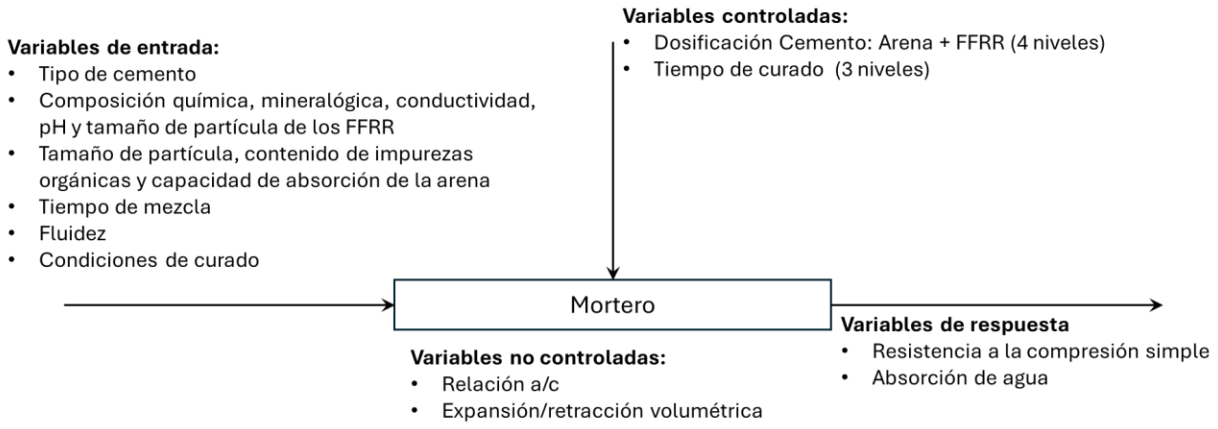
El agua utilizada en este trabajo se tomó del sistema de acueducto local; esto garantizó una calidad apta para la fabricación de morteros conforme a lo establecido en la normativa vigente. Esta fuente de agua, al ser destinada al consumo humano, cumple con estándares fisicoquímicos que aseguran su inocuidad, permitiendo su empleo sin necesidad de tratamientos adicionales. El agua cumple una función primordial en la mezcla: permite la hidratación del cemento (proceso que inicia las reacciones químicas responsables del desarrollo de resistencia) y es determinante en el curado y en el control de las propiedades finales del mortero endurecido. La ausencia de compuestos perjudiciales como aceites, sales, materia orgánica o álcalis, según se espera en aguas tratadas por acueductos municipales, brinda confianza para la reproducibilidad de los resultados.

4.3 Etapa experimental

4.3.1 Pruebas de desempeño

Se llevó a cabo un proceso experimental para elaborar morteros utilizando distintas proporciones de finos residuales en sustitución del agregado fino natural (arena), manteniendo constante la cantidad de cemento hidráulico (relación arena: cemento de 1:4) y la fluidez (110 %). Las proporciones de finos residuales que se emplearon fueron del 10 %, 20% y 30 % del volumen de la arena, además de una mezcla control sin adición de finos residuales (0 %). Los morteros fueron preparados siguiendo una dosificación uniforme y mezclados bajo condiciones controladas para garantizar la homogeneidad de las muestras. Posteriormente, las mezclas fueron vertidas en moldes prismáticos y sometidas a un proceso de curado en condiciones estándar. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado resultando en un total de 12 combinaciones, que al contar con tres réplicas generaron 36 unidades experimentales; también se realizaron pruebas de absorción de agua por capilaridad a 3 probetas de cada dosificación. El plan experimental se esquematiza en la Figura 23 y los demás detalles se desarrollan en los apartados siguientes.

Figura 23
Esquema del plan experimental inicial



- **Diseño de mezcla de mortero**

La dosificación se realizó de manera volumétrica en una relación 1:4 (cemento:arena), considerando el reemplazo parcial del agregado fino por el residuo en los porcentajes definidos, calculados sobre el volumen correspondiente a las cuatro partes de arena. Con las densidades

aparentes determinadas previamente para el cemento, la arena y el lodo residual, se calcularon las masas necesarias para preparar un volumen de 2500 cm³ de material seco, suficiente para la elaboración de 12 cubos de mortero. La cantidad de agua se estimó inicialmente a partir de una relación a/c de 0.8; sin embargo, con el fin de alcanzar una fluidez del 110 %, se fue ajustando mediante la adición progresiva de agua hasta lograr dicho valor.

La formulación de las 4 diferentes mezclas (Tabla 8), se hizo según recomendaciones de Gutierrez (2003) y tomando como referencia los manuales: Práctica recomendada para la ejecución y control de calidad del revoque (Argos, s/f) y Manual práctico del revoque: práctica recomendada para la ejecución y control de calidad del revoque. (SENA, 2003). También se tuvo en cuenta las normas ASTM C-897. Especificación para agregados destinados a revoques elaborados en obra a base de cemento Portland, 2020; NTC 3329. especificaciones del mortero para unidades de mampostería., 2004., y la NRS-10,

Tabla 8
Dosificación mezclas de mortero de revoque

Dosificación	Cemento		Arena		FFRR		Agua
	cm³	g	cm³	g	cm³	g	g
FR00	500	475	2000	2620	0	0	775
FR10	500	475	1800	2358	200	170	750
FR20	500	475	1600	2096	400	340	750
FR30	500	475	1400	1834	600	510	750

- **Elaboración de probetas**

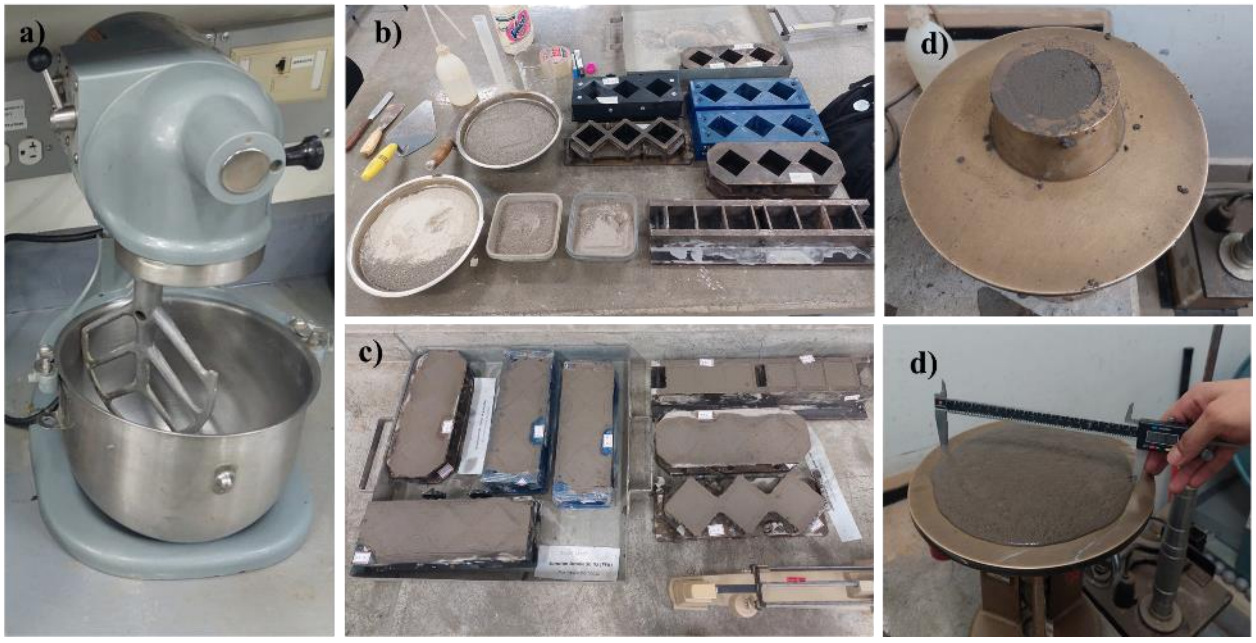
Fueron elaboradas y curadas probetas cúbicas con la arena descrita en el numeral 4.2.2 (sin lavar ni normalizar) y con las proporciones mencionadas en la Tabla 8. El mortero se preparó en una mezcladora mecánica asegurando una mezcla homogénea. Posteriormente, se vació en moldes cúbicos de 50 mm de lado en dos capas, cada una compactada con 32 golpes de pisón; se enrasó la superficie y a las 24 h se sometió a curado. Se usaron como guía las normas ASTM C109. Método de ensayo para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (utilizando probetas cúbicas de 2 pulgadas o [50 mm]), (2020); NTC 112. Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica, (2021); NTC 220. Determinación de La

Resistencia de Morteros de Cemento Hidráulico a La Compresión, Usando Cubos de 50 Mm o 2 Pulgadas de Lado, (2022)

Se mantuvo constante para todas las dosificaciones una fluidez del mortero cercana al 110 % (ideal para revoque) mediante ensayo de fluidez según la norma NTC-111. (método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico, 1997), variando la relación agua cemento. Este ensayo consiste en colocar una porción de mezcla en un molde troncocónico metálico (100 mm de diámetro en la base, 70 mm en la parte superior y 50 mm de altura) ubicado sobre la mesa de flujo. El molde se llena en dos capas compactadas suavemente, se retira y luego se aplican 25 golpes a la mesa en 15 segundos. Finalmente, se mide el diámetro de extensión del mortero en 4 direcciones calculando el promedio y expresando la fluidez como el porcentaje de incremento respecto al diámetro inicial del molde (100 mm), Figura 24.

Figura 24

Elaboración cubos de mortero



Notas.

a) Mezcladora mecánica
b) Moldes e insumos
c) Mortero fresco en moldes
d) Ensayo de fluidez

- **Curado y ensayos de resistencia a la compresión**

Siguiendo las normas ASTM C109 y NTC 220, las probetas recién moldeadas se mantuvieron en el molde, dentro de un recinto con temperatura controlada de 24 °C; transcurridas las primeras 24 h las probetas se desmoldaron y sumergieron completamente en agua limpia a 24 °C, hasta el momento del ensayo de compresión que se hicieron a los días de curado 7, 14, y 28 a tres probetas de cada dosificación, Figura 25. Este ensayo consiste en aplicar una carga axial creciente sobre una probeta hasta su falla, sin presencia de confinamiento lateral. Permite determinar la resistencia máxima que el material puede soportar. Se usó una máquina multi ensayos Humboldt HM3000, Figura 26.

Figura 25

Probetas en recipiente de curado



Figura 26

Máquina multi ensayos usada para pruebas de resistencia a la compresión simple

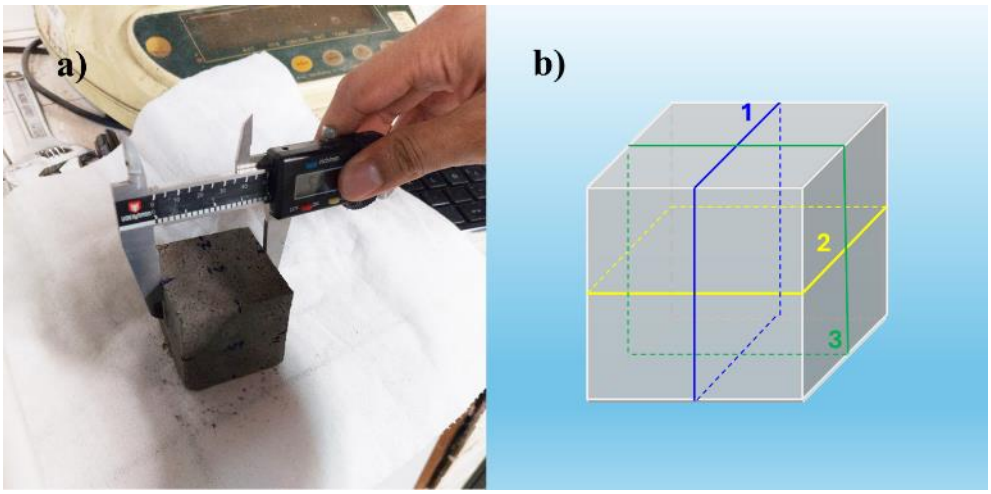


- **Control de expansión y retracción**

Para verificar posibles fenómenos de expansión durante el curado se realizaron mediciones dimensionales en las probetas cúbicas de mortero mediante un calibrador Vernier digital (resolución ±0,01 mm). Las mediciones se efectuaron sobre las secciones transversales de cada cubo (3 cubos por dosificación), registrando el perímetro en tres direcciones: perímetro 1, 2 y 3 Figura 27. Las medidas se tomaron exactamente en los mismos puntos en 4 momentos: después de desmoldarlos (día 1) y posteriormente a los 7, 14 y 28 días de curado.

Figura 27

Control de expansión durante curado- medición con calibrador Vernier



Notas.

a) Medición en laboratorio
b) Esquema mediciones tomadas. Las líneas de colores representan los perímetros medidos con el calibrador Vernier

La variación dimensional se calculó comparando cada medida con el valor inicial. Para cada fecha y dosificación, se promedió el valor del Perímetro 1 de las tres probetas, el del Perímetro 2 y el del Perímetro 3, obteniéndose así tres promedios parciales. Finalmente, estos tres promedios se promediaron nuevamente para obtener un único valor representativo de expansión o contracción correspondiente a cada dosificación en cada día de medición.

Este procedimiento permitió verificar de manera comparativa los cambios en las secciones transversales atribuibles a los efectos derivados de la incorporación de los FFRR en la mezcla. Si bien existen métodos como el de la ASTM C157 (Método de prueba estándar para el cambio de longitud del mortero y hormigón de cemento hidráulico endurecido) la aproximación realizada

parte de la practicidad del ensayo y su pertinencia para obtener un control dimensional directo y representativo de los posibles cambios volumétricos del material durante la etapa de curado

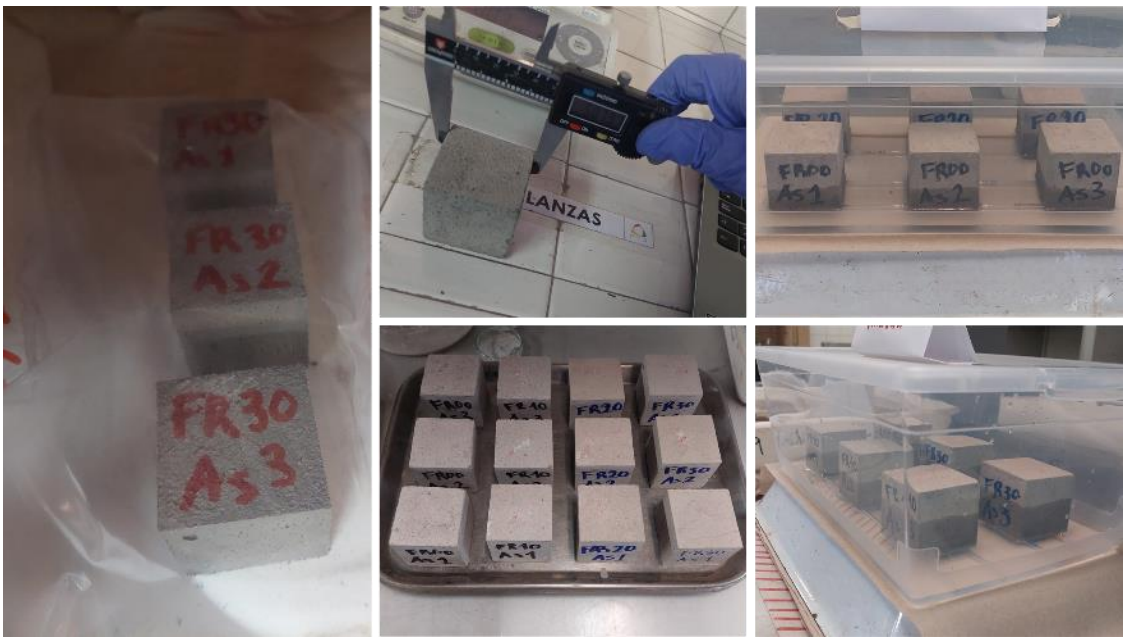
- **Ensayos de absorción de agua por capilaridad**

La absorción de agua por capilaridad se determinó conforme a la norma ASTM C1403-15 (Método de ensayo para la velocidad de absorción de agua en morteros de albañilería., 2015) la cual establece el método para evaluar la tasa de absorción de agua en morteros de mampostería. El ensayo consiste en sumergir parcialmente en agua la base de prismas de mortero curados en bolsas plásticas selladas durante 28 días y secadas al horno durante 24 h a 110 °C, y registrar su ganancia de masa en intervalos de tiempo definidos, Figura 28. La tasa de absorción es calculada como el agua absorbida por unidad de área de la cara en contacto con el agua. Los resultados del ensayo permitieron estudiar el comportamiento de los morteros frente al ingreso de humedad, proporcionando información sobre la porosidad capilar del mortero como variable de respuesta ante el reemplazo parcial de la arena.

Se hicieron tres probetas por cada dosificación para un total de 12 probetas.

Figura 28

Ejecución ensayos de absorción de agua por capilaridad



4.3.2 Pruebas de intemperismo acelerado

Se sometieron a intemperismo acelerado probetas realizadas con la misma metodología descrita en el numeral 4.3.1, curadas durante 28 días y secadas al horno durante 24 h a 110° C. Las pruebas se realizaron en una cámara de intemperismo acelerado QUV adaptada con porta muestras para materiales de construcción, que reproduce los efectos de la luz solar, la lluvia y el rocío para evaluar el comportamiento de los morteros frente a condiciones ambientales extremas simuladas, analizar cambios en la integridad física, pérdida de masa y efectos visuales sobre los morteros, Figura 29 y Figura 30.

En pocos días se simuló el daño que ocurre por exposición a la intemperie. Se realizaron exposiciones a ciclos alternados de luz ultravioleta y cambios de humedad, aplicando el ciclo 1 de la norma ASTM G 154 (Práctica para la operación de equipos con lámparas fluorescentes ultravioleta (UV) para la exposición de materiales no metálicos., 2023). Este ensayo permite evaluar la tendencia relativa y los mecanismos de deterioro de las mezclas (p. ej. lixiviación, precipitación, microfisuración), Tabla 9.

Tabla 9

Especificaciones técnicas del ciclo de intemperismo acelerado

Ciclo	Fuente	Irradiancia	Longitud de onda	Ciclo de exposición
1	UVA-340	0,89 W/m²·nm	340 nanómetros	8h UV 60°C 4h condensación a 50°C

Fuente. (ASTM, 2023)

Figura 29

Porta muestras con probetas para cámara de intemperismo acelerado



Figura 30
Cámara QUV



Notas.
a) Cámara QUV
b) Cámara con porta muestras adaptados

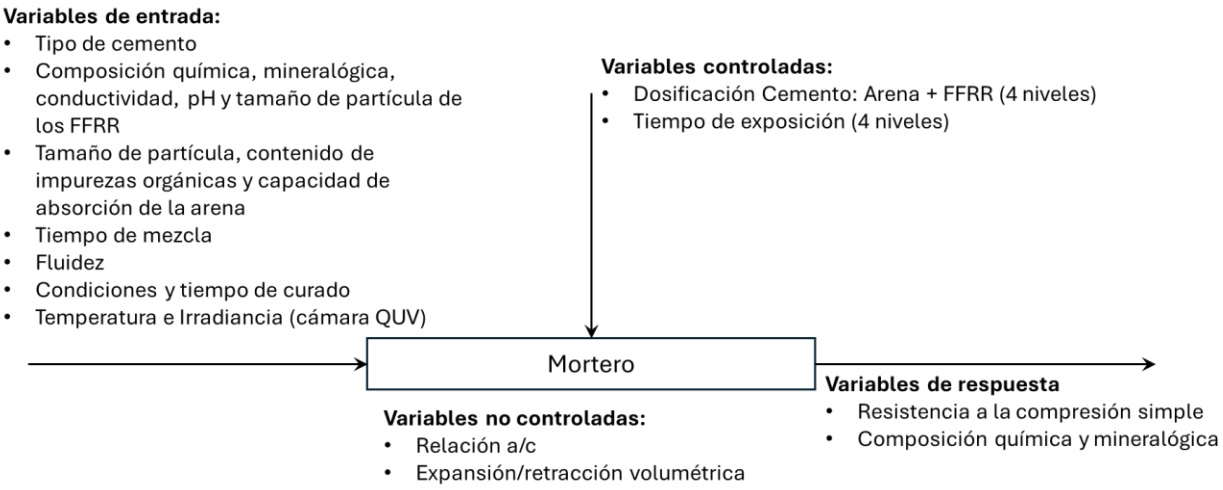
- **Pruebas de resistencia a la compresión simple y análisis SEM-EDS**

Para evaluar el efecto del intemperismo acelerado sobre las propiedades mecánicas, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en tres probetas de cada dosificación previamente secadas al horno. Estas se ensayaron al inicio del experimento (0 h) y posteriormente tras 192, 384 y 576 h de exposición a ciclos de intemperismo, sumando un total de 48 unidades experimentales. Al finalizar las 576 h se seleccionaron probetas de las dosificaciones FR00, FR20 y FR30, las cuales se disgregaron para obtener fragmentos y material pasante por la malla 200, que fueron analizados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), complementado con el detector de rayos X de tipo dispersivo en energía (EDS). El ensayo SEM-EDS se describió en el numeral 4.2.1. Para el análisis de los resultados se usaron como referencia las obras de Taylor (1997), Giraldo M. & Tobón (2006) y demás bibliografía expuesta en el marco teórico (Numeral 3)

El plan experimental de esta fase del estudio se esquematiza en la Figura 31.

Figura 31

Esquema diseño experimental para pruebas de intemperismo acelerado



4.3.3 Pruebas en campo

Con el fin de evaluar la trabajabilidad de las mezclas y su desempeño en condiciones reales de aplicación, se seleccionó un muro sobre el cual se definieron paños experimentales en forma de rectángulos de 55 cm x150 cm para cada una de las dosificaciones evaluadas.

Para esta parte del trabajo se usaron como guía nuevamente los manuales SENA (2003) y Argos (n.d.). El procedimiento fue el siguiente:

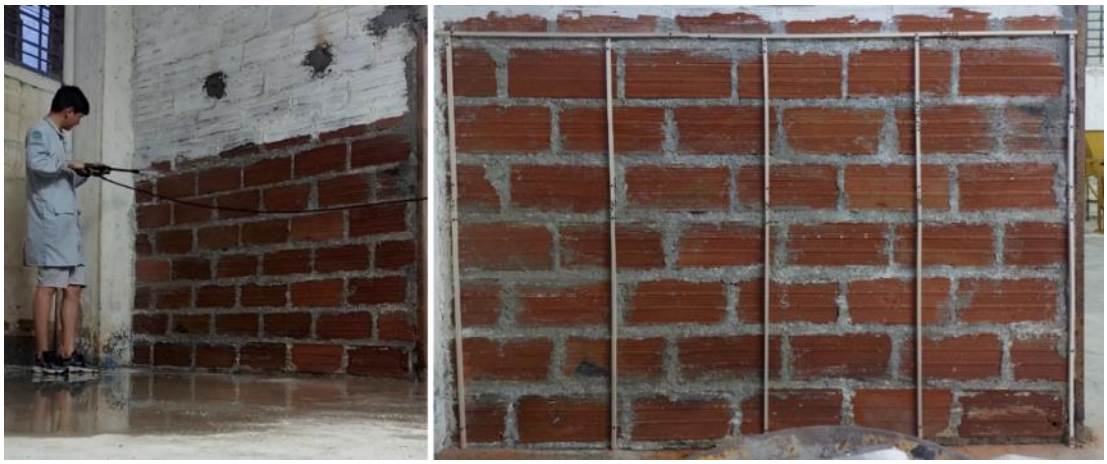
- **Actividades previas**

Se delimitaron los paños de 55 cm x150 cm y se definió un espesor de 12 mm para cada dosificación. Las dimensiones establecidas permitieron calcular las cantidades de obra. Para establecer las proporciones de cemento, arena, fino residual y agua se tomó como base en la dosificación definida en el apartado *Diseño de mezcla de mortero*. Para garantizar la adherencia, la superficie se limpió previamente para evitar polvo o grasa y al no ser lisa no fue necesario golpearla o labrarla para volverla rugosa (*picado*).

Para la instalación de guías (*basado*) se fijaron con tornillos listones cuadrados de madera (balsos) de 12 mm de lado, lo que definió un espesor uniforme de 12 mm y permitió verificar la nivelación de la pared evitando que el revoque tuviera espesores superiores al definido, Figura 32.

Figura 32

Preparación previa de la superficie para prueba de campo



- **Aplicación**

Las mezclas de mortero se prepararon de forma homogénea, primero en seco (arena, cemento y fino residual) y luego incorporando gradualmente el agua. Se necesitaron 19.000 cm^3 de mezcla seca para cada paño contemplando el desperdicio.

La aplicación se ejecutó proyectando el mortero con fuerza sobre la superficie humedecida previamente para garantizar la adherencia, analizando en el proceso tanto la cohesión de la mezcla como la facilidad de extensión. Durante las primeras horas se verificó el comportamiento del revoque y, una vez aplicado, se dejó fraguar parcialmente el mortero para posteriormente pulir la superficie con llana de madera, obteniendo una terminación uniforme, Figura 33 y Figura 34.

Figura 33

Pared de prueba lista para la aplicación



Figura 34

Aplicación del mortero de revoque sobre la pared de prueba



- **Curado**

Para el curado del revoque se aplicó un rocío de agua dos veces al día durante los primeros cuatro días y luego se dejó fraguar hasta completar 28 días. Como parte del control patológico del revoque de prueba, se inspeccionó la aparición de defectos tanto en las primeras horas como al finalizar el curado, vigilando la aparición de grietas direccionales asociadas a tensiones de retracción, fisuras retardadas en forma de telaraña propias de contracciones superficiales y posibles abultamientos derivados de pérdida de adherencia localizada, Figura 35.

Figura 35

Rociado de agua durante el curado y pared completa en proceso de secado

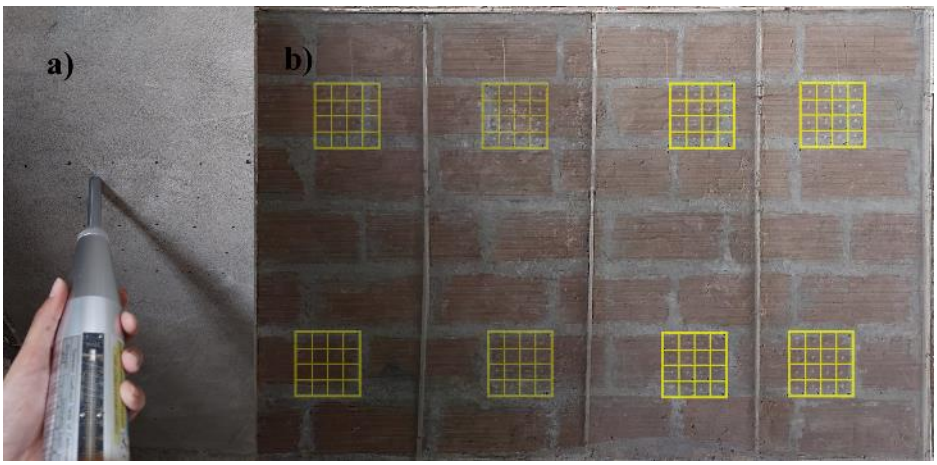


- **Control de calidad**

Finalmente, para verificar la calidad del revoque, se realizaron ensayos in situ: prueba de raya con palustre, verificación con espátula frente a desprendimientos por falta de cohesión y ensayo de esclerometría, ejecutado conforme a la norma ASTM C805 (Método de ensayo para el número de rebote del concreto endurecido, 2018). Este procedimiento empleó un martillo de rebote (Schmidt), el cual funciona mediante un mecanismo de resorte: se apoya el equipo contra la superficie y, al activar el gatillo, un émbolo impacta el mortero con una energía predeterminada, registrándose el valor de rebote. Para su aplicación, se trazaron cuadros de 20 × 20 cm sobre el revoque, subdividiéndolos en 16 secciones iguales y activando el mecanismo en el centro de cada sección. La prueba se realizó en dos áreas distintas de cada dosificación, obteniendo así un índice de rebote representativo del comportamiento mecánico superficial del mortero. Dado que el material aplicado corresponde a morteros de revoque y no a concreto estructural, además de que los espesores empleados fueron inferiores a los mínimos establecidos para realizar correlaciones confiables, no se efectuó conversión del índice de rebote a resistencia a compresión (MPa) sino que se utilizó el ensayo como un parámetro comparativo entre las diferentes dosificaciones, permitiendo evaluar su comportamiento relativo en términos de dureza superficial. Para dibujar las cuadrículas se tuvo en cuenta la ubicación del mortero de pega usado para unir los ladrillos por el cambio de dureza que representan detrás del revoque, Figura 36.

Figura 36

Prueba con esclerómetro



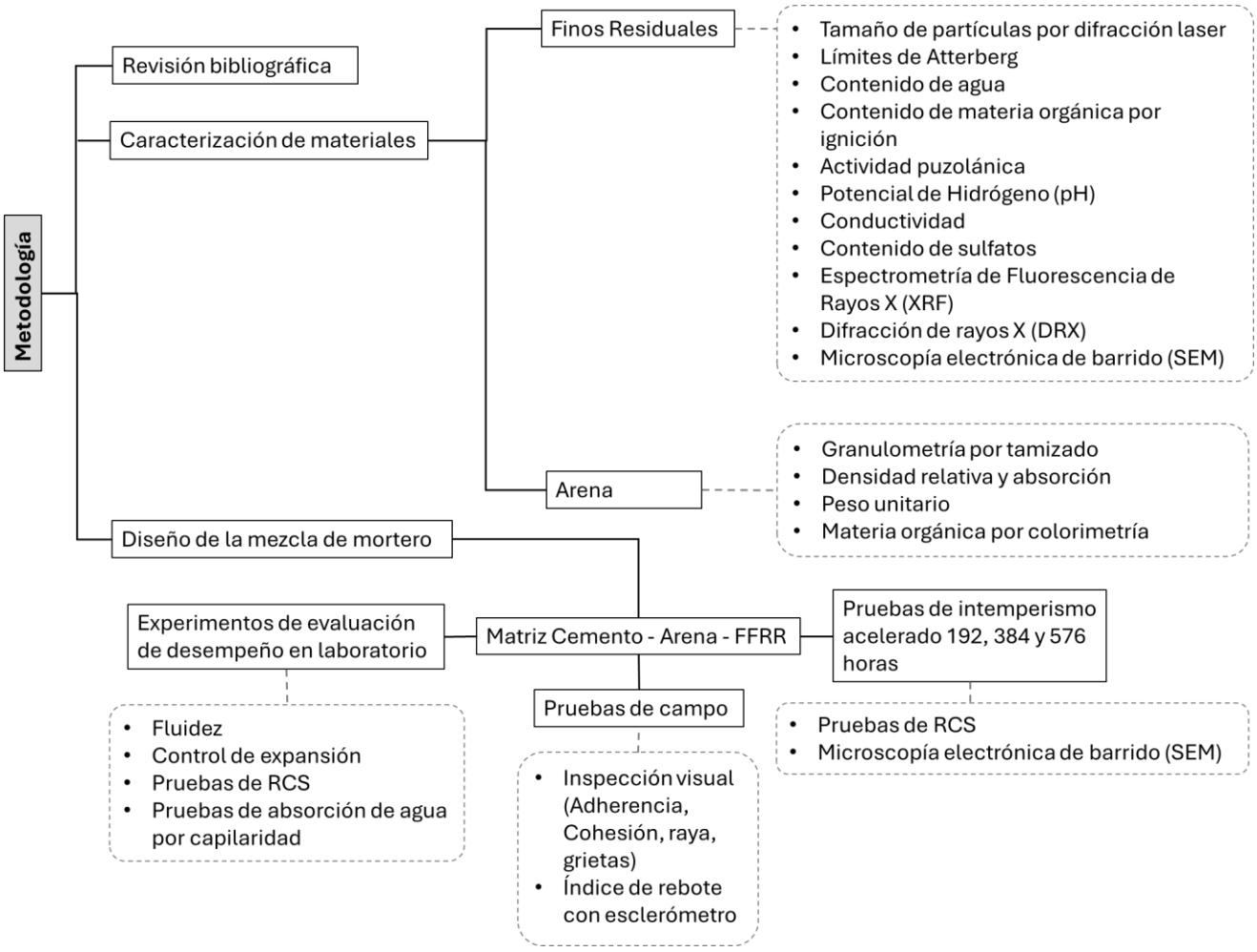
Nota. b) La imagen muestra las cuadrículas trazadas en la pared y es una superposición de una imagen antes de revocar y otra después del ensayo con esclerómetro. Los puntos blancos en medio de las cuadrículas son las marcas reales que dejó el martillo en el revoque. Las líneas amarillas fueron añadidas digitalmente y son ilustrativas.

4.4 Esquema resumen

En la Figura 37 se presenta un diagrama que esquematiza la metodología empleada.

Figura 37

Diagrama resumen de la metodología



5 Análisis de resultados

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados obtenidos.

5.1 Caracterización de los FFRR

Tabla 10

Caracterización inicial del lodo

Parámetro	Resultado
Color (Munsell)	5GY 8/1- gris verdoso claro
Contenido de agua	29,23 %
Límite líquido	38 %
Índice plástico	14 %
Clasificación AASHTO	A-6
Sistema Unificado de Clasificación de suelos	CL- Arcilla de baja plasticidad
Densidad aparente	0,85 g/cm^3
Contenido de materia orgánica	1,62 %
Conductividad	130,9 µS/cm
Potencial de hidrógeno (pH)	8,57
Actividad puzolánica	139,42 mg $Ca(OH)_2$/g

- **Tamaño de partículas por difracción laser**

Figura 38

Distribución del tamaño de partícula del material fino residual

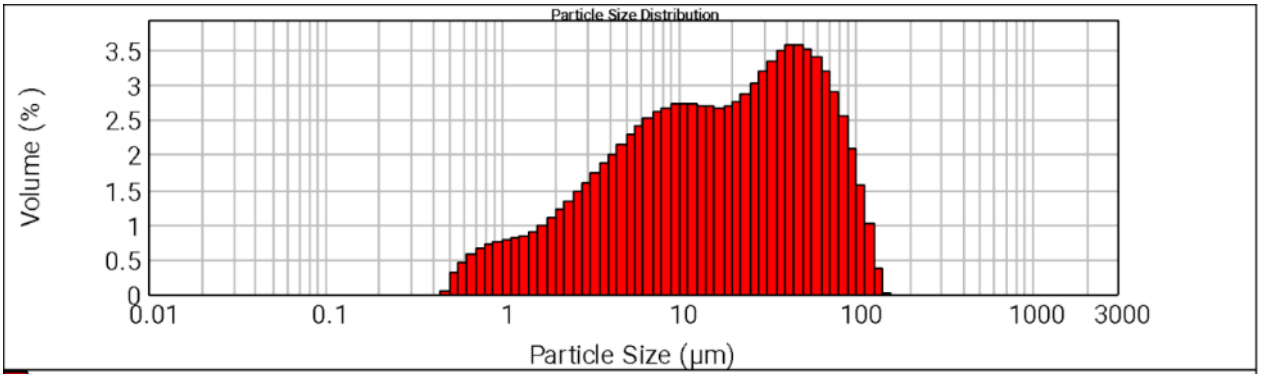


Tabla 11

Resultados de prueba para determinar el tamaño de partícula por difracción láser

Parámetro	Valor
Dispersante	Agua
Índice de refracción dispersante (IR)	1,33
Índice de refracción muestra (IR)	1,62
Obscuración del láser	11,81 %
D (0,1)	2,23 µm
D (0,5)	17,14 µm
D (0,9)	72,35 µm
Residual	1,28 %

- **Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF)**

Tabla 12

Óxidos presentes en la muestra de FFRR

Óxidos	% p/p	Óxidos	% p/p
MgO	37,59	TiO_2	0,0877
SiO_2	37,00	P_2O_5	0,0459
Fe_2O_3	9,86	V_2O_5	0,0095
Al_2O_3	4,26	ZnO	0,0061
CaO	1,54	WO_3	0,0061
NiO	0,361	Ag_2O	0,0058
Cr_2O_3	0,348	CuO	0,0052
Na_2O	0,245	SrO	0,0016
MnO	0,164	ZrO_2	0,0016
K_2O	0,127	Sc_2O_3	0,0013
LOI	8,33		

- **Difracción de rayos X (DRX)**

Figura 39

Difractograma de rayos X (DRX)

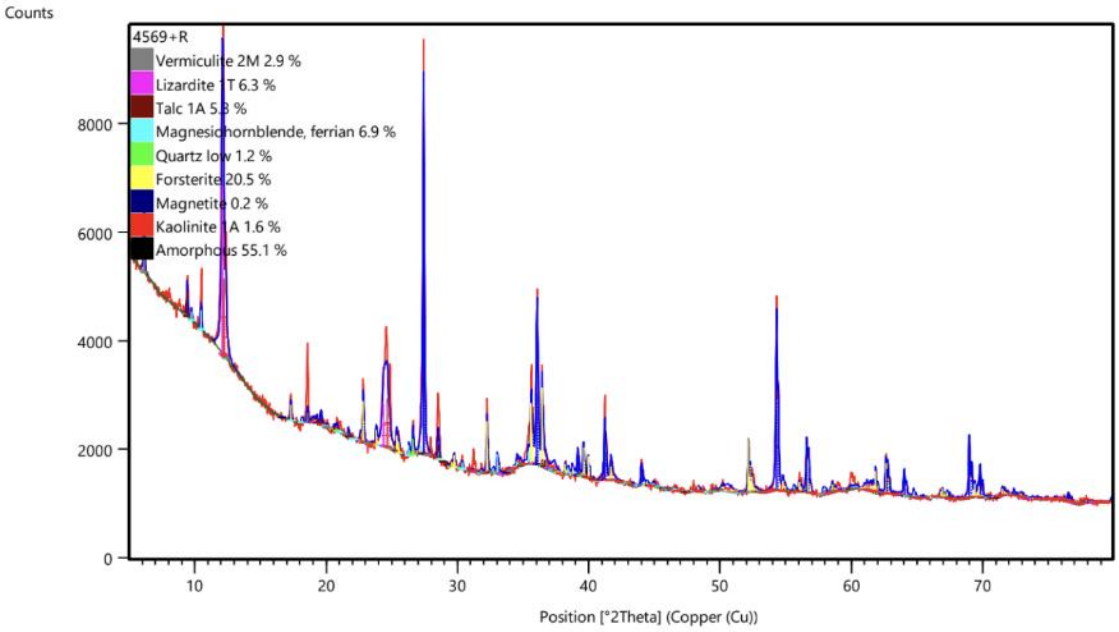


Tabla 13

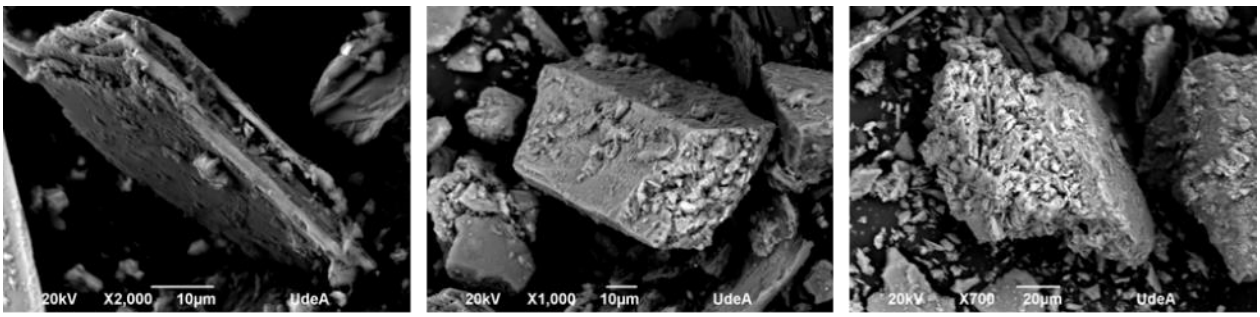
Composición mineralógica de la muestra de FFRR

Código	Score	Nombre	Composición (%)	Fórmula Química
98-016-7959	66	Rutile	---	TiO_2
98-009-3094	16	Quartz low	1,2	SiO_2
98-006-3192	18	Kaolinite 1A	1,6	$H_4Al_2O_9Si_2$
98-008-2411	29	Lizardite 1T	6,3	$H_4Fe_{0,159}Mg_{2,841}O_9Si_2$
98-002-7644	37	Vermiculite 2M	2,9	$H_2Mg_3O_{12}Si_4$
98-010-0682	17	Talc 1A	5,3	$H_2Mg_3O_{12}Si_4$
98-007-1852	16	Magnesiohornblende, ferrian	6,9	$H_{1,93}Al_{1,54}Ca_{1,6}Fe_{1,68}K_{0,08}Mg_{3,16}Na_{0,44}O_{24}Si_{6,76}Ti_{0,17}$
98-008-5312	53	Forsterite	20,5	$Fe_{0,19}Mg_{1,81}O_4Si$
98-015-8506	10	Magnetite	0,2	Fe_3O_4
		Material amorfo	55,1	---

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Figura 40

FFRR bajo microscopio electrónico de barrido



a) b) c)

Tabla 14

Resultados EDS sobre las superficies de la muestra

Elemento	Composición elemental por zona analizada (Wt% relativo)		
	a	b	c
C	12,31	16,60	25,75
O	41,73	40,60	35,75
Mg	17,07	11,21	13,82
Al	1,31	0,75	1,10
Si	19,21	19,03	14,34
K	0,14	-	-
Ca	0,44	4,43	0,52
Cr	-	0,15	0,66
Fe	7,12	6,91	7,69
Ni	0,33	0,32	0,36
Cu	0,34	-	-

- **Discusión**

El material residual presenta una granulometría predominantemente fina y un notable contenido de materia amorfa. El registro de humedad inicial y una pérdida por ignición (LOI) elevado complementan su caracterización como un fino con fracción cohesiva significativa y rica en óxidos de magnesio (MgO) y sílice (SiO_2) que confirman su naturaleza ultramáfica.

La actividad puzolánica medida (Tabla 10) de 139,42 mg $Ca(OH)_2$/g revela baja reactividad, y la composición química (SiO_2 37 %, Al_2O_3 4,26 %, Fe_2O_3 9,86 %, suma ≈ 51,1 % (Tabla 12)) no alcanza el umbral típico exigido para considerar un material como puzolana natural

según criterios internacionales como el de la ASTM C618 ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 70$ %, Puzolana clase F).

La composición mineralógica obtenida mediante DRX (Tabla 13, Figura 39) mostró que el residuo está constituido principalmente por forsterita y lizardita y porcentajes menores de talco, vermiculita, cuarzo, caolinita, magnetita y una fracción amorfa que alcanza el 55,1 %; al contrastar esto con los resultados de XRF se puede señalar que una parte significativa del magnesio puede atribuirse a las fases cristalinas identificadas, dado que forsterita, lizardita y talco son portadores naturales de este elemento en su estructura. En consecuencia, es posible que solo una fracción reducida del magnesio se aloje en el material amorfo o en microfases no resueltas por difracción, lo que sugiere que el Mg detectado por FRX no se encuentra principalmente en forma de óxido libre, sino en fases silicatadas estables características del tipo de roca del que proceden los finos residuales.

El análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) confirmó la presencia de partículas laminares y fragmentadas, con superficies heterogéneas. Los espectros EDS obtenidos en distintas áreas de la muestra (a-c Figura 40) revelaron composiciones dominadas por oxígeno (O) y sílice (Si) acompañados de magnesio (Mg) y hierro (Fe) lo que aporta evidencia adicional de su carácter serpentínico y composición ultramáfica. La presencia puntual de Ca (hasta 4,4 % en algunas áreas) indica inclusiones carbonatadas o fases secundarias menores. Se detectaron trazas de Cr y Ni (<1 %), cuya presencia sugiere potenciales implicaciones ambientales si existieran procesos de lixiviación. Por otro lado, el bajo contenido de Al (<1,5 %) reafirma que el material es deficiente en alúmina, lo que limita la formación de geles complejos y explica su baja reactividad puzolánica.

5.2 Caracterización de la arena

- **Distribución del tamaño de partícula**

Tabla 15

Distribución de tamaño de partícula de la arena

Tamiz No.	Diámetro (mm)	Peso (g)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasa (%)
4	4,76	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,38	0,19	0,02	0,02	99,98
16	1,19	1,49	0,16	0,18	99,82
30	0,60	26,00	2,84	3,02	96,98
50	0,30	268,65	29,30	32,32	67,68
100	0,15	479,57	52,31	84,63	15,37
200	0,08	100,18	10,93	95,55	4,45
Fondo	0,00	40,76	4,45	100,00	0,00

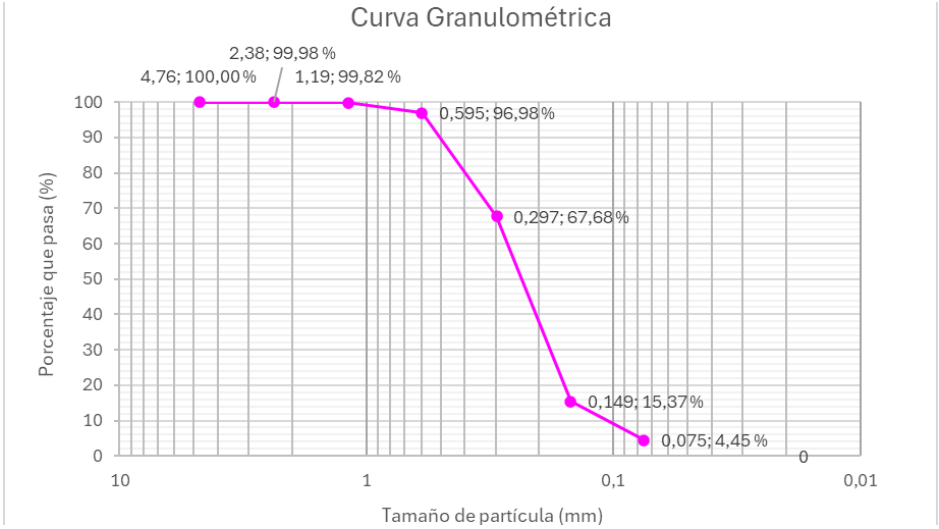
Tabla 16

Parámetros de gradación y finura de la arena

Parámetro	Resultado
D10 (mm)	0,11
D30 (mm)	0,19
D60 (mm)	0,28
Coeficiente de uniformidad Cu	2,44
Coeficiente de curvatura Cc	1,17
Módulo de Finura MF	1,20

Figura 41

Curva granulométrica de la arena



- **Densidad y absorción**

Tabla 17
Resultados de ensayos de densidad y absorción

Parámetro	Resultado
Densidad bulk	1,31 g/cm^3
Porcentaje de vacíos	49,99 %
Densidad relativa SH	2,63 g/cm^3
Densidad relativa SSS	2,67 g/cm^3
Densidad relativa aparente	2,75 g/cm^3
Absorción	1,59 %

- **Contenido de materia orgánica por colorimetría**

Figura 42
Resultados del ensayo de impurezas orgánicas en la arena por colorimetría



Nota: Se toma como estándar el color rotulado con el número 3

- **Discusión**

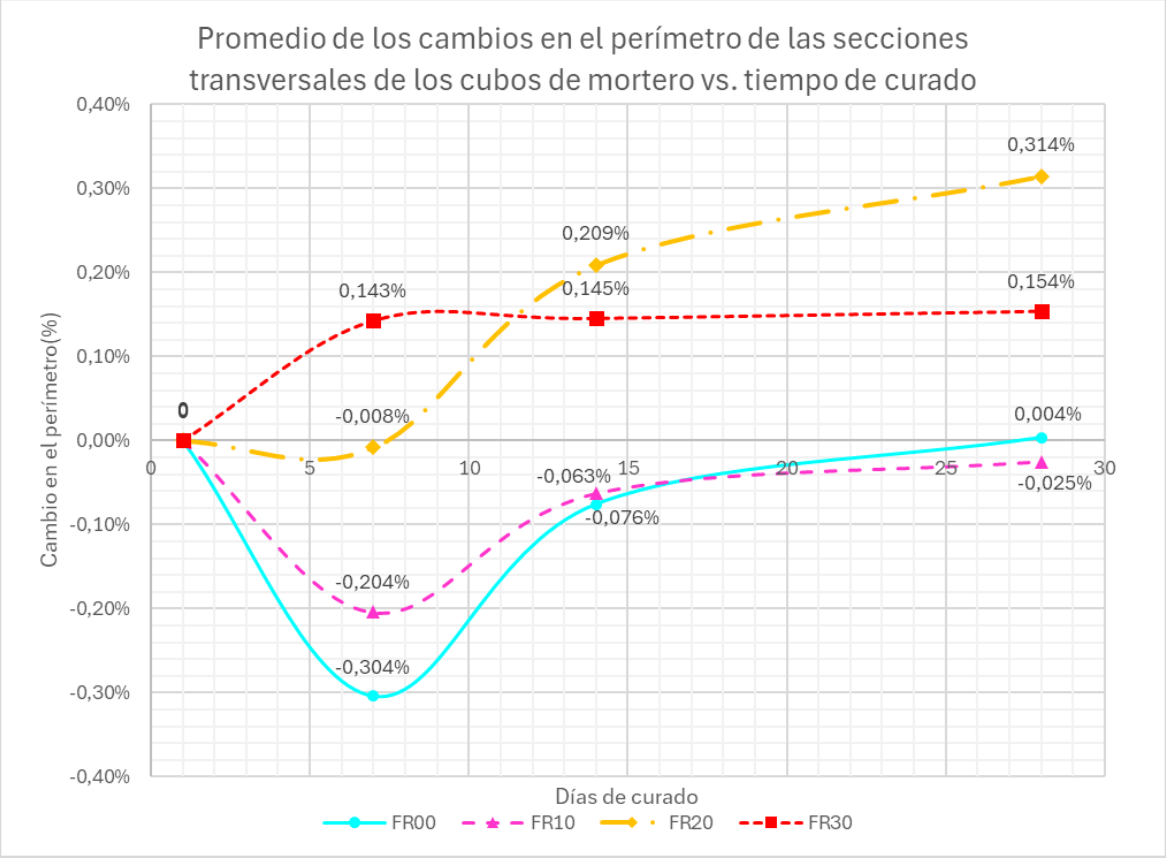
Tal como se muestra en la Tabla 17 la arena utilizada mostró un módulo de finura muy bajo (1,20) frente a los rangos estandarizados para arenas de mortero de revoque (ASTM C-897) que van entre 2,05 y 3,05, lo que refleja que el material empleado está significativamente por debajo de los valores de referencia. El coeficiente de uniformidad (Cu=2,44) refuerza la interpretación de que se trata de una arena pobremente gradada, con predominio de fracciones menores de 0,3 mm

y escasa contribución de partículas más gruesas. Esta condición implica mayor superficie específica a recubrir y, en consecuencia, mayor volumen de pasta necesario para asegurar cohesión, lo que puede incrementar la susceptibilidad a retracción y fisuración en revoques. La arena utilizada es representativa de la práctica local, pero se encuentra fuera de los rangos de calidad granulométrica para garantizar desempeño óptimo sin ajustes de mezcla. En contextos de obra, la arena comercial extraída de ríos suele presentar variabilidad en limpieza y gradación. La arena cumple con los criterios de colorimetría en la prueba de materia orgánica, lo que indica ausencia de contaminantes orgánicos en niveles significativos que puedan interferir en los procesos de hidratación del cemento o comprometer la durabilidad del mortero.

5.3 Control de expansión durante curado del mortero

Figura 43

Variación en las dimensiones de las probetas



- **Discusión**

En los resultados de control de expansión según el método utilizado, se observó que, aunque los valores absolutos de variación dimensional son bajos (-0,3 % a +0,3 %), existe una tendencia clara y diferenciada entre las series, con excepción del FR30 donde los datos resultan más variables. En la Figura 43 se puede observar de forma resumida estas tendencias.

En los morteros FR00 y FR10 se observa una retracción temprana durante la primera semana, la cual puede atribuirse a la denominada contracción química. Este fenómeno, descrito en la literatura, ocurre cuando una pasta de cemento permanece en contacto con exceso de agua y el volumen total del sistema (pasta + agua) disminuye, debido a que los productos de hidratación ocupan un volumen menor que el de los reactivos originales (cemento + agua). Sin embargo, esta tendencia se atenúa hacia los 28 días, cuando se observa una recuperación parcial e incluso una ligera expansión en FR10, lo que sugiere que el proceso de curado en agua y la progresiva formación de productos de hidratación (geles C-S-H y fases secundarias) compensan parcialmente la pérdida volumétrica inicial a medida que rellenan poros y fisuras.

Por otro lado, los sistemas con mayor proporción de finos residuales (FR20 y FR30) exhiben desde el inicio un comportamiento expansivo. En FR20 apenas se aprecia retracción inicial y, por el contrario, se evidencia un incremento progresivo hasta +0,3 % a los 28 días, lo que indica un balance positivo entre la contracción química y los mecanismos de expansión asociados, posiblemente vinculados a la mayor retención de humedad del material. FR30, por su parte, muestra un patrón de expansión estable desde los primeros días (+0,15 % a día 7 hasta +0,16 % a día 28), aunque con cierta dispersión en los datos que refleja un comportamiento menos uniforme. En términos generales, estos resultados sugieren que la incorporación de finos residuales modifica la respuesta volumétrica de los morteros, reduciendo la retracción temprana y promoviendo una ligera expansión en estado saturado.

5.4 Fluidez

Tabla 18
Fluidez de los morteros

Dosificación	Fluidez, %
FR00	108,35
FR10	112,80
FR20	111,69
FR30	110,80

- **Discusión**

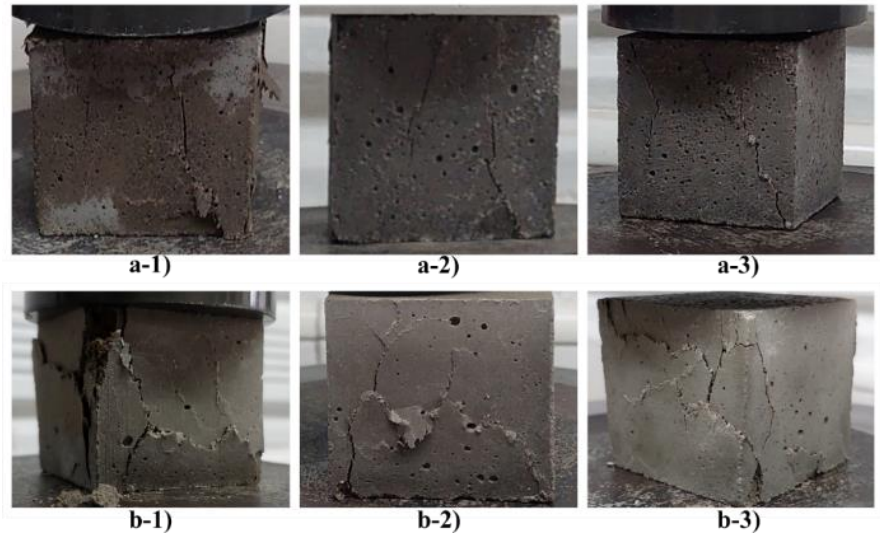
Los resultados de fluidez, comprendidos entre 108 % y 113 %, garantizan un desempeño homogéneo entre todas las mezclas. El agua de amasado se ajustó para mantener la trabajabilidad en un rango constante. La mezcla control (FR00) requirió 775 g de agua, mientras que las mezclas con finos residuales (FR10, FR20 y FR30) alcanzaron aproximadamente la misma fluidez con 750 g, lo que representa una reducción de la relación a/c de 1,63 a 1,58. Este comportamiento adquiere sentido al considerar la granulometría de la arena natural, caracterizada por una textura muy fina, que incrementa la superficie específica expuesta y, en consecuencia, la demanda de agua. La incorporación de finos residuales, aunque podría esperarse que aumentara la absorción, contribuyó en realidad a mejorar el empaquetamiento granular y a reducir el volumen de vacíos interparticulares. De este modo, se disminuye la fricción interna entre granos (acción lubricante de las partículas ultrafinas) y se optimiza la distribución de la pasta, permitiendo conservar la fluidez objetivo con menor contenido de agua. La estabilización de este efecto en FR30 sugiere que, a mayores proporciones de residuo, la superficie específica del material comienza a compensar el beneficio de empaquetamiento, limitando la reducción adicional en la demanda de agua. En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que el FFRR no modifica directamente la fluidez medida, pero sí incide en la eficiencia hidráulica del sistema, al reducir la relación agua/cemento necesaria para mantener la trabajabilidad dentro de los márgenes establecidos para morteros de revoque (100 %-120 %((Sánchez, 2001)).

5.5 Pruebas de desempeño

5.5.1 Resistencia a la compresión simple

Figura 44

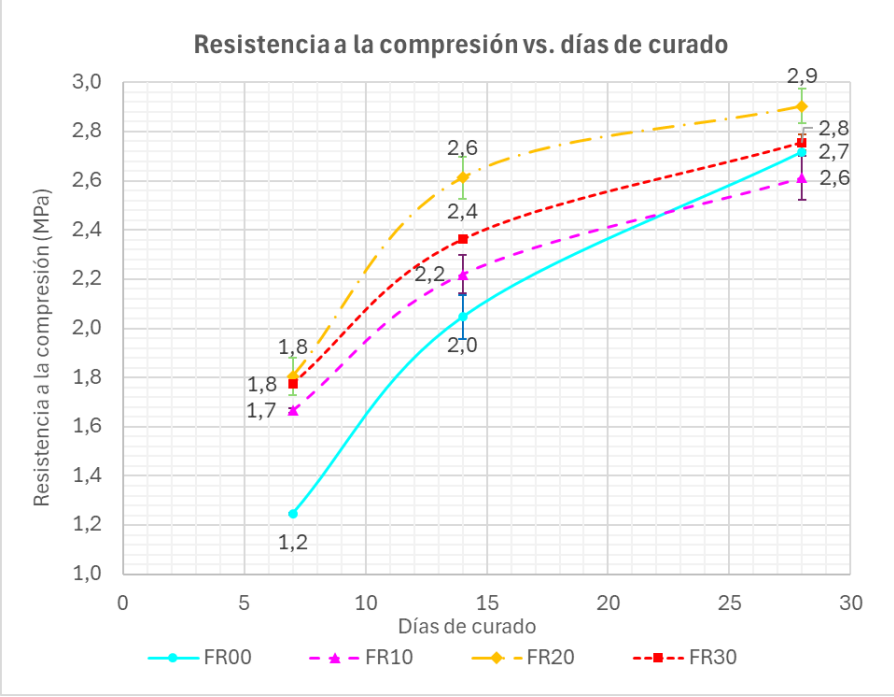
Fracturas de cubos de mortero



Nota. Se muestran las fracturas típicas obtenidas en los ensayos de RCS. Las imágenes de la fila *a* están asociadas a probetas con bajos contenidos de FFRR (FR00 Y FR10) y las de la fila *b* a las de contenido mayor (FR20 y FR30)

Figura 45

Resistencia a la compresión simple vs. Días de curado



- **Discusión**

Todas las mezclas mostraron la tendencia típica de ganancia de resistencia en morteros, con un incremento acelerado en edades tempranas (7-14 días) y una ralentización hacia los 28 días, describiendo una curva de crecimiento con aplanamiento final. Las mezclas con finos residuales (FR10, FR20, FR30) superaron al control en los primeros días (entre +0,5 y +0,6 MPa a 7 días, y hasta 30 % más a 14 días). A 28 días, FR20 presentó la mayor resistencia (2,9 MPa), seguida de FR30 (2,8 MPa), mientras que FR10 se ubicó en 2,6 MPa, ligeramente por debajo del control. En términos relativos, la mejora máxima fue de alrededor del 7 % (FR20 vs. FR00), lo que indica que la sustitución de hasta 20 % de arena por finos residuales no compromete la resistencia mecánica y puede incluso aportar un beneficio marginal.

El comportamiento del mortero control se explica también por su mayor relación agua/cemento modificada para alcanzar la fluidez adecuada, lo cual genera una matriz más porosa y menos densa, traduciéndose en resistencias menores. Las mezclas con finos residuales, además de beneficiarse de una menor a/c, presentan un efecto de micro relleno y una posible acción nucleante de la fracción amorfa, lo que favorece la densificación temprana sin afectar la trabajabilidad.

En cuanto a los mecanismos de falla (Figura 44), las probetas mostraron patrones típicos de morteros con elevada relación a/c: fisuración irregular, desprendimiento de costras superficiales y fracturas escalonadas más que fallas frágiles limpias. En FR00 y FR10 se observa un mayor número de microgrietas superficiales y zonas porosas, consistentes con una matriz menos densa y más propensa a la propagación intergranular de la fisura. En FR20 y FR30, en cambio, las fracturas se presentan de manera más cohesiva, con superficies de falla más compactas y menor desintegración de bordes, lo que sugiere una mejor cohesión pasta-árido atribuible al efecto de micro relleno del residuo. Estas diferencias cualitativas en los modos de fractura complementan los resultados de resistencia.

Cabe señalar que los valores absolutos obtenidos (2-3 MPa a 28 días) se encuentran muy por debajo de los reportados en normas como NRS-10 para morteros de referencia (Mortero tipo N con resistencia de 7.5 MPa a los 28 días (NRS-10, 2010)). Esto responde a la dosificación utilizada en el presente estudio, propia de morteros de revoque de obra con relaciones a/c elevadas y presencia de agregados finos de baja calidad, y no busca validar un mortero estructural sino

comparar tendencias relativas en el desempeño de las mezclas modificadas. En este marco, hasta este punto la formulación FR20 se perfila como la más favorable, combinando menor demanda de agua, adecuado nivel de fluidez y la resistencia relativa más alta a 28 días.

5.5.2 Absorción de agua por capilaridad

Figura 46

Absorción capilar en g/100 cm²

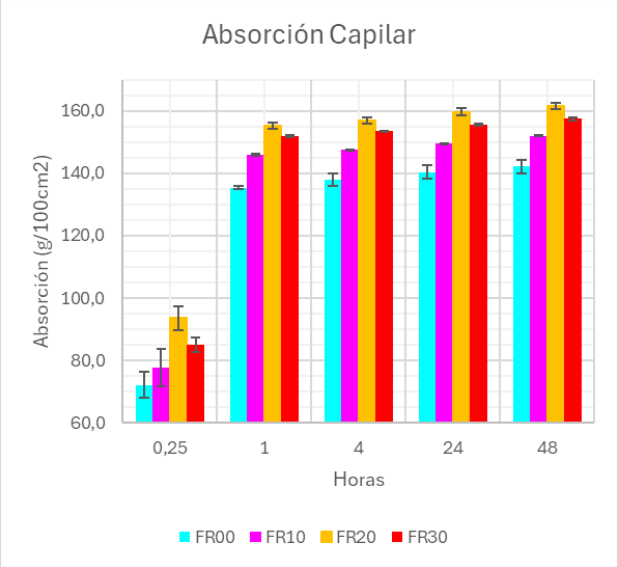
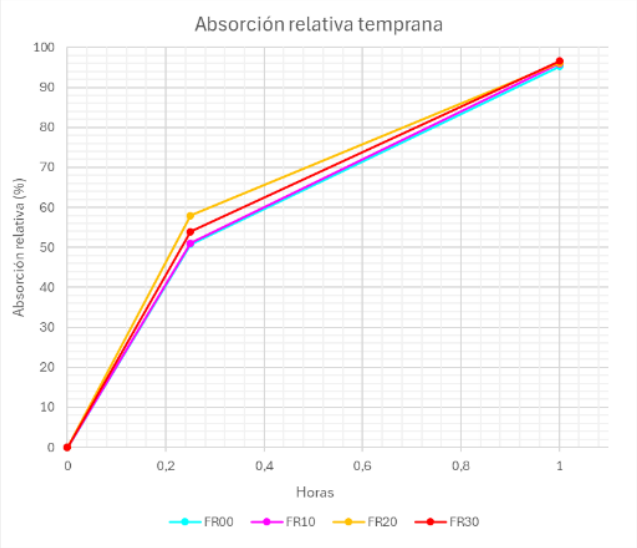
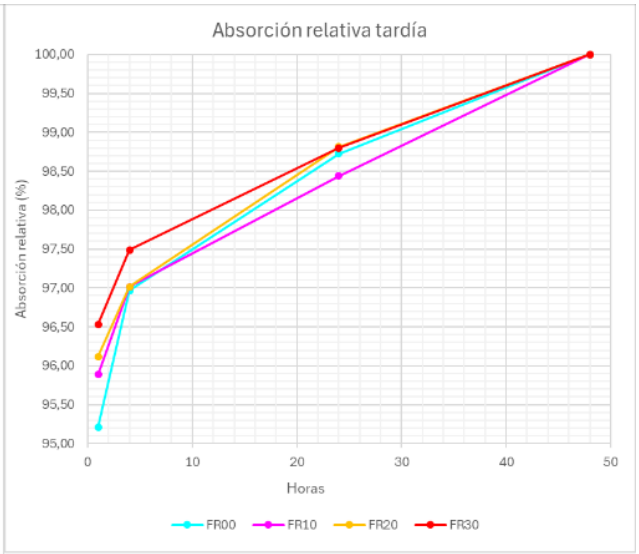


Figura 47

Absorción capilar relativa





- **Discusión**

Los resultados de absorción capilar muestran que todas las mezclas siguen una misma tendencia temporal: un incremento acelerado en las primeras horas (0,25-1 h), con estabilización progresiva a partir de las 24 h, momento en el cual las probetas se someten a inmersión total. La mezcla control (FR00) presentó consistentemente las absorciones más bajas, mientras que las mezclas con residuo fino (FR10, FR20 y FR30) alcanzaron valores más altos en todos los tiempos, con FR20 mostrando una mayor absorción absoluta en g/100 cm² incluso por encima de FR30. Este comportamiento puede explicarse por un efecto de umbral en la incorporación de finos: con un 20 % de sustitución se optimiza el empaquetamiento granular y se genera una red capilar altamente conectada.

El análisis de absorción relativa temprana (primeras 0-1 h) confirma que las mezclas modificadas, en particular FR20, absorben agua más rápidamente que la de control, lo que refleja una cinética capilar inicial más activa. En contraste, FR00 muestra una succión más lenta en esa etapa, atribuible a su mayor relación a/c y a una microestructura menos compacta en el corto plazo. En la absorción relativa tardía (4-24 h y 24-48 h bajo inmersión total) FR30 mantiene un porcentaje de absorción ligeramente mayor (absorbe más rápido).

Desde el punto de vista de la durabilidad, este resultado implica que la mezcla FR20, aunque presenta un mejor desempeño mecánico relativo, también ofrece una mayor permeabilidad inicial al ingreso de agua y, por tanto, podría ser más vulnerable al transporte de agentes agresivos en condiciones reales de exposición. FR30, en cambio, si bien no alcanza la absorción total más alta, muestra una velocidad de succión prolongada mayor, lo que también puede representar un riesgo frente a ciclos de humedad prolongados. Así, los datos confirman que el uso de finos residuales modifica de forma significativa la microestructura y el transporte de agua en los morteros, lo cual debe ser cuidadosamente considerado al balancear beneficios mecánicos con posibles compromisos en durabilidad.

5.6 Pruebas de intemperismo acelerado

5.6.1 Resistencia a la compresión simple

Figura 48

Fracturas de cubos de mortero sometidos a intemperismo acelerado



Nota. Se muestran las fracturas típicas obtenidas en los ensayos de RCS

Figura 49

Resistencia a la compresión simple vs. Horas de intemperismo acelerado

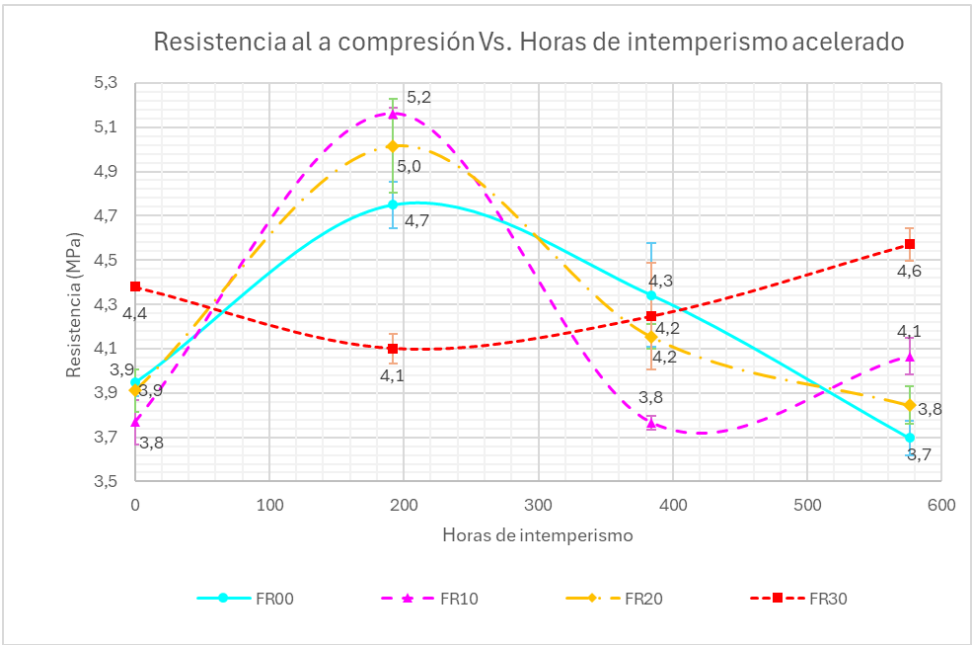
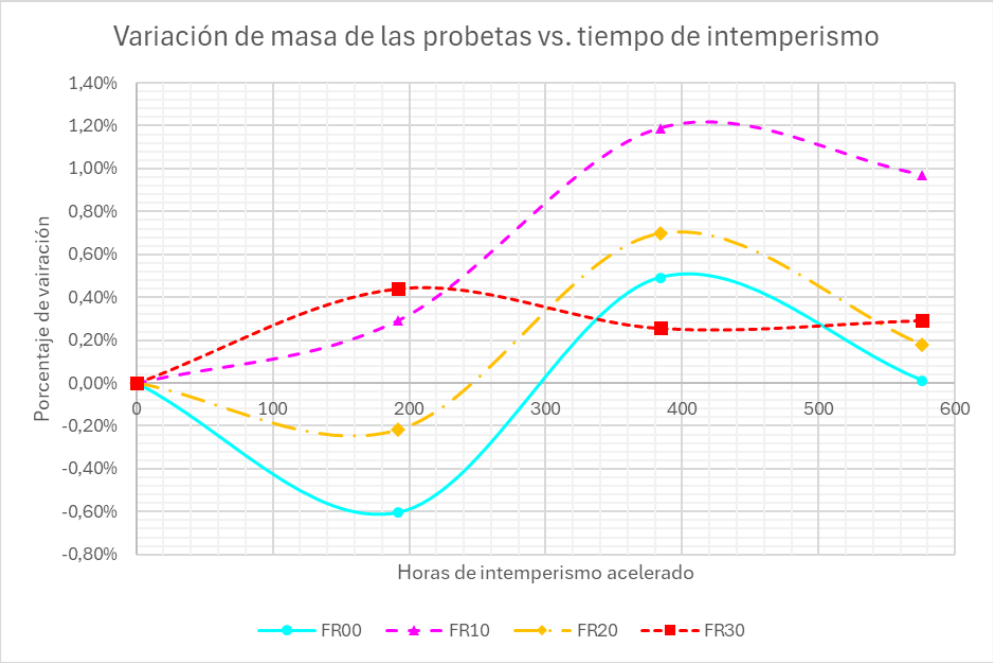


Figura 50

Variación de masa de las probetas vs. Horas de intemperismo acelerado



- **Discusión**

Antes de exponer las probetas al intemperismo acelerado, el secado al horno produjo un incremento notable en la resistencia a compresión con respecto a las que fueron falladas a los 28 días de inmersión en agua: 45 % en FR00, 44 % en FR10, 35 % en FR20 y 54 % en FR30. Este fenómeno puede explicarse por la reducción de humedad libre en los poros y la consecuente densificación de la matriz.

Los ensayos de intemperismo se realizaron mediante ciclos combinados de radiación UV y condensación de agua, lo que induce de manera simultánea procesos de secado superficial y rehumectación. Bajo estas condiciones se observa un comportamiento diferencial muy claro entre las dosificaciones. La mezcla control (FR00) mostró la mayor susceptibilidad a la degradación superficial: pérdida de material visible y la mayor reducción de masa registrada en promedio (-1,36 g; -0,603 %) tras 192 h de intemperismo, lo que indica lixiviación y desprendimiento de partículas superficiales favorecidos por la mayor relación a/c y la microestructura más abierta de esta dosificación. Cabe destacar que las probetas fueron secadas al horno antes de cada pesaje, por lo que las variaciones registradas no responden solo a humedad absorbida, sino a cambios

permanentes en la masa (pérdida de material o incorporación de productos precipitados resistentes al secado).

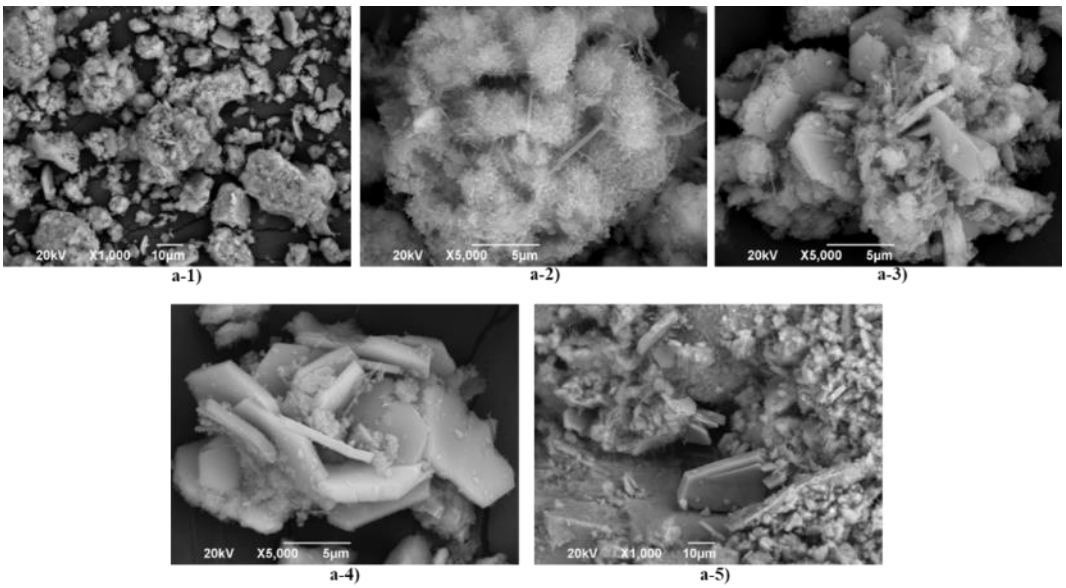
Por su parte, FR10 y FR20 presentaron ganancias de masa en determinados intervalos: la mayor ganancia promedio se observó en FR10 a las 384 h (2,63 g; 1,190 %). Estas ganancias indican precipitación y/o taponamiento interno por productos secundarios (sales cristalizadas, carbonatos o fases hidratadas secundarias) que quedan retenidos tras el ciclo de condensación y resisten el secado previo al pesaje. Este fenómeno explicaría también los picos iniciales de resistencia; en FR00 y FR20 la pérdida de material fue periférica o superficial, mientras que internamente se generaron productos adicionales de hidratación y carbonatación que reforzaron temporalmente la matriz. No obstante, la naturaleza reversible o frágil de esos depósitos hace que, con la continuación de ciclos húmedo-seco y radiación, se produzcan redisolución, microfisuración o desprendimientos que conducen a caídas bruscas en la resistencia.

La dosificación FR30 exhibe la mayor estabilidad en masa (oscilaciones contenidas, ≈0,4 %) y una trayectoria de resistencia más gradual y sostenida hasta 576 h. Esto sugiere nuevamente que un contenido más alto de finos reconfigura la microestructura (mayor dificultad y posible menor conectividad de los canales capilares útiles) de modo que se limita tanto la lixiviación como la formación/desprendimiento de depósitos móviles. En consecuencia, FR30 no alcanza los picos tempranos de las demás dosificaciones, pero resiste mejor la exposición prolongada a los ciclos de radiación y rocío. En general no se observaron cambios físicos importantes tras el intemperismo como grietas o degradación localizada.

5.6.2 Microscopía electrónica de barrido

Figura 51

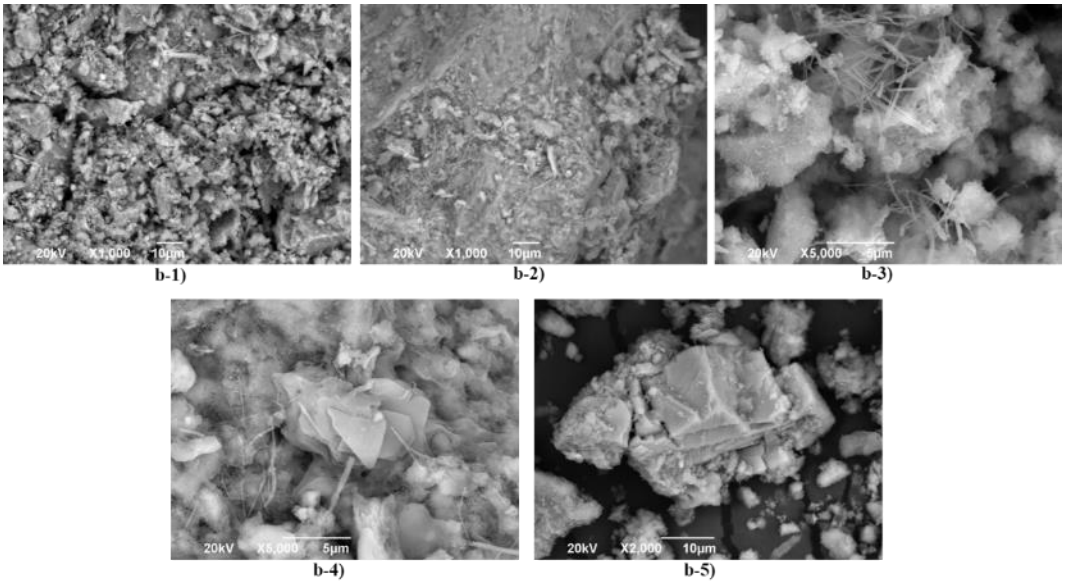
Imágenes por microscopía electrónica de barrido para FR00



Nota. a-1, a-2, a-3 y a-4 fueron tomadas a muestra tamizada con la malla No. 200, a-5 fue tomada a un pequeño fragmento de probeta.

Figura 52

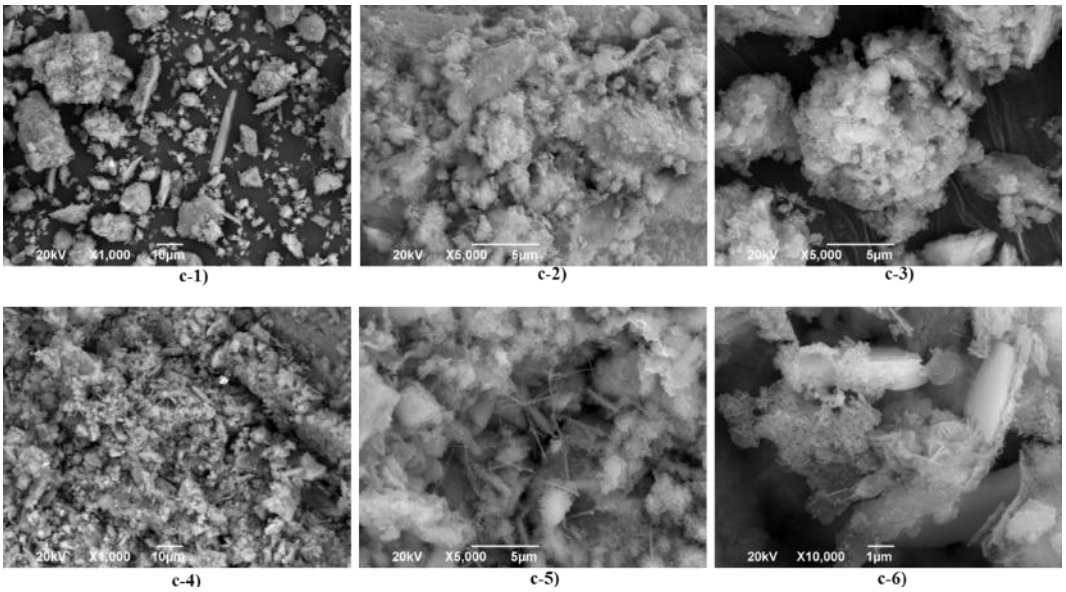
Imágenes por microscopía electrónica de barrido para FR20



Nota. b-5 fue tomada a muestra tamizada con la malla No. 200. b-1, b-2, b-3 y b-4 fueron tomadas a un pequeño fragmento de probeta

Figura 53

Imágenes por microscopía electrónica de barrido para FR30



Nota. c-1, c-2 y c-3 fueron tomadas a muestra tamizada con la malla No. 200. c-4, c-5, c-6 fueron tomadas a un pequeño fragmento de probeta.

Tabla 19

Resultados EDS sobre las superficies de las muestras

Elemento	Peso aparente por muestra (%)				
	Muestra <75µm		Fragmento de probeta		
	c-3	a-4	b-4	c-5	c-6
C	26,31	35,65	0,00	0,00	1,70
O	39,03	36,12	39,30	36,58	20,05
Mg	6,58	0,19	5,08	7,97	4,67
Al	1,37	3,60	2,58	2,31	2,44
Si	10,83	3,24	12,96	17,33	11,52
K	0,21	-	0,99	0,26	-
Ca	12,26	18,26	32,01	29,26	38,20
Fe	3,43	2,46	6,71	6,29	6,83
S	-	0,13	-	-	-
Cl	-	0,34	-	-	-
Ti	-	-	0,37	-	-

- **Discusión**

El análisis SEM-EDS posterior a 572 h de intemperismo acelerado revela principalmente diferencias claras entre FR00 y FR30. En FR00, tanto en el material tamizado (<75 µm) como en

los fragmentos de probeta, se observa una abundancia de cristales laminares bien definidos, con morfología característica de portlandita ($Ca(OH)_2$). Estos aparecen en zonas porosas, lo que concuerda con la tendencia de esta fase a precipitar en cavidades libres de la matriz. En ambos tipos de muestra la portlandita se reconoce fácilmente, con tamaños relativamente grandes y poco transformados hacia productos secundarios. Además, se distinguen estructuras compatibles con etringita, reforzadas por los picos de Ca, O y S obtenidos en el EDS. En conjunto, FR00 se caracteriza por una microestructura dominada por portlandita abundante, visible y con escasa sustitución por fases posteriores. Por su parte, FR30 presenta una morfología diferente según el tipo de muestra. En el material tamizado predomina un aspecto amorfo, con agregados globulares y masas esponjosas sin geometría cristalina clara. En cambio, en los fragmentos de probeta aparecen también cristales prismáticos y laminares, aunque en menor proporción que en FR00, coexistiendo con estas masas amorfas que constituyen la morfología dominante y que recubren partículas duras actuando como una matriz cementante secundaria. Este contraste confirma que la incorporación de finos reduce la cantidad de portlandita libre visible y promueve una matriz más heterogénea y compacta. Visualmente se percibe una diferencia en la densidad de la microestructura: FR00 muestra mayor porosidad en las áreas examinadas, mientras que FR30 exhibe superficies más colmatadas.

En el caso de la dosificación FR20, las imágenes de SEM muestran un estado intermedio entre lo observado en FR00 y FR30. Las estructuras aciculares características de la etringita se encuentran presentes, pero su morfología aparece menos robusta y más delgada en comparación con FR00, lo que sugiere una menor estabilidad de estas fases o un inicio de su transformación. La reducción progresiva de estas formaciones aciculares puede interpretarse como una transición hacia una microestructura dominada por productos más amorfos y menos cristalinos, lo que explicaría por qué FR20 muestra un comportamiento capilar más activo que FR30 en las primeras horas del ensayo de absorción capilar, pero sin llegar a la misma dominancia de material amorfo.

El análisis EDS (Tabla 19) complementa estas observaciones, confirmando la presencia de portlandita y etringita como fases principales de hidratación, al tiempo que muestra que el magnesio no se concentra particularmente en las áreas amorfas y no hay indicios de la formación de brucita ($Mg(OH)_2$).

5.7 Pruebas de campo

5.7.1 Integridad del revoque

Figura 54

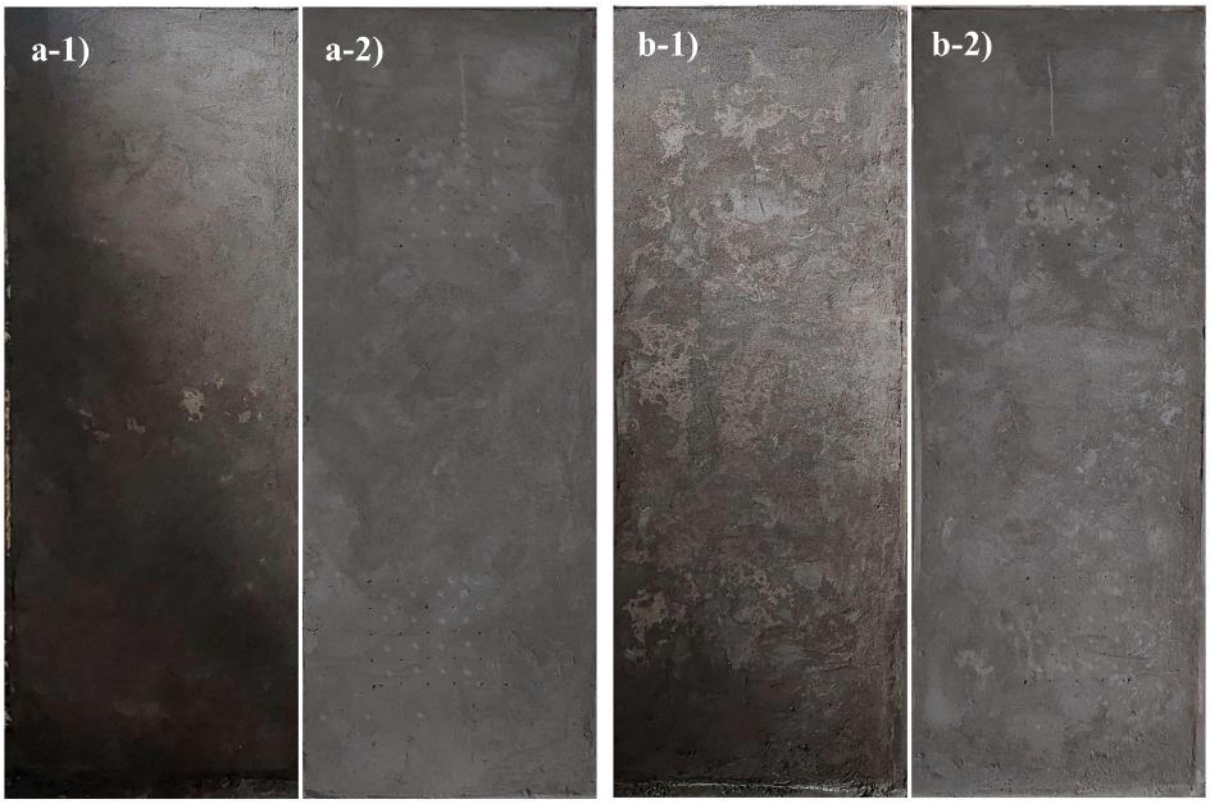
Grietas en pared revocada con FR30

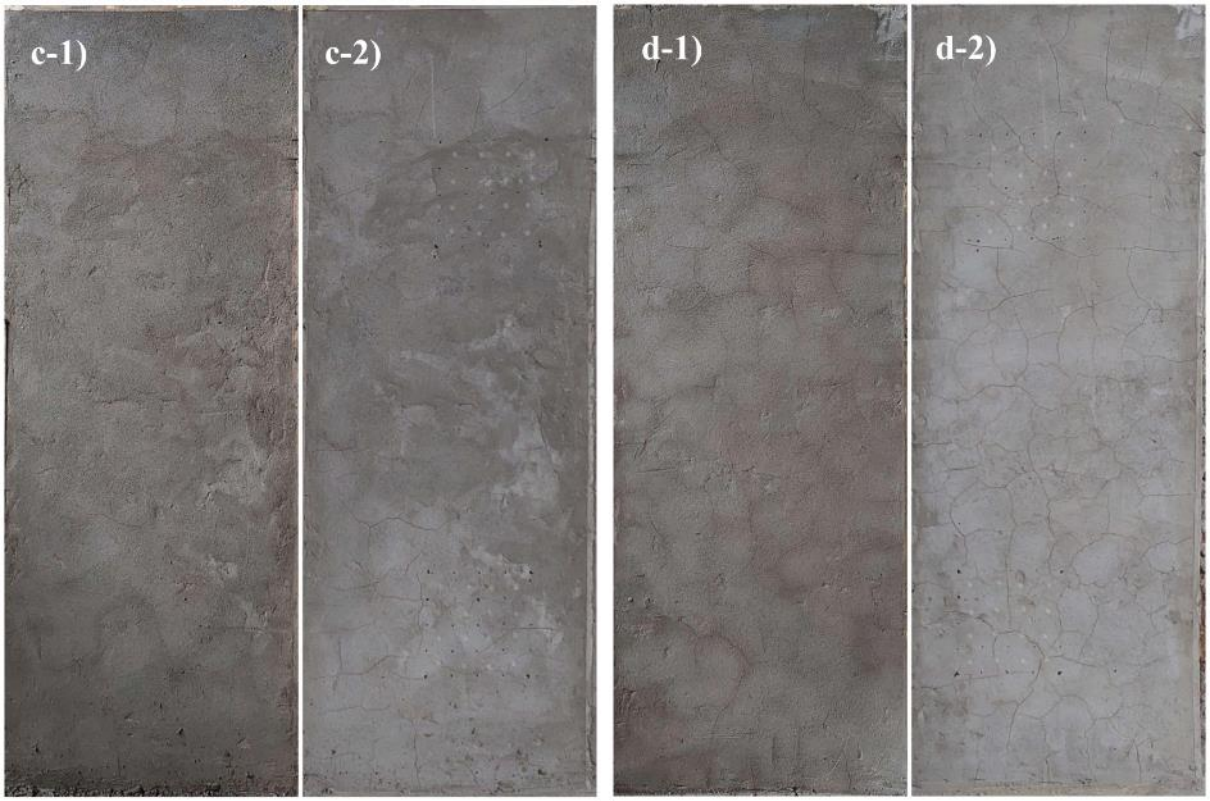


Nota. La amplitud máxima que alcanzan algunas de las grietas registradas fue de 1,40 mm

Figura 55

Paños revocados con las diferentes dosificaciones





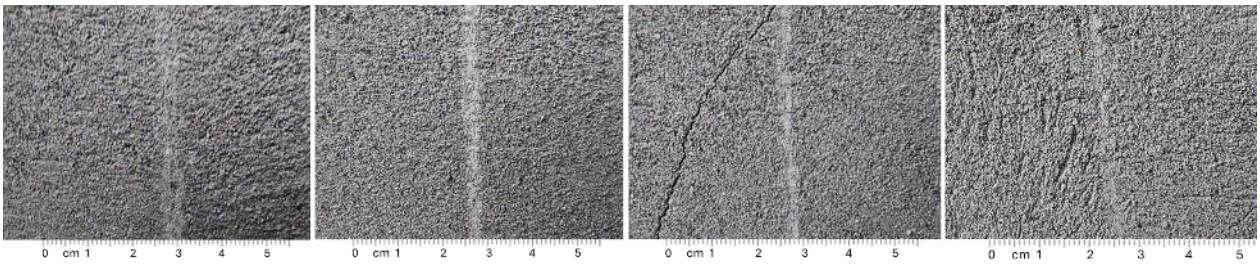
Nota. En a-1, b-1, c-1, d-1 se muestran los paños después de un día de aplicación; en a-2, b-2, c-2, d-2, se muestran 60 días después

5.7.2 Control de calidad

- **Raya**

Figura 56

Prueba de raya con palustre sobre los paños revocados



- **Prueba con esclerómetro**

Figura 57

Resistencia a la compresión simple vs. Índice de revote a los 28 días

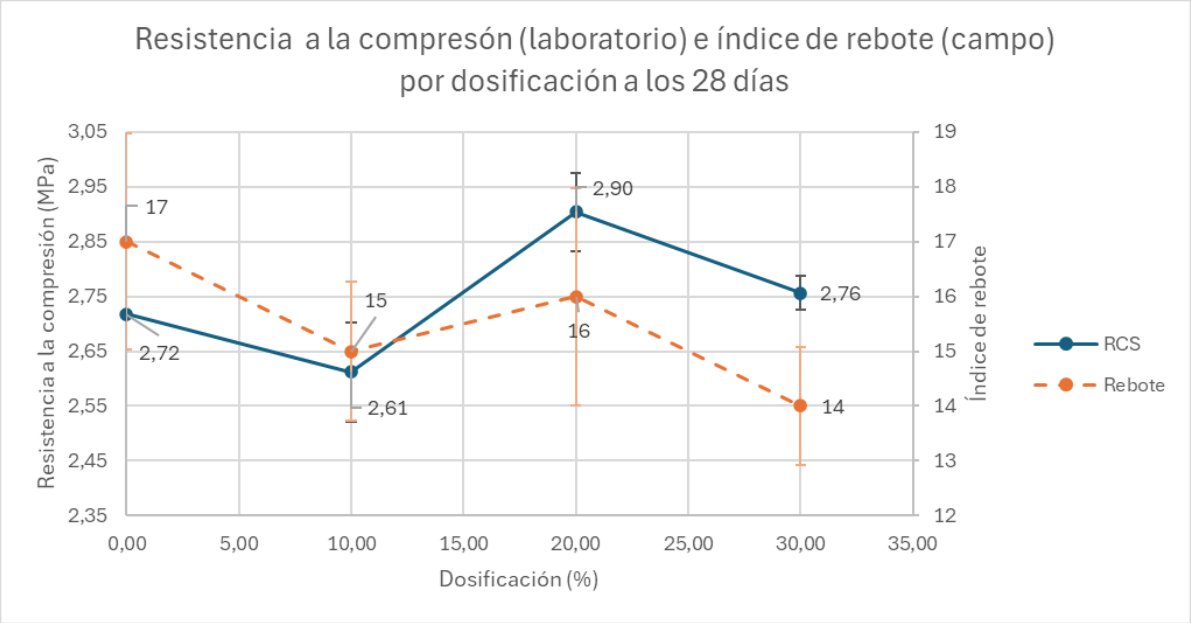
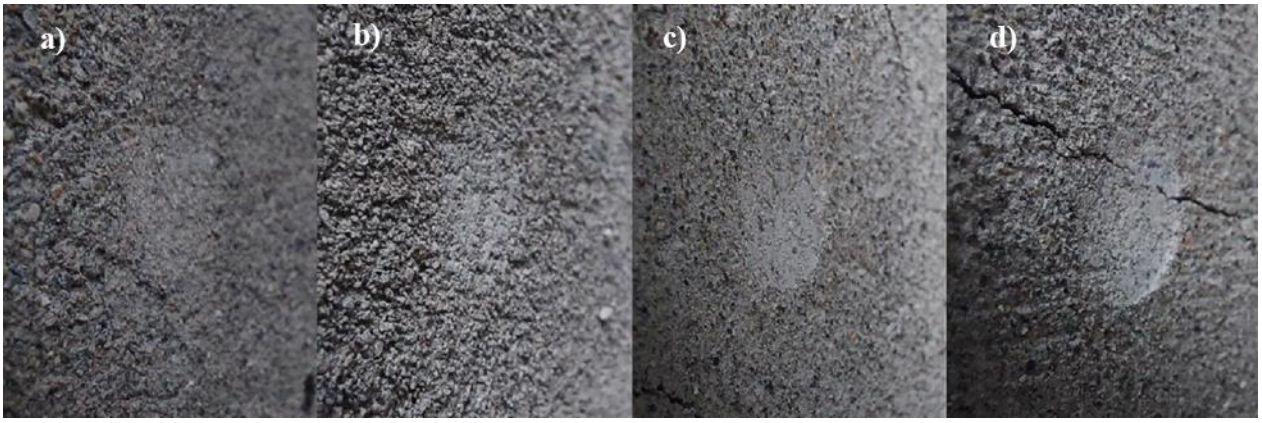


Figura 58

Marcas dejadas por el esclerómetro sobre los paños de revoque



Nota. a) FR00, b) FR10, c) FR20, d) FR30

- **Discusión**

En los paños de revoque aplicados sobre muro experimental se registró la aparición de fisuras en FR20 y FR30 de hasta 1,4 mm de grosor (Figura 54, Figura 55), mientras que FR00 y FR10 no presentaron manifestaciones patológicas comparables. Las fisuras se desarrollaron durante las tres primeras horas después de la aplicación, lo que permite clasificarlas como retracción plástica, asociadas a la pérdida acelerada de agua superficial antes de que el mortero alcanzara una cohesión interna suficiente para resistir tensiones de secado. Este fenómeno se vio acentuado por la alta finura del FFRR, su índice plástico moderado y el hecho de que, si bien se logró mantener la fluidez en el rango objetivo (≈110 % Tabla 18), ello se alcanzó con relaciones agua/cemento relativamente bajas. Estas condiciones modificaron la cinética de fraguado y evaporación en obra, generando una microestructura superficial más vulnerable a la retracción temprana cuando el contenido de residuo superó el 20 %. Según esto, si bien la sustitución de arena por 20 % de FFRR puede considerarse adecuada para mantener resistencias similares o incluso superiores a las del control en laboratorio, en condiciones de aplicación real la transición entre 20 % y 30 % de reemplazo representa un umbral crítico: a partir de allí, la tendencia a fisurar se hace más evidente, aun cuando la resistencia a compresión en cubos no muestre deterioro.

A pesar de este comportamiento, todas las mezclas presentaron buena adherencia a la pared, sin evidencias de desprendimientos ni abultamientos, lo que indica una compatibilidad adecuada con el soporte de prueba. En términos de trabajabilidad, FR30 se distinguió como la mezcla más plástica y de más fácil aplicación, facilitando la extensión y el acabado con llana respecto al control.

Al cabo de 28 días de curado se realizaron ensayos in situ de control, incluyendo la prueba de raya con palustre y la verificación de cohesión mediante espátula. Los resultados no mostraron diferencias significativas con respecto al mortero control (FR00), lo que confirma para estas propiedades que la integridad del recubrimiento no se vio comprometida por la incorporación de FFRR. Únicamente en FR30 se percibió un mortero seco ligeramente más blando evidenciado en las marcas dejadas por el esclerómetro (Figura 58), aunque sin pérdida de cohesión o adherencia relevantes.

La comparación entre la resistencia a compresión simple (RCS) en laboratorio y el índice de rebote en campo a los 28 días (Figura 57) evidencia una ligera discrepancia entre ambos métodos de control. Mientras que en laboratorio FR20 alcanzó la resistencia más alta (2,90 MPa), en campo

este comportamiento no se tradujo en un mayor índice de rebote, el cual permaneció en 16, similar al FR10 y por debajo del control (FR00, con 17). A su vez, FR30, pese a exhibir una resistencia de 2,76 MPa en cubos (próxima al valor del control) registró el índice de rebote más bajo (14). Estos resultados sugieren que la respuesta superficial del revoque, evaluada con martillo de rebote, no depende únicamente de la resistencia global del material, sino también de su microestructura y del desarrollo de tensiones locales durante el secado y curado. En particular, las mezclas con mayores contenidos de finos (FR20 y FR30) presentan superficies menos densas o más heterogéneas, lo que explica que, aun con resistencias comparables o superiores en laboratorio, en campo se registren valores más bajos en el ensayo no destructivo.

Los resultados de campo confirman que la respuesta del mortero no depende únicamente de su resistencia mecánica medida en laboratorio, sino también de factores granulométricos y reológicos que afectan la interacción con la pared, el secado superficial y la distribución de tensiones en el recubrimiento. Así, el comportamiento observado en FR20 y FR30 pone en evidencia la necesidad de balancear los beneficios derivados del mejor empaquetamiento y la reducción en la demanda de agua con los riesgos asociados a la retracción plástica en obra, aspecto clave para definir una formulación óptima de aprovechamiento de estos residuos.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La caracterización de los finos residuales de dunita serpentinizada evidenció un material ultramáfico extremadamente fino, con alto contenido de fracción amorfa (≈55 %) y presencia de minerales portadores de magnesio como forsterita, lizardita y talco. Aunque el índice de actividad puzolánica fue bajo, su función principal en el mortero se asoció a efectos físicos de micro relleno y posible acción nucleante, más que a reactividad química significativa.

La arena de referencia utilizada, representativa del suministro comercial local, mostró un módulo de finura muy bajo y gradación deficiente frente a lo exigido por ASTM C897, lo cual reduce tanto la resistencia como la trabajabilidad. Esta condición explica en parte las resistencias absolutas bajas obtenidas, pero aporta realismo al experimento al reproducir las condiciones de obra en que suelen emplearse morteros de revoque.

En los ensayos a compresión, las mezclas con finos residuales mostraron igual o mejor desempeño que el control, destacando la formulación FR20 con 2,9 MPa a 28 días, un 7 % superior a FR00. Este resultado confirma que hasta un 20 % de reemplazo no compromete la resistencia y puede mejorarla levemente, además de reducir la demanda de agua sin afectar la fluidez.

El ensayo de ascenso capilar evidenció que la incorporación de finos residuales aumenta la absorción total y acelera la succión inicial respecto al control. FR20 registró la mayor absorción global, mientras que FR30 alcanzó valores similares pero con una progresión más gradual. Los resultados confirman que los finos modifican la conectividad y dinámica de la red porosa del mortero, con posibles implicaciones en su durabilidad.

Las pruebas de intemperismo acelerado en cámara QUV mostraron que las formulaciones con residuo presentan buena resistencia a ciclos de radiación y condensación, sin pérdidas significativas de masa. Sin embargo, en condiciones de obra, tanto FR20 como FR30 desarrollaron fisuras por retracción plástica en las primeras horas tras la aplicación, lo que confirma que la resistencia a la intemperie no depende únicamente de la composición, sino también del control del curado y de las condiciones ambientales durante la ejecución.

En términos microestructurales, la incorporación de finos residuales reduce la portlandita libre y favorece la formación de una microestructura más compacta, sin indicios de cristales de

brucita. Las mezclas presentan un gradiente: en FR00 predominan cristales laminares de portlandita bien definidos junto con etringita abundante en zonas porosas, mientras que en FR30 domina un material amorfo y globular con menor presencia de fases cristalinas visibles. FR20 presenta un estado intermedio, con etringita más delgada y portlandita menos abundante, lo que refleja una transición hacia una matriz más densa y heterogénea.

Los resultados demuestran que la incorporación de finos residuales de cantera en morteros de revoque es técnicamente viable como estrategia de aprovechamiento y economía circular. No obstante, la comparación entre resistencias, absorción capilar, intemperismo acelerado y desempeño en campo indica que el 20 % de sustitución se comporta como formulación umbral: combina mejoras en resistencia y trabajabilidad, pero también evidencia mayores riesgos de absorción y fisuración.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda complementar la presente investigación con un programa de verificación analítica y de optimización de formulaciones que permita avanzar hacia la aplicación industrial del residuo. En primer lugar, resulta fundamental aplicar técnicas instrumentales como fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (DRX) directamente sobre muestras de morteros endurecidos, con el fin de descartar de manera concluyente la formación de productos expansivos como la brucita y de caracterizar posibles fases secundarias generadas durante el curado o la exposición a la intemperie; así mismo se recomienda realizar ensayos de expansión y contracción de acuerdo con la norma ASTM C157, que evalúa la variación dimensional en morteros endurecidos bajo condiciones de curado y secado controladas.

Para mitigar fenómeno de fisuración por retracción plástica se sugiere explorar aditivos plastificantes y reductores de agua. De igual manera, se recomienda implementar protocolos estrictos de curado húmedo y control de evaporación en obra, particularmente en las primeras 24 horas.

Desde el punto de vista ambiental y de sostenibilidad, conviene realizar ensayos de lixiviación para determinar la movilidad de magnesio y metales traza como Cr y Ni, así como un

análisis costo-beneficio que contraste los ahorros ambientales y económicos por sustitución parcial de arena natural frente a los costos adicionales de aditivos, curado y control de calidad.

Para investigaciones avanzadas, sería conveniente repetir los experimentos utilizando arena estandarizada de laboratorio, lo que permitirá aislar con mayor claridad la contribución del residuo frente a la influencia de la arena local de gradación deficiente. Estas acciones facilitarían un mejor entendimiento científico del fenómeno y serían una ruta más segura y fundamentada para la transferencia tecnológica del material hacia aplicaciones constructivas reales.

Finalmente se sugiere explorar técnicas de revoque ancestrales utilizadas tradicionalmente en edificaciones de tapia y arquitectura vernácula, las cuales recurren a mezclas con materiales de granulometría fina y aditivos naturales que favorecen la trabajabilidad y la retención de humedad durante el fraguado. Este enfoque permitiría comparar el desempeño de los FFRR frente a métodos históricos que han demostrado durabilidad en condiciones locales y rescatar saberes constructivos que pueden aportar soluciones prácticas de bajo costo y culturalmente arraigadas. Integrar estas prácticas con los ensayos modernos abriría la posibilidad de formular morteros híbridos que conjuguen la eficiencia tecnológica con la sostenibilidad ambiental y el valor patrimonial.

Referencias

AASHTO T267 - Contenido Orgánico En Suelos Por Pérdida Por Ignición (2022).

ABNT NBR Materiais Pozolânicoç-Determinagáo Do Teor de Hidróxido de Cálcio Fixado-Método Chapelle Modif Icado (2010).

Altheeb, A. (2022). Quarry dust waste-based cementitious composites – A comprehensive review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 350). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128817

Álvarez, J. (1987). Tectonitas dunitas de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, *28*(3), 13–44. https://doi.org/10.32685/0120-1425/BOLGEOL28.3.1987.305

Álvarez, J., Obando, M., Poveda, G., & Sánchez, S. (2023). *Diagnóstico preliminar del comportamiento de las tendencias en los mercados de materiales de construcción (Gravas, Arenas y Recebos) y minerales no metálicos (Arcillas) en Colombia*. https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Doc_tecnico_materiales_de_construccion_VF_27-12-2023.pdf

Argos. (n.d.). *PRACTICA RECOMENDADA PARA LA EJECUCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DEL REVOQUE*.

Argos Colombia. (n.d.-a). *Cemento Gris Ficha Técnica, Usos, Beneficios y Ventajas*. Retrieved September 7, 2025, from https://colombia.argos.co/cemento-gris/

Argos Colombia. (n.d.-b). *Planta de agregados Canteras de Colombia - Argos Colombia*. Retrieved March 13, 2025, from https://colombia.argos.co/plantas/planta-de-agregados-canteras-de-colombia/

ASTM C109. Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-Mm] Cube Specimens) (2020). https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20

ASTM C618-03 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (2003). https://doi.org/10.1520/C0618-03

ASTM C805 Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete (2018). https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18

ASTM C-897. Specification for Aggregate for Job-Mixed Portland Cement-Based Plasters (2020). https://doi.org/10.1520/C0897-15R20

ASTM C897-15. Specification for Aggregate for Job-Mixed Portland Cement-Based Plasters (2020). https://doi.org/10.1520/C0897-15R20

ASTM C1403-15. Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars (2015). https://doi.org/10.1520/C1403-15

ASTM D4318. Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (2017). https://doi.org/10.1520/D4318-17E01

ASTM G 154- Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials (2023). https://doi.org/10.1520/G0154-23

ASTM-C40. Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete (2004). https://doi.org/10.1520/C0040-04

Cabrales-Clapé, Y., Ulloa-Carcassés, M., & Samuel Almenares-Reyes, R. (2018). Caracterización física y química de lodos residuales de la cantera El Cacao: propuesta de uso industrial. *Minería y Geología*, *34 (4)*, 408–421. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122018000400003

Chen, Z., & Poon, C. S. (2017). Comparing the use of sewage sludge ash and glass powder in cement mortars. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *38*(11), 1390–1398. https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1230652

Cohen, E., Peled, A., & Bar-Nes, G. (2019). Dolomite-based quarry-dust as a substitute for fly-ash geopolymers and cement pastes. *Journal of Cleaner Production*, *235*, 910–919. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.261

Daza, N. (2022). *Evaluación del desempeño mecánico y químico de mortero con inclusión de lodo calcinado a 600 °C y nitrofosfoyeso para su aplicación en la construcción* [Tesis de Maestría, Universidad del Norte]. https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10304

Daza, N., & Medina, A. (2018). *Análisis comparativo del contenido de óxidos presentes en las cenizas de lodos de PTAP y el Cemento Portland tipo uno* [Título Profesional, Universidad de la Costa]. https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/6b48dee3-572d-4a17-b770-07583a630847

de Matos, P. R., Sakata, R. D., Gleize, P. J. P., de Brito, J., & Repette, W. L. (2020). Eco-friendly ultra-high performance cement pastes produced with quarry wastes as alternative fillers. *Journal of Cleaner Production*, *269*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122308

García-Casco, A., Restrepo, J., Correa-Martínez, A., Blanco-Quintero, I., Proenza, J., Weber, M., & Butjosa, L. (2020). Chapter 2 The Petrologic Nature of the "Medellín Dunite" Revisited: An Algebraic Approach and Proposal of a New Definition of the Geological Body. In J. Gómez & A. Pinilla-Pachon (Eds.), *The Geology of Colombia: Vol. 2 Mesozoic* (p. 45). Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36. https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.02

Giraldo M., M. A., & Tobón, J. I. (2006). EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO PORTLAND DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN. *Dyna*, *73(148)*, 69–81.

Grabowski, T. T., Pietrobelli, J. M. T. de A., & Martins, R. J. E. (2023). Eco-Friendly Cement Mortar with Wastewater Treatment Plant Sludge Upcycling. *Clean Technologies*, *5*(3), 961–972. https://doi.org/10.3390/cleantechnol5030048

Guerrero, B., & Regalado, D. (2021). *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS* [Título de Tecnólogo, Escuela Politécnica Nacional]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21412

Guezennec, A. G., Michel, C., Ozturk, S., Togola, A., Guzzo, J., & Desroche, N. (2015). Microbial aerobic and anaerobic degradation of acrylamide in sludge and water under environmental conditions—Case study in a sand and gravel quarry. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(9), 6440–6451. https://doi.org/10.1007/S11356-014-3767-X

Gutierrez, L. (2003). Capítulo 3. Morteros. In Universidad Nacional de Colombia (Ed.), *El concreto y otros materiales de construcción* (2nd ed.). Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302

He, J., Zheng, W., Bai, W., Hu, T., He, J., & Song, X. (2021). Effect of reactive MgO on hydration and properties of alkali-activated slag pastes with different activators. *Construction and Building Materials*, *271*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121608

Herrera, C. (2019). *Caracterización petrográfica de morteros de cemento hidráulico con adición de cenizas de fondo producto de hornos de cocción de ladrillos* [Título Profesional, Universidad de Antioquia]. http://hdl.handle.net/10495/12523

Huertas, L. (2019). *Evaluación de las rocas Dunitas como agregado en el concreto e identificación del mecanismo del proceso de carbonatación natural.* Universidad Santo Tomás.

INV E-222-13. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (2013).

INV-E-121-13 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DE UN SUELOMEDIANTE EL ENSAYO DE PÉRDIDA POR IGNICIÓN (2013). https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras

INV-E-217-13 DENSIDAD BULK (PESO UNITARIO) Y PORCENTAJE DE VACÍOS DE LOS AGREGADOS EN ESTADO SUELTO Y COMPACTO (2013). https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras

Jia, Q., Zhuge, Y., Duan, W., Liu, Y., Yang, J., Youssf, O., & Lu, J. (2022). Valorisation of alum sludge to produce green and durable mortar. *Waste Disposal and Sustainable Energy*, *4*(4), 283–295. https://doi.org/10.1007/s42768-022-00113-3

Kan, A., Isık, F., Akbulut, R. K., & Gencten, O. (2020). Investigation of Compressive Strength of Plaster and Masonry Mortar Prepared with Waste Stone Dust, Nano Carbon Black and Cement. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, *4*(2), 5–11. https://dergipark.org.tr/en/pub/injirr/issue/56051/956770

Karthikeyan, M., Asha, Dr. B., & Raja Ramachandran, P. (2014). Application of Fine Aggregate by Replacement of Tannery Dry Sludge in Concrete. *Journal of Applied Environmental Sciences*, *9*, 2805–2815. https://www.researchgate.net/publication/330081592

Kępniak, M., & Łukowski, P. (2024). Multicriteria Analysis of Cement Mortar with Recycled Sand. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 1773*, *16*(5), 1773. https://doi.org/10.3390/SU16051773

Larenas, C. (2024). *Análisis de estabilidad química y física de morteros con sustitución de arena por material de relave.* [Título Profesional, Universidad de Concepción]. https://repositorio.udec.cl/handle/11594/5013

Llano, E. (2021). *Efecto del intemperismo sobre las propiedades fisicoquímicas, el desempeño y la durabilidad de suelos viales aditivados con estabilizantes químicos* [Tesis de Doctorado, Universidad de Antioquia].

https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/b2f1169f-7e73-47ab-bc43-5c61f4fb4521

Márquez, D. (2009). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y FÍSICO DE MEZCLAS DE LODO-CEMENTO CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA PARA SU USO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN* [Título Profesional, Universidad Central de Venezuela]. http://saber.ucv.ve/handle/10872/11262

Mehta, P., & Monteiro, P. (2005). *Concrete: microestructure, properties and materials* (3rd ed.). McGraw-Hill Professional. https://doi.org/10.1036/0071462899

Menéndez, G., & Moyo, J. (2011). Tratamiento de los residuos generados en una cantera. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de Los Ingenieros Técnicos de Minas, Nº. 9*, 38–43. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5080497

Meza-Ochoa, V., Morales, Á. L., & Márquez-Godoy, M. A. (2023). Mineralogical analysis of a residual soil from Medellín Dunite (Colombia) and its influence on physical properties and unsaturated undrained shear strength. *Boletín de Geologia*, *45*(1), 87–101. https://doi.org/10.18273/REVBOL.V45N1-2023004

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPÚBLICA DE COLOMBIA. (2003). *GLOSARIO TÉCNICO MINERO*. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf

Mymrin, V., Presotto, P., Alekseev, K., Avanci, M. A., Rolim, P. H. B., Petukhov, V., Taskin, A., Gidarakos, E., Valouma, A., & Yu, G. (2020). Application of hazardous serpentine rocks' extraction wastes in composites with glass waste and clay-sand mix to produce environmentally clean construction materials. *Construction and Building Materials*, *234*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117319

NTC 112. MEZCLA MECÁNICA DE PASTAS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y MORTEROS DE CONSISTENCIA PLÁSTICA (2021).

NTC 127 Método de Ensayo Para Determinar Las Impurezas Orgánicas En Agregado Fino Para Concreto. (2000).

NTC 220. Cementos. Determinación de La Resistencia de Morteros de Cemento Hidráulico a La Compresión, Usando Cubos de 50 Mm o 2 Pulgadas de Lado. (2022).

NTC 3329. Especificaciones Del Mortero Para Unidades de Mampostería. (2004).

NTC 5264. Calidad Del Suelo. Determinacion Del pH. (2018).

NTC 5596. Calidad de Suelo. Conductividad (2022).

NTC-77. Concretos. Método de Ensayo Para El Análisis Por Tamizado de Los Agregados Finos y Gruesos. (2018).

NTC-78. Método de Ensayo Para Determinar Por Lavado El Material Que Pasa El Tamiz 75 Mm (No. 200) En Agregados Minerales. (2019).

NTC-111. MÉTODO PARA DETERMINAR LA FLUIDEZ DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO (1997).

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, *22*(7), 1305–1314. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.10.015

Polydorou, T., Kyriakides, N., Neocleous, K., & Hadjimitsis, D. (2021). Use of quarry waste in concrete and cementitious mortars. In *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management: Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-friendly Binders, and Life Cycle Assessment* (pp. 289–304). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821730-6.00016-4

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NRS-10 (2010).

Rodríguez, G., González, H., & Zapata, G. (2005). *Memoria explicativa: Geología de la plancha 147 Medellín Oriental. Escala: 1:100 000.*

Rodríguez, S. (2022). *Aprovechamiento de lodos de piscicultura como contribución a la economía circular en la evaluación de la reactividad en pastas de cal y cemento.* [Título Profesional, Universidad de los Andes]. http://hdl.handle.net/1992/57723

Sánchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Bhandar Editores LTDA., Ed.; 5th ed.). Pontificia Universidad Javeriana.

SENA. (2003). *Manual práctico del revoque : práctica recomendada para la ejecución y control de calidad del revoque*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/7702

Serna, I. (2020). *Morteros con reemplazo parcial de arena por lodos procedentes de la depuración de aguas residuales: Desarrollo y cálculo de muros de ladrillos* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. https://riunet.upv.es/handle/10251/147981

Servicio Geológico Colombiano. (2020, April 27). *Proponen cambiar el nombre a la Dunita de Medellín en el capítulo más reciente de la obra The Geology of Colombia*. https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Dunita-de-Medell%C3%ADn.aspx

Singh, H., Kalla, P., Nagar, R., & Kumar Gautam, P. (2019). Influence of dimensional stone waste on mechanical and durability properties of mortar: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 227). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.043

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la tierra Una introducción a la geología física* (Pearson Prentice Hall, Ed.; 8th ed.). Pearson Prentice Hall.

Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Teleford Publishing.

Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista Ingeniería de Construcción*, *32*(2), 05–12. https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001

Zhu, J., & Schoenoff, M. (2020). *Comparison of Accelerated UV Lab Tests For UV Effects on Fiberglass Crossarms*. https://www.researchgate.net/publication/345981994

Anexos

Anexo 1. Póster

