



Tesis previa a la obtención de título de

INGENIERIA CIVIL

AUTORES: Jorge Luis Defaz Grefa
Klever Javier Pacheco Poveda

TUTORA: Ing. Verónica Miranda

Evaluación experimental de la resistencia a la compresión y del costo de morteros elaborados con sustitución parcial de arena natural por reciclada.

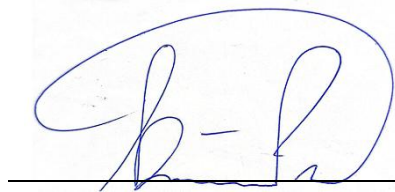
CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Jorge Luis Defaz Grefa y Klever Javier Pacheco Poveda declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.



Jorge Luis Defaz Grefa

AUTOR



Klever Javier Pacheco Poveda

AUTOR

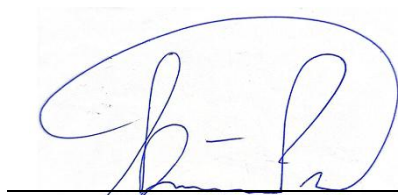
AUTORIZACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Nosotros, Jorge Luis Defaz Grefa y Klever Javier Pacheco Poveda, en calidad de autores del trabajo de investigación titulado Evaluación experimental de la resistencia a la compresión y del costo de morteros elaborados con sustitución parcial de natural por reciclada, autorizamos a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) para hacer uso de los contenidos que nos pertenecen o parte de los contenidos de esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación. Cedemos los derechos que como autores nos corresponden, de acuerdo con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento en Ecuador.



Jorge Luis Defaz Grefa

AUTOR



Klever Javier Pacheco Poveda

AUTOR

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo Verónica Miranda Rubio, certifico que conozco a los autores del presente trabajo de titulación denominado “Evaluación experimental de la resistencia a la compresión y del costo de morteros elaborados con sustitución parcial de natural por reciclada”, Jorge Luis Defaz Grefa y Klever Javier Pacheco Poveda siendo los responsables exclusivos tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

VERONICA
ALEXANDRA
MIRANDA
RUBIO

Firmado digitalmente
por VERONICA
ALEXANDRA MIRANDA
RUBIO
Fecha: 2026.08.14
15:34:40 -05'00'

Verónica Alexandra Miranda Rubio

DIRECTORA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, por guiarme, cuidarme y bendecirme durante cada etapa de mi vida, dándome la fortaleza y la sabiduría necesaria para culminar este importante logro en mi vida.

A mis padres Jorge y Nélida, quienes, con su amor, apoyo incondicional y sus palabras de aliento me motivaron a seguir adelante y a no rendirme en los momentos difíciles

Y de manera muy especial, a mi abuelita Victoria por ser una de las personas más importantes y fundamentales en este proceso. Su apoyo constante fueron inspiración para continuar y alcanzar esta meta tan significativa para mí.

A mi hermana Gabriela, por brindarme ánimo y motivarme constantemente a no darme por vencido, incluso en los momentos difíciles de este camino.

Por Jorge Defaz

DEDICATORIA

A Dios, por acompañarme en todo este camino, incluso en los momentos en los que no sabía bien qué hacer o hacia dónde ir. Por darme la fuerza cuando más lo necesitaba y la tranquilidad para seguir adelante, aun cuando las cosas no salían como esperaba.

A mis padres, Klever y María porque todo empieza con ustedes. Por lo que han dado, por lo que han sacrificado y por todo lo que han hecho, sin esperar nada a cambio. Hay cosas que uno no entiende en ese momento, pero con el tiempo uno se da cuenta, y hoy sé que gran parte de lo que soy viene de ahí, de lo que vi, de lo que aprendí y de todo lo que hicieron por mí.

A mis hermanas, Jazu y Nicole, por ser parte de mi vida tal como son. Por ese ruido, por esas molestias, por esos momentos que a veces parecen pequeños, pero que terminan acompañando más de lo que uno piensa.

A mis abuelos, porque en su forma de ser, en sus palabras y en su manera de ver la vida, encontré más de lo que imaginaba.

A Thalia por estar, sin necesidad de que todo sea perfecto. Por los días buenos, pero sobre todo por los días en los que no todo estaba bien. Por la paciencia, por el cariño y por quedarse incluso cuando no era fácil.

Esto no es solo un logro personal, también es de ustedes. En cada parte de este camino hay algo que me dieron, algo que me enseñaron o algo que me sostuvo cuando más lo necesitaba.

Por Klever Pacheco

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por dame salud, fortaleza y sabiduría para superar cada obstáculo y permitirme culminar esta etapa importante en mi vida gracias a sus bendiciones.

A mis padres, Jorge y Nélida, les agradezco de todo corazón por su amor, esfuerzo y sacrificio incondicional. Gracias por estar conmigo en los momentos buenos y difíciles, por sus consejos, por creer en mí y por motivarme siempre a seguir adelante y no darme por vencido.

A mi abuelita Victoria, por su apoyo incondicional, cariño sincero y por ser una persona tan importante en mi vida. Gracias por acompañarme siempre y convertirse en una inspiración para alcanzar esta meta.

A mi hermana Gabriela, gracias por brindarme ánimos y motivarme constantemente a no darme por vencido. Tu apoyo y tus palabras fueron importantes durante este proceso.

A Mayra gracias por estar conmigo en los buenos y malos momentos. Gracias por tu paciencia, tu cariño y por apoyarme siempre cuando más lo necesitaba. Tu compañía, tus palabras y tu apoyo fueron importante para que pudiera seguir adelante y alcanzar esta meta.

También quiero agradecer sinceramente a la Ing. Verónica Miranda, por su apoyo, paciencia y dedicación durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por compartir sus conocimientos y brindar su guía en cada etapa del trabajo.

De igual manera agradezco a la universidad, por permitirme crecer tanto profesional como personalmente a lo largo de mi formación académica.

Por Jorge Defaz

AGRADECIMIENTO

Llegar hasta aquí no fue tan simple como parece. Hubo días pesados, momentos en los que dudé de mí y otros en los que solo quería que todo termine. Pero seguí, a mi ritmo, con tropiezos y todo, porque sabía que dejarlo no era una opción. Este trabajo es el reflejo de todo eso.

A Dios, por acompañarme en cada etapa, sobre todo en los momentos más complicados. Por darme la calma cuando la necesitaba y la fuerza para seguir adelante cuando las cosas se ponían difíciles.

A mis padres, Klever y María, porque sin ellos nada de esto tendría sentido. Son quienes han estado siempre, apoyando, empujando cuando hacía falta y enseñándome con su ejemplo que las cosas no llegan solas. Todo lo que han hecho por mí no se puede resumir en unas líneas, pero este logro también es de ustedes.

A mis hermanas, Jazu y Nicole, por estar ahí siempre, cada una a su manera, acompañando, molestando a veces, pero haciendo que todo sea más llevadero. Tenerlas cerca hizo que este proceso no se sienta tan pesado.

A mis abuelos, por su cariño sincero y por todo lo que me han enseñado sin necesidad de decir mucho. Por esas formas simples de demostrar su apoyo.

A Thalia, por estar conmigo en todo este tiempo, por la paciencia, por escuchar y por no irse cuando las cosas se complicaban. Por quedarse incluso en los días en los que ni yo mismo estaba en mi mejor momento. Tu apoyo significó más de lo que puedo poner en palabras.

Y a todos los que estuvieron cerca durante este proceso, porque de alguna forma dejaron algo que sumó para que hoy pueda cerrar esta etapa. Terminar esto no es solo cumplir con algo pendiente, es mirar atrás y saber que, a pesar de todo, valió la pena no rendirse.

Por Klever Pacheco:

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	I
AUTORIZACIÓN DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL	II
APROBACIÓN DEL TUTOR	III
DEDICATORIA	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
AGRADECIMIENTO	VII
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	5
1.2.1 Hallazgos en la resistencia y trabajabilidad.....	5
1.2.2 Resistencia a la compresión en morteros con arena reciclada.....	8
1.3 Planteamiento del problema	10
1.4 Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivo general	12
1.4.2 Objetivos específicos.....	12
1.5 Justificación	13
1.5.1 Justificación teórica	13
1.5.2 Justificación metodológica	15
1.6 Hipótesis	17
1.7 Delimitación	17

1.7.1	Delimitación temporal	17
1.7.2	Delimitación geográfica	17
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO		19
1.8	Morteros	19
1.9	Clasificación de los morteros	22
1.9.1	Según su composición	22
1.9.2	Según su uso	24
1.9.3	Según su resistencia.....	25
1.10	Propiedades del mortero	27
1.10.1	Trabajabilidad	27
1.10.2	Retención de agua	29
1.10.3	Resistencia a la compresión	30
1.10.4	Durabilidad.....	32
1.11	Relación agua-cemento y su influencia en el mortero.....	34
1.12	Morteros con agregados reciclados	36
1.13	Extracción de arenas y manejo de escombros	38
1.14	Sustitución parcial de arena por agregado reciclado	40
1.15	Efectos del agregado reciclado en las propiedades del mortero	42
1.16	Análisis de la durabilidad en morteros con agregados reciclados	44
1.16.1	Normativas ASTM aplicadas a morteros	46
1.16.2	Normativas INEN aplicables en Ecuador	47
CAPÍTULO 3.....		49
PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN.....		49
3.1	Introducción del capítulo	49

3.2	Diseño experimental y codificación de mezclas.....	49
3.3	Caracterización física de los agregados finos.....	52
3.3.1	Densidad relativa y absorción.....	53
3.3.2	Análisis granulométrico.....	54
3.3.3	Peso unitario suelto.....	58
3.4	Fabricación y control de probetas cúbicas.....	60
3.5	Resultados integrales de la dosificación 1:3.....	61
3.5.1	Flujo del mortero	63
3.5.2	Resistencia a compresión a los 7 días.....	64
3.5.3	Resistencia a compresión a los 28 días.....	67
3.5.4	Comparación entre resistencia a 7 y 28 días.....	69
3.5.5	Registro visual de las mezclas	71
3.6	Resultados integrales de la dosificación 1:4.....	74
3.6.1	Flujo del mortero	74
3.6.2	Resistencia a compresión a los 7 días.....	75
3.6.3	Resistencia a compresión a los 28 días.....	78
3.6.4	Comparación entre resistencias a 7 y 28 días	80
3.6.5	Registro visual de las mezclas	82
3.7	Análisis estadístico inferencial de la resistencia a compresión	87
3.7.1	Estadísticos por dosificación y porcentaje de arena reciclada.....	88
3.7.2	Prueba de homogeneidad de varianzas	89
3.7.3	ANOVA factorial para resistencia a compresión a 28 días	90
3.7.4	Comparación entre dosificaciones.....	91
3.7.5	Comparación múltiple según porcentaje de arena reciclada	91
3.7.6	Subconjuntos homogéneos de Tukey	92

3.7.7 Interpretación estadística	93
3.8 Verificación normativa de las dosificaciones	93
3.9 Análisis comparativo de costos	96
3.9.1 Análisis de costos para dosificación 1:3.....	97
3.9.2 Análisis de costos para dosificación 1:4.....	98
3.9.3 Comparación de costos entre dosificaciones	98
CAPÍTULO 4.....	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
4.1 Conclusiones.....	100
4.2 Recomendaciones	102
REFERENCIAS	103
ANEXOS	A
ANEXO A: OBTENCION DE ARENA	A
ANEXO B: ENSAYOS DE LABORATORIO	B
ANEXO C: RESULTADOS EMITIDOS POR LA UNIVERSIDAD POLITECNICA DEL ECUADOR LABORATORIO LEMSUR.....	B

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Codificación de mezclas de mortero según dosificación y % de sustitución	50
Tabla 2. Matriz general del diseño experimental	51
Tabla 3. Densidad relativa y absorción de agua de los agregados finos	53
Tabla 4. Análisis granulométrico de la arena natural	54
Tabla 5. Análisis granulométrico de la arena reciclada.....	56
Tabla 6. Comparación granulométrica entre arena natural y reciclada	57
Tabla 7. Densidad aparente y contenido de vacíos de los agregados finos.....	59
Tabla 8. Control de probetas cúbicas según dosificación y porcentaje de sustitución.....	61
Tabla 9. Flujo del mortero en la dosificación 1:3.....	63
Tabla 10. Resultados de resistencia a compresión a 7 días en dosificación 1:3.....	64
Tabla 11. Resumen estadístico a compresión a 7 días en dosificación 1:3	65
Tabla 12. Variación de resistencia respecto al mortero patrón en dosificación 1:3	66
Tabla 13. Resultados de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:3.....	67
Tabla 14. Resumen de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:3	68
Tabla 15. Comparación de resistencia a compresión entre 7 y 28 días en 1:3	70
Tabla 16. Flujo del mortero en la dosificación 1:4.....	75
Tabla 17. Resultados de resistencia a compresión a 7 días en dosificación 1:4.....	75
Tabla 18. Resumen estadístico de resistencia a compresión a 7 días en dosificación 1:4.....	76
Tabla 19. Variación de resistencia respecto al mortero patrón en dosificación 1:4	77
Tabla 20. Resultados de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:4.....	78
Tabla 21. Resumen de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:4	79
Tabla 22. Comparación de resistencia a compresión entre 7 y 28 días en 1:4	80
Tabla 23. Estadísticos descriptivos de resistencia a compresión a 28 días	88
Tabla 24. Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error	89
Tabla 25. ANOVA factorial para resistencia a compresión a 28 días.....	90
Tabla 26. Comparación de medias marginales según dosificación	91
Tabla 27. Comparación múltiple de Tukey según porcentaje de arena reciclada	91
Tabla 28. Subconjuntos homogéneos de Tukey para resistencia a 28 días	92
Tabla 29. Criterios de clasificación del mortero según resistencia a compresión a 28 días.....	94
Tabla 30. Clasificación normativa de los morteros con dosificación 1:3.....	94
Tabla 31. Clasificación normativa de los morteros con dosificación 1:4.....	95
Tabla 32. Conversión de costos unitarios por peso	97

Tabla 33. Costo por peso de mezclas con dosificación 1:3	97
Tabla 34. Costo por peso de mezclas con dosificación 1:4	98
Tabla 35. Comparación general de costos por peso entre dosificaciones	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de la mina de agregados de Pifo	83
Figura 2. Acumulación de residuos de construcción y demolición.	11
Figura 3. Localización geográfica de la mina de agregados en Pifo.....	18
Figura 4. Localización geográfica la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador	18
Figura 5. Mortero en estado fresco durante su preparación.	19
Figura 6 Mortero en estado endurecido.	20
Figura 7 Morteros según su composición.....	23
Figura 8. Trabajabilidad en Morteros.	29
Figura 9. Resistencia a la compresión en Morteros.....	32
Figura 10. Durabilidad en Morteros.	34
Figura 11. Durabilidad en Morteros.	38
Figura 12 Extracción de Escombros.....	40
Figura 13. Sustitución de arena por agregado reciclado.....	42
Figura 14. Comparación de la absorción de agua entre agregados finos	54
Figura 15. Curva granulométrica de la arena de Pifo	55
Figura 16. Curva granulométrica de la arena reciclada	57
Figura 17. Comparación granulométrica entre arena de Pifo y arena reciclada.....	58
Figura 18. Densidad aparente de los agregados finos en condición suelta y compactada	59
Figura 19. Flujo promedio de morteros según dosificación y % de arena reciclada	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 20. Resistencia promedio a compresión a 7 días en dosificación 1:3	67
Figura 21. Resistencia promedio a compresión a 7 días en dosificación 1:3	78
Figura 22. Resistencia promedio a compresión a 28 días en dosificación 1:3	69
Figura 23. Resistencia promedio a compresión a 28 días en dosificación 1:4	80
Figura 24. Resistencia a compresión vs edad en morteros con dosificación 1:3.....	71
Figura 25. Resistencia a compresión vs edad en morteros con dosificación 1:4.....	81
Figura 26. 100 % arena de cantera en Dosificación 1:3	71
Figura 27. 100 % arena reciclada en Dosificación 1:3	72
Figura 28. 50 % arena reciclada y 50 % arena de cantera en Dosificación 1:3.....	72
Figura 29. 25 % arena reciclada y 75 % arena de cantera en Dosificación 1:3.....	73
Figura 30. 75 % arena reciclada y 25 % arena de cantera en Dosificación 1:3.....	73

Figura 31. Dosificaciones en 1:3.....	74
Figura 32. 100 % arena de cantera en Dosificación 1:4.....	82
Figura 33. 100 % arena reciclada en Dosificación 1:4.....	83
Figura 34. 50 % arena reciclada y 50 % arena de cantera en Dosificación 1:4.....	83
Figura 35. 25 % arena reciclada y 75 % arena de cantera en Dosificación 1:4.....	84
Figura 36. 75 % arena reciclada y 25 % arena de cantera en Dosificación 1:4.....	84
Figura 37. Dosificaciones en 1:4.....	85
Figura 38. Análisis granulométrico del resultado con 75 % natural y 25 % reciclada.....	87

RESUMEN

El uso cada vez mayor de agregados naturales ha generado inquietud debido a la explotación continua de estos recursos, lo que produce consecuencias negativas en el entorno ambiental. Ante esta realidad, la presente investigación plantea la elaboración de un mortero, incorporando arena reciclada como sustituto parcial de la arena extraída de la mina de Pifo. Con ello, se pretende impulsar soluciones constructivas más sostenibles de los residuos y reducir el impacto ambiental.

La presente investigación se enfoca en el uso de arena reciclada para la elaboración de morteros, mediante su incorporación como reemplazo parcial de la arena proveniente de la mina de Pifo. Esta iniciativa se plantea como una alternativa viable para disminuir la extracción excesiva de arenas en los yacimientos de Quito, contribuyendo así con un manejo más sostenible de los recursos.

El objetivo principal de la presente investigación es analizar la resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena reciclada combinada en diferentes proporciones con arena natural, así mismo se realizará un análisis de costos para saber que tanto podría reducir o incrementar el valor de la fabricación de estos morteros al incorporar esta sustitución. Para ello, se llevó a cabo la caracterización de los dos tipos de arena, es decir la arena reciclada y la arena natural proveniente de la mina de Pifo. Este análisis se realizó mediante ensayos de laboratorio, entre los que se incluyen granulometría, determinación de la gravedad específica, peso unitario suelto y porcentaje de absorción.

Posteriormente se determinó las dosificaciones considerando distintos niveles de sustituciones entre la arena reciclada y la arena natural de la mina de Pifo (0-100 %, 25-75 %, 50-50 %, 75-25 %, 100-0 %). Con base en estas combinaciones, se evaluó el comportamiento de estos morteros a la resistencia a la compresión, mediante ensayos realizados a los 7 y 28 días de edad.

El análisis se desarrolló mediante la aplicación de ensayos de laboratorio conforme a la normativa vigente, entre las que se incluyen la NTE INEN 872 relacionada con “Arenas para hormigón. Requisitos” y la NTE INEN 488 / ASTM C109 correspondiente a “Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en

cubos de 50 mm de arista”. Estas normas permiten verificar el cumplimiento de las propiedades de la arena fina y evaluar la resistencia a la compresión.

PALABRAS CLAVE: Mortero, resistencia a la compresión, granulometría, gravedad específica, escombros, arenas finas, cantera, hormigón.

ABSTRACT

The increasing use of natural aggregates has raised concerns due to the continuous exploitation of these resources, which has negative environmental consequences. In response to this reality, this research proposes the development of a mortar incorporating recycled fine aggregate as a partial substitute for the aggregate extracted from the Pifo mine. The aim is to promote more sustainable construction solutions and reduce environmental impact.

This research focuses on the use of recycled sand in mortar production, incorporating it as a partial replacement for the aggregate from the Pifo mine. This initiative is presented as a viable alternative to reduce the excessive extraction of aggregates from Quito's quarry, contributing to more sustainable resource management.

The main objective of this research is to analyze the compressive strength of mortars made with recycled sand combined in different proportions with regular sand. A cost analysis will also be conducted to determine how much this substitution could reduce or increase the cost of manufacturing of these mortars. For this purpose, the two types of sand recycled sand and natural sand from the Pifo mine were characterized. This analysis was performed using laboratory tests, including particle size distribution, specific gravity determination, loose unit weight, and absorption percentage. Subsequently, mix designs were determined considering different levels of substitution between recycled sand and natural sand from the Pifo mine (0-100 %, 25-75 %, 50-50 %, 75-25 %, 100-0 %). Based on these combinations, the compressive strength of these mortars was evaluated through tests performed at 7 and 28 days.

The analysis was carried out using laboratory tests in accordance with current regulations, including NTE INEN 872 related to "Aggregates for concrete. Requirements" and NTE INEN 488 / ASTM C109 corresponding to "Hydraulic cement. Determination of the compressive strength of mortars in 50 mm cubes." These standards allow verification of compliance with the properties of fine sand and evaluation of compressive strength.

KEYWORDS: Mortar, uniaxial strength, particle size distribution, specific gravity, rubble, fine aggregates, absorption, quarry, concrete.

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El crecimiento urbano de Quito ha ejercido durante las últimas décadas una presión creciente sobre las fuentes de arenas naturales que abastecen a la industria de la construcción local. El yacimiento de Pifo, ubicado en la periferia oriental del Distrito Metropolitano, (Figura 1) es uno de los más explotados de la región y el que provee la mayor parte de la arena que se usa en obras civiles y edificaciones dentro de la ciudad. Esa explotación intensiva ha generado alteraciones ambientales visibles: cambios en la morfología del suelo, afectaciones a los cauces hídricos superficiales y deterioro del entorno periurbano. Al mismo tiempo, el flujo permanente de demoliciones y obras de remodelación que acompaña al crecimiento de la ciudad produce volúmenes considerables de escombros cuya gestión sigue siendo deficiente, porque los mecanismos formales de reciclaje tienen cobertura muy limitada en los municipios ecuatorianos. La convergencia de estos dos problemas la sobreexplotación de fuentes naturales y la acumulación de residuos de construcción sin tratamiento configura un escenario en el que la búsqueda de materiales alternativos técnicamente sustentados se vuelve prioritaria para el sector.

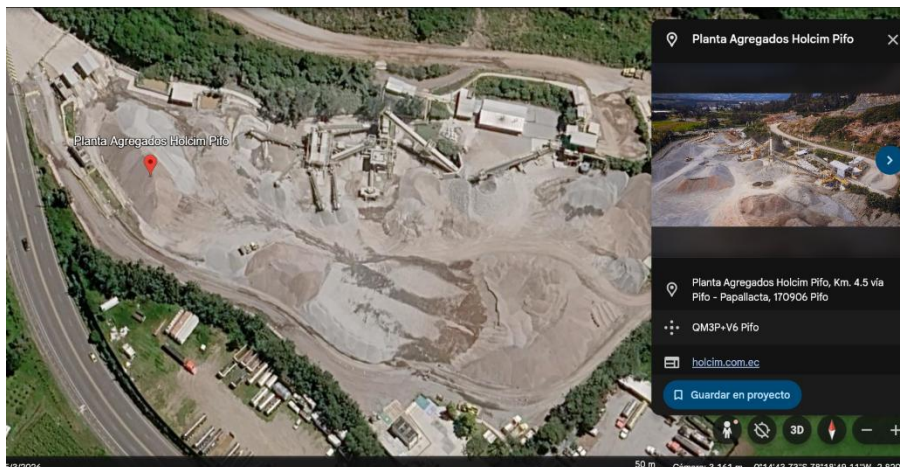


Figura 1. Localización geográfica de la mina de agregados de Pifo

Fuente: (Google Earth, 2026)

Distintos autores han señalado que los arenas representan la fracción volumétrica dominante de los morteros y hormigones, oscilando entre el 60 % y el 80 % del volumen total de la mezcla, lo que las convierte en el componente cuya extracción genera el impacto ambiental más significativo de todos los materiales involucrados en la producción de estos materiales de construcción (Zhao et al., 2021). Esa proporción tan alta explica por qué

cualquier sustitución, incluso parcial, de la arena natural puede tener efectos ambientales relevantes: reducir en un 25 % o 50 % el volumen de arena extraída de una cantera representa un ahorro real y cuantificable sobre los recursos naturales. Frente a esa realidad, la incorporación de arena reciclada como sustituto parcial de la arena natural ha ganado relevancia en la producción científica de los últimos años, pues abre la posibilidad de reducir la demanda sobre las canteras y ofrecer al mismo tiempo una solución concreta al problema de los residuos de construcción urbanos que se acumulan sin destino formal.

La relevancia ambiental de esa sustitución es clara, pero no basta con que el material reciclado resuelva un problema ambiental si al mismo tiempo genera uno técnico. Un mortero que no cumple con los requisitos mínimos de resistencia establecidos por la normativa técnica no es una alternativa viable, independientemente de sus ventajas ambientales o económicas. Por eso, el valor de una investigación de este tipo reside precisamente en cuantificar hasta qué punto la arena reciclada puede incorporarse sin comprometer el desempeño del material, y en identificar las condiciones bajo las cuales esa sustitución resulta técnicamente aceptable.

El contexto sísmico ecuatoriano añade una dimensión adicional a esa evaluación. Ecuador se encuentra ubicado en el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las zonas de mayor actividad sísmica del planeta, y la Norma Ecuatoriana de la Construcción establece requisitos de resistencia específicos para los materiales empleados en mampostería precisamente porque el comportamiento de esos materiales condiciona la respuesta estructural de los edificios ante un evento sísmico. Por ello, podría afectar el desempeño estructural de los elementos de mampostería. Esa consideración refuerza la necesidad de evaluar rigurosamente el comportamiento de los morteros con arena reciclada antes de recomendar su adopción generalizada.

Esta investigación se centra precisamente en esa evaluación. El objetivo es determinar si la arena reciclada, obtenido a partir del procesamiento de residuos de construcción y demolición generados en Quito, puede emplearse como sustituto parcial de la arena natural extraída de la mina de Pifo en la elaboración de morteros de pega, sin que las propiedades mecánicas del mortero resultante queden por debajo de los parámetros exigidos por la normativa técnica vigente. El estudio se desarrolló bajo condiciones controladas de laboratorio, aplicando protocolos normalizados que aseguran la

reproducibilidad de los ensayos y la comparabilidad de los datos con los de otras investigaciones sobre el mismo tema.

Para la caracterización de las arenas se ejecutaron ensayos de granulometría, gravedad específica, absorción y peso unitario suelto, conforme a las normas NTE INEN 872, ASTM C128 y ASTM C29. Esa caracterización es un paso indispensable porque las propiedades de la arena reciclada no son las mismas que las de la arena natural, y esas diferencias condicionan tanto el diseño de las mezclas como la interpretación de los resultados. La elaboración de los morteros consideró cinco proporciones de sustitución entre la arena reciclada y la natural: 0-100 %, 25-75 %, 50-50 %, 75-25 % y 100-0 %, con cemento hidráulico tipo GU y relaciones arena-cemento de 1:3 y 1:4. La consistencia de cada mezcla se ajustó mediante el ensayo de flujo conforme a la ASTM C1437 (2022), de modo que todas las dosificaciones fueran evaluadas bajo condiciones de trabajabilidad equivalentes y las diferencias de resistencia observadas pudieran atribuirse a la arena reciclada y no a variaciones en la fluidez del mortero.

Con las mezclas preparadas se moldearon cubos de 50 mm por lado que se mantuvieron sumergidos en agua durante dos períodos de curado: siete y veintiocho días. Al cumplirse cada plazo se aplicó la carga de compresión siguiendo los procedimientos indicados en la NTE INEN 488 y la ASTM C109/C109M versión 2023. Los valores registrados pasaron por un procesamiento estadístico orientado a detectar diferencias significativas entre grupos y a trazar la curva de comportamiento mecánico en función del porcentaje de sustitución. Un análisis de costos cerró la evaluación: su propósito fue cuantificar la rentabilidad relativa de cada dosificación frente al uso exclusivo de arena natural, entregando a constructores y proyectistas criterios concretos para decidir si la arena reciclada conviene también desde el punto de vista económico.

La resistencia a la compresión constituye el indicador de desempeño más representativo en la evaluación de morteros, pues integra en un solo valor la calidad de la pasta de cemento hidratada, la resistencia de las arenas y la calidad de la zona de transición interfacial entre ambas fases (Nedeljković et al., 2021). De los tres componentes de esa resistencia, la zona de transición interfacial es generalmente el más débil, porque durante el fraguado el agua tiende a segregarse localmente alrededor de las partículas de arena, generando una región más porosa y menos resistente que el resto de la pasta. Cualquier modificación en las propiedades de la arena que afecte esa zona como la mayor porosidad y

la morfología irregular de la arena reciclada se traduce directamente en cambios en la resistencia del mortero. Entender ese mecanismo es fundamental para interpretar los resultados del presente estudio.

La resistencia a la compresión también depende de forma directa de la relación agua-cemento, que condiciona la porosidad del material endurecido y, con ello, su capacidad resistente. En mezclas con arena reciclada, esa relación se ve modificada por la mayor absorción del material reciclado, que puede absorber agua de la mezcla durante el proceso de elaboración y alterar la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento. Este mecanismo es uno de los más importantes para comprender por qué los morteros con arena reciclada tienden a tener menor resistencia que los convencionales cuando no se realizan los ajustes de dosificación correspondientes. La comprensión de este principio orienta tanto el diseño experimental como la interpretación de los resultados.

El alcance de esta investigación abarca la caracterización de los materiales, el diseño y fabricación de las mezclas, la ejecución de los ensayos de laboratorio y el análisis estadístico y económico de los resultados. El estudio no contempla la evaluación de propiedades de larga duración como la carbonatación o la resistencia al ataque por sulfatos, aspectos que requieren ensayos de durabilidad de mayor duración que los que pueden realizarse dentro del período académico disponible. Esas líneas de trabajo se proponen como investigaciones complementarias futuras que permitirían completar la caracterización del material y ampliar el alcance de las recomendaciones que pueden derivarse de los resultados.

El documento se organiza en cinco capítulos. El primero contextualiza el problema, define los objetivos e hipótesis y delimita el alcance del estudio. El segundo desarrolla el marco teórico que fundamenta las decisiones metodológicas y la interpretación de los resultados. El tercero describe la metodología, presenta los resultados experimentales y desarrolla su análisis, interpretación y discusión. El cuarto expone las conclusiones del estudio, y el quinto recoge las recomendaciones para la práctica constructiva y para investigaciones futuras. Las referencias bibliográficas y los anexos cierran el documento.

La pertinencia de esta investigación radica en su capacidad de generar datos empíricos locales que permitan validar o ajustar las recomendaciones disponibles en la literatura internacional para el uso de arenas recicladas en morteros. La literatura internacional sobre este tema es abundante, pero las condiciones locales tipo de residuos de demolición, características de las arenas de la región andina, normativas ecuatorianas

vigentes introducen variables específicas que no siempre están representadas en esos estudios. Los resultados de este trabajo aportan criterios técnicos basados en materiales y condiciones ecuatorianas, que pueden ser usados directamente por profesionales del sector de la construcción en el país para tomar decisiones informadas sobre el uso de arenas recicladas, potencialmente contribuye a una gestión más sostenible de los residuos sin sacrificar la calidad estructural de las obras.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Hallazgos en la resistencia y trabajabilidad

El estudio de morteros elaborados con arenas recicladas ha acumulado evidencia empírica considerable durante los últimos quince años, impulsado por la necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los materiales convencionales en la industria de la construcción. Los trabajos iniciales sobre materiales reciclados se concentraron principalmente en el hormigón, que por su mayor volumen de producción representaba el campo de mayor impacto ambiental potencial. Luego, reconociendo que los morteros presentan dinámicas propias en cuanto a trabajabilidad, resistencia y durabilidad que no pueden inferirse directamente de los resultados obtenidos en hormigón, la investigación se extendió también a este tipo de material. El cuerpo de conocimiento resultante es heterogéneo porque los resultados dependen fuertemente del origen de la arena reciclada y de las condiciones locales de cada estudio, pero permite identificar tendencias generales que orientan el diseño de investigaciones nuevas.

Investigaciones recientes han documentado que la textura y la morfología de las partículas de arena reciclada inciden de manera determinante sobre la trabajabilidad del mortero en estado fresco. Las partículas de mayor angularidad y rugosidad, producto del proceso de trituración mediante el que se obtiene la arena reciclada a partir de los escombros, generan mezclas con menor fluidez y mayor demanda de agua para alcanzar una consistencia comparable a la del mortero convencional elaborado con arena natural (Martínez-García et al., 2020). Esa relación entre la morfología de las partículas y la demanda de agua de la mezcla es uno de los hallazgos más consistentes en la literatura y uno de los mecanismos clave que explican el comportamiento diferencial de los morteros con arena reciclada.

La mayor demanda de agua que genera la arena reciclada no es solo un inconveniente operativo durante la preparación del mortero; tiene consecuencias directas sobre la

resistencia del material endurecido. Cuando se añade más agua para compensar la menor fluidez del mortero con arena reciclada, aumenta la relación agua-cemento efectiva de la mezcla, y eso se traduce en mayor porosidad en la pasta de cemento hidratada y, en consecuencia, en menor resistencia a la compresión. Ese encadenamiento entre morfología de la arena, demanda de agua, relación agua-cemento y resistencia es el principal mecanismo a través del cual la arena reciclada afecta el comportamiento mecánico del mortero, y es el hilo conductor que une la caracterización de los materiales con los resultados de los ensayos de resistencia en esta investigación.

La demanda hídrica adicional generada por la arena reciclada puede mitigarse mediante ajustes en la relación agua-cemento o a través del empleo de aditivos plastificantes, estrategias que permiten alcanzar condiciones de trabajabilidad adecuadas para la colocación del mortero sin necesidad de incrementar el contenido de agua y sin comprometer las propiedades mecánicas del material (Martínez-García et al., 2020). El uso de aditivos plastificantes en particular permite mantener la trabajabilidad con relaciones agua-cemento más bajas, lo que puede compensar en parte la reducción de resistencia asociada a la arena reciclada. Sin embargo, esa estrategia introduce un costo adicional que debe considerarse en el análisis de viabilidad económica del material reciclado.

La menor fluidez observada en morteros con arena reciclada tiene consecuencias prácticas directas para los constructores que van más allá de la complejidad técnica de ajustar la dosificación. En obra, un mortero con baja trabajabilidad dificulta la distribución uniforme del material sobre las superficies de mampostería y puede generar juntas con espesores irregulares o áreas de contacto insuficiente entre el mortero y las unidades. Esas irregularidades no solo afectan la estética de la obra, sino que pueden comprometer la resistencia de la junta y, con ello, la capacidad de carga del sistema de mampostería. Este efecto se intensifica conforme aumenta la proporción de arena reciclada en la mezcla, estableciendo un vínculo claro entre el porcentaje de material reciclado y la manejabilidad de la mezcla que tiene implicaciones prácticas importantes para la puesta en obra.

La textura rugosa que deteriora la trabajabilidad puede, resultar favorable para la adherencia mecánica entre la arena y el cemento, pues favorece el anclaje físico entre ambas fases. Esta doble condición de la arena reciclada que al mismo tiempo perjudica la trabajabilidad y puede beneficiar la adherencia ilustra la complejidad del diseño de mezclas con materiales reciclados, donde el equilibrio entre propiedades opuestas debe buscarse

mediante evaluación experimental rigurosa y no puede determinarse a priori solo con argumentos teóricos. Es precisamente esa complejidad la que justifica la realización de estudios experimentales locales como el presente, en lugar de limitarse a extrapolar las recomendaciones de la literatura internacional.

Los estudios de trabajabilidad también evidencian que el prehumedecimiento de la arena reciclada previo al mezclado constituye una estrategia eficaz para estabilizar la relación agua-cemento efectiva. Al prehumedecer la arena hasta su condición de saturación superficialmente seca antes de incorporarlo a la mezcla, se reduce la absorción de agua durante la elaboración del mortero y se mejora la consistencia de la mezcla sin necesidad de incrementar el contenido de agua total (Ossa-López et al., 2022). Esta técnica, aunque incorpora un paso adicional en el proceso de elaboración que tiene un costo operativo, mejora la reproducibilidad de los resultados y facilita el control de calidad, lo que puede justificar su adopción en aplicaciones donde la consistencia del desempeño es crítica. En esta investigación la arena reciclada no fue prehumedecida, lo que representa el escenario de elaboración más simple y cercano a las condiciones habituales de obra.

Investigaciones realizadas en el contexto colombiano confirmaron que la variabilidad en los resultados de resistencia entre morteros elaborados con distintos tipos de arena se explica principalmente por las diferencias en la porosidad y morfología de las partículas, que condicionan la calidad de la zona de transición interfacial entre la arena y la pasta de cemento (Benítez-Díaz & Ramos-Cañón, 2019). Esa zona de transición es la región del mortero donde primero se inician las fisuras bajo carga compresiva, y su calidad depende en gran medida de cuán bien puede la pasta de cemento envolver y adherirse a la superficie de la arena durante el proceso de hidratación. La arena natural, con su superficie más lisa y su menor porosidad, genera zonas de transición más homogéneas y densas que la arena reciclada, lo que se traduce en morteros con mayor resistencia media y menor dispersión de resultados.

La acumulación de evidencia experimental sobre la trabajabilidad y la resistencia de morteros con arenas recicladas proporciona un marco de referencia sólido para el diseño del presente estudio, permitiendo anticipar las tendencias esperadas y formular hipótesis fundamentadas en datos previos. No obstante, la variabilidad de los resultados reportados en la literatura refuerza la necesidad de realizar estudios locales que generen datos específicos para los materiales disponibles en cada contexto. Las arenas recicladas producidos en Quito

a partir de escombros de demolición locales tienen características que dependen del tipo de construcción demolida, del proceso de trituración empleado y de las condiciones climáticas de la región andina ecuatoriana, factores que no están necesariamente representados en los estudios realizados en Europa, Asia o en otras ciudades de América Latina. Esa brecha entre la evidencia disponible y las condiciones locales es precisamente la que esta investigación busca reducir.

1.2.2 Resistencia a la compresión en morteros con arena reciclada

La resistencia a la compresión es la propiedad mecánica central en la evaluación del desempeño de los morteros de pega, pues determina la capacidad del material para soportar las cargas transmitidas por las unidades de mampostería sin presentar fallas estructurales que comprometan la integridad del sistema. Su evaluación sistemática en morteros con distintos porcentajes de arena reciclada ha permitido identificar tendencias claras en la relación entre el porcentaje de sustitución y el comportamiento mecánico del material, tendencias que, si bien presentan variaciones entre estudios, son suficientemente consistentes como para servir de referencia para el diseño de nuevas investigaciones y para la formulación de hipótesis con fundamento empírico.

La relación agua-cemento constituye el parámetro de diseño de mayor influencia sobre la resistencia, pues controla directamente la porosidad de la pasta de cemento hidratada. Una relación elevada genera una estructura interna más porosa y permeable, con menor capacidad resistente, mientras que una relación baja produce una pasta más densa y resistente, aunque con menor trabajabilidad, lo que dificulta la colocación del material en obra (Kurda et al., 2019). Este principio resulta especialmente relevante en mezclas con arena reciclada, donde el ajuste del agua para mantener la consistencia de referencia puede incrementar involuntariamente la relación agua-cemento efectiva y reducir la resistencia del mortero por encima de lo que se esperaría solo por las propiedades intrínsecas de la arena reciclada.

Ese incremento involuntario de la relación agua-cemento es uno de los factores que más complican la interpretación de los resultados en estudios con arena reciclada. Cuando se compara la resistencia de un mortero con arena natural frente a uno con arena reciclada sin controlar la trabajabilidad, parte de la diferencia observada puede deberse no a las propiedades de la arena en sí, sino al mayor contenido de agua que la arena reciclada requiere para alcanzar la misma consistencia. Por eso, el control de la consistencia mediante el ensayo

de flujo tal como se hace en esta investigación es una decisión metodológica fundamental que permite separar el efecto de la arena reciclada sobre la resistencia del efecto de la variación en la relación agua-cemento.

La evolución de la resistencia con el tiempo en morteros con arena reciclada sigue patrones similares a los de los morteros convencionales, con un desarrollo más pronunciado durante los primeros 28 días y una tasa de crecimiento que disminuye progresivamente a medida que avanza la hidratación del cemento. Sin embargo, en morteros con mayor proporción de arena reciclada, el desarrollo de resistencia entre los 7 y los 28 días tiende a ser más modesto, lo que puede atribuirse a la mayor porosidad del material y a la inferior calidad de la zona de transición interfacial, que limitan la eficiencia de la hidratación del cemento en las edades más avanzadas.

Trabajos recientes demostraron que la sustitución parcial de la arena natural por material reciclado puede alcanzar resultados mecánicos comparables a los morteros convencionales cuando se emplean porcentajes entre el 20 % y el 30 %, dependiendo de la dosificación utilizada y de las características específicas de la arena reciclada (Coppola et al., 2020). Sustituciones de hasta el 25 % permiten mantener propiedades mecánicas similares a las del mortero de referencia, mientras que porcentajes mayores afectan progresivamente la resistencia, con pérdidas que se aceleran a partir del 50 % de reemplazo, cuando los efectos combinados de la mayor relación agua-cemento y la inferior calidad de la zona de transición interfacial empiezan a interactuar de manera sinérgica.

Esos resultados son coherentes con los reportados por otros investigadores en distintos contextos geográficos, lo que sugiere la existencia de un umbral de sustitución relativamente consistente situado entre el 25 % y el 50 % dentro del cual la arena reciclada puede emplearse sin comprometer significativamente la resistencia del mortero. El valor exacto de ese umbral varía en función de las características específicas de la arena reciclada, la calidad del cemento, la dosificación empleada y las condiciones de curado, lo que justifica la realización de estudios locales con los materiales propios de cada región en lugar de adoptar directamente las recomendaciones de la literatura internacional elaboradas con materiales distintos.

El mortero desempeña un papel fundamental en el comportamiento de la mampostería, actuando como elemento de unión entre unidades y como medio de transmisión y distribución de los esfuerzos que actúan sobre el sistema. Una reducción en su

resistencia debida al uso de arena reciclada puede afectar la capacidad de carga del muro y reducir su resistencia ante cargas sísmicas o gravitacionales, aspecto de particular relevancia en el contexto sísmico ecuatoriano donde los materiales de mampostería deben satisfacer requisitos mínimos de resistencia para garantizar la seguridad estructural de los edificios ante eventos sísmicos de distintas magnitudes (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2022). Esta consideración no invalida el uso de la arena reciclada, pero sí exige que su incorporación se haga con criterios técnicos rigurosos y dentro de los rangos de sustitución que garanticen el cumplimiento normativo.

1.3 Planteamiento del problema

La industria de la construcción en Quito enfrenta simultáneamente dos problemas interrelacionados cuya solución individual no resulta suficientemente eficaz y cuya atención conjunta podría generar sinergias ambientales y económicas relevantes para el sector. El primer problema es la sobreexplotación de fuentes de arenas naturales como la mina de Pifo, cuya extracción intensiva genera erosión de suelos, alteración de cauces hídricos y degradación de ecosistemas periurbanos que afectan la calidad de vida de las comunidades vecinas y reducen la disponibilidad futura del recurso. El segundo es la generación creciente de residuos de construcción y demolición que no reciben tratamiento adecuado y se acumulan en espacios no habilitados, contaminando el entorno y desperdiciando materiales que podrían reincorporarse al ciclo productivo de la construcción.

Según datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2022), la arena y las arenas finas constituyen el recurso natural más extraído del planeta en términos de volumen, superando incluso al agua dulce en algunas regiones del mundo, lo que evidencia la magnitud del impacto ambiental global asociado a su explotación. En Ecuador, ese impacto se amplifica por la concentración de la actividad constructiva en pocas zonas de extracción y por la fiscalización limitada de las actividades mineras de pequeña escala, que operan frecuentemente sin planes de manejo ambiental adecuados y con una supervisión institucional insuficiente para prevenir los daños que genera la extracción intensiva de arenas.

La escala del problema en el contexto local es significativa, la mina de Pifo es una de las principales fuentes de arenas para la construcción en Quito, y su explotación intensiva a lo largo de décadas ha generado impactos que van desde la alteración del paisaje hasta la afectación de fuentes de agua que abastecen a comunidades de la zona. La expansión

continua de la ciudad hacia los sectores periurbanos donde se encuentran las canteras agudiza los conflictos entre la actividad extractiva y las comunidades residentes, generando presiones para restringir la explotación que, si no van acompañadas de alternativas técnicas viables, pueden derivar en escasez de materiales y aumento de costos para la construcción.

La generación de residuos de construcción y demolición en las ciudades ecuatorianas ha alcanzado proporciones que rebasan la capacidad de gestión de los sistemas municipales disponibles. En Quito, grandes volúmenes de escombros provenientes de demoliciones y refacciones (Figura 2), se depositan de manera inadecuada en sitios no habilitados, generando pasivos ambientales que afectan la calidad del suelo, del agua subterránea y del aire en los sectores cercanos a los botaderos informales. La transformación de esos residuos en arenas recicladas mediante trituración y clasificación representaría una solución concreta para ambas problemáticas, siempre que el material resultante cuente con propiedades técnicas suficientes para su uso en morteros, condición que solo puede verificarse mediante estudios experimentales con los materiales propios del lugar.



Figura 2. Acumulación de residuos de construcción y demolición.

Fuente: (UNEP, 2022)

La limitada disponibilidad de estudios experimentales locales que evalúen el comportamiento de morteros con arena reciclada proveniente de demoliciones ecuatorianas dificulta la toma de decisiones técnicas informadas por parte de los profesionales de la construcción que trabajan en el país. Los datos disponibles en la literatura internacional no siempre son trasladables directamente al contexto local, dado que las características de la arena reciclada dependen del tipo de material de origen, del proceso de trituración empleado y de las condiciones ambientales locales, factores que varían significativamente entre

regiones y que influyen de manera determinante sobre el comportamiento del material en las mezclas de mortero.

La ausencia de datos locales genera desconfianza entre los profesionales de la construcción, quienes prefieren continuar empleando arenas naturales cuyo comportamiento conocen bien y cuyo cumplimiento con los requisitos normativos está verificado, antes que arriesgarse a usar un material alternativo sobre el que no hay evidencia técnica local suficiente. Superar esa barrera requiere generar evidencia técnica robusta, producida con metodologías normalizadas y en condiciones representativas del contexto ecuatoriano, que permita a esos profesionales tomar decisiones informadas basadas en datos propios del país y no en extrapolaciones de resultados obtenidos en otras regiones (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2021).

El problema de investigación se formula en los siguientes términos: ¿en qué medida la sustitución parcial de la arena natural por arena reciclada en distintas proporciones afecta la resistencia a la compresión de morteros de pega elaborados bajo las condiciones normativas vigentes en Ecuador, y cuáles son las dosificaciones que ofrecen el mejor equilibrio entre desempeño técnico y costo de producción? Esta pregunta orienta el diseño experimental hacia la evaluación cuantitativa de los efectos de la arena reciclada sobre el comportamiento mecánico del mortero, en un rango de proporciones de sustitución suficientemente amplio como para identificar el umbral a partir del cual el desempeño se deteriora hasta niveles inaceptables según la normativa técnica aplicable.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la influencia de la sustitución de la arena natural por arena reciclada en la resistencia a la compresión de morteros y establecer las dosificaciones técnica y económicamente viables para su aplicación en la construcción.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la arena natural proveniente de la mina de Pifo y la arena reciclada obtenida de residuos de construcción y demolición, mediante la determinación de sus propiedades físicas (gravedad específica, absorción, peso unitario suelto, granulometría), conforme a las normas NTE INEN 872 (Áridos para hormigón), ASTM C128 (Método de ensayo estándar para la densidad relativa (gravedad

específica) y la absorción de agregados finos), y ASTM C29 (Método de ensayo estándar para la densidad aparente (peso unitario) e índice de huecos en áridos), con el propósito de evaluar su idoneidad para la elaboración de morteros y establecer las diferencias entre ambos materiales que condicionan el comportamiento de las mezclas.

2. Elaborar mezclas de mortero con cinco niveles de sustitución de arena reciclada respecto a la arena natural (0 % - 100 %, 25 % - 75 %, 50 % - 50 %, 75 % - 25 %, 100 % - 0 %) en dosificaciones 1:3 y 1:4, procurando mantener una consistencia de referencia mediante el ajuste del contenido de agua de cada mezcla , de acuerdo con el ensayo de flujo conforme a la ASTM C1437 (2022), con el propósito de trabajar con condiciones de consistencia similares entre las diferentes dosificaciones.
3. Medir la resistencia a la compresión de los morteros con diferentes dosificaciones 1:3 y 1:4 para diferentes porcentajes de sustitución de arena reciclada, sobre cubos de 50 mm ensayados a los 7 y 28 días de curado en agua, aplicando los procedimientos de la NTE INEN 488 y la ASTM C109/C109M (2023).
4. Analizar estadísticamente los resultados de resistencia a la compresión de los morteros elaborados con diferentes porcentajes de sustitución de arena natural por arena reciclada, con el propósito de establecer la influencia del nivel de reemplazo e identificar diferencias significativas entre las mezclas evaluadas.
5. Realizar un análisis comparativo de costos de producción para cada dosificación de mortero evaluada, considerando el precio de los materiales disponibles en el mercado local y los costos de procesamiento de la arena reciclada, con el fin de determinar la viabilidad económica de cada alternativa en el contexto constructivo.

1.5 Justificación

1.5.1 Justificación teórica

Esta investigación responde a la necesidad de generar conocimiento técnico aplicado al contexto ecuatoriano sobre el comportamiento de morteros con arena reciclada, llenando una brecha identificada en la literatura nacional sobre materiales de construcción sostenibles. La bibliografía internacional disponible aporta tendencias generales sobre el uso de arenas recicladas en morteros, pero las condiciones locales tipo de residuos de demolición predominantes en Quito, características mineralógicas y granulométricas de los arenas de la región andina, normativas ecuatorianas vigentes, introducen variables específicas que no

están representadas en esos estudios y que requieren validación experimental propia para poder ser incorporadas con confianza en la práctica constructiva nacional.

Investigaciones publicadas en años recientes demostraron que los morteros elaborados con arenas recicladas de hormigón pueden alcanzar niveles de resistencia comparables a los convencionales cuando se controlan adecuadamente las propiedades físicas del material y se realizan los ajustes necesarios en la dosificación (Ulsen et al., 2019). Este hallazgo es significativo porque establece que la viabilidad técnica de la arena reciclada no depende únicamente de sus propiedades intrínsecas, que son en general inferiores a las de la arena natural, sino del rigor con que esas propiedades se caracterizan y se integran en el diseño de la mezcla. Eso significa que, con la metodología adecuada, la arena reciclada puede ser una alternativa técnicamente competitiva, no solo una solución de segundo orden que se acepta por sus ventajas ambientales a pesar de sus limitaciones mecánicas.

Ese hallazgo constituye uno de los pilares teóricos de la presente investigación. Si el desempeño de la arena reciclada depende del rigor de la caracterización y del diseño de la mezcla, entonces un estudio experimental bien diseñado, que caracterice adecuadamente los materiales locales y ajuste las dosificaciones en función de esas características, tiene el potencial de identificar condiciones bajo las cuales la arena reciclada de Quito puede usarse en morteros de manera técnicamente aceptable. Esa es precisamente la premisa que sustenta el diseño metodológico de esta investigación y la hipótesis que se busca verificar.

El fundamento teórico se articula en torno a tres principios que orientan tanto el diseño experimental como la interpretación de los resultados: la relación agua-cemento como factor determinante de la resistencia, la zona de transición interfacial como el eslabón más débil del mortero y la granulometría de la arena como condicionante de la trabajabilidad. La comprensión profunda de estos tres principios y de cómo la arena reciclada los modifica permite anticipar los efectos esperados sobre el comportamiento del mortero y diseñar estrategias para mitigarlos, como el ajuste del contenido de agua y el prehumedecimiento de la arena. Sin ese sustento teórico, el estudio experimental sería solo una colección de datos sin interpretación; con él, los datos adquieren significado y permiten formular recomendaciones fundamentadas.

La investigación también se sustenta en los principios de la economía circular, que promueven el aprovechamiento de materiales de descarte y la integración de los residuos en nuevos ciclos productivos en lugar de considerarlos simplemente como un problema de

gestión de residuos (European Environment Agency, 2020). En el sector de la construcción, esos principios se materializan en la valorización de los residuos de demolición como arenas recicladas, contribuyendo simultáneamente a la reducción de la extracción de arenas naturales y a la disminución del volumen de residuos depositados en vertederos. La viabilidad técnica de la arena reciclada es condición necesaria para que esa valorización sea real y no solo una aspiración ambiental sin respaldo práctico.

La revisión de estudios previos evidencia que los resultados disponibles en la literatura son heterogéneos y en ocasiones aparentemente contradictorios, lo que refleja la influencia determinante de las condiciones locales sobre el comportamiento del material reciclado. Esa heterogeneidad no invalida la investigación comparada; al contrario, refuerza la justificación para realizar estudios experimentales propios que generen datos representativos del contexto ecuatoriano, en lugar de limitarse a la extrapolación de resultados obtenidos en otras regiones con materiales y condiciones distintos. Los datos propios permiten además establecer referencias locales que sirvan como punto de comparación para estudios futuros y como base para el desarrollo de guías técnicas nacionales sobre el uso de arenas recicladas en la construcción.

1.5.2 Justificación metodológica

La metodología adoptada en esta investigación combina la caracterización física de las arenas con la elaboración experimental de mezclas de mortero y la evaluación cuantitativa de sus propiedades mecánicas mediante ensayos normalizados, proporcionando una base de datos sólida, reproducible y comparable con la de otros estudios sobre el mismo tema. Este enfoque experimental garantiza que los resultados reflejen el comportamiento real de los materiales bajo condiciones controladas de laboratorio, eliminando variables de confusión que podrían oscurecer la relación entre el porcentaje de arena reciclada y el desempeño mecánico del mortero.

La norma NTE INEN 872 establece los requisitos granulométricos, de limpieza y de calidad que deben cumplir las arenas utilizadas en la elaboración de morteros en Ecuador, incluyendo los criterios de gradación, contenido máximo de material fino, forma de las partículas y contenido de cloruros y sulfatos. Su aplicación en la caracterización de ambas arenas garantiza que las comparaciones entre la arena natural y la reciclada se realicen sobre una base normativa reconocida a nivel nacional, otorgando validez práctica a los resultados en términos del cumplimiento de los requisitos técnicos nacionales y facilitando la

comunicación de los hallazgos a profesionales de la construcción que trabajan bajo ese marco normativo.

El diseño experimental con cinco niveles de sustitución distribuidos en incrementos regulares del 25 % proporciona una resolución suficiente para trazar una curva del comportamiento del mortero en función del porcentaje de arena reciclada, permitiendo identificar los puntos de inflexión donde la tendencia de la resistencia cambia de manera significativa. Un diseño con menos niveles de sustitución, por ejemplo, solo con 0 %, 50 % y 100 % no permitiría distinguir si la transición entre comportamiento aceptable e inaceptable ocurre cerca del 25 % o cerca del 50 %, lo que reduciría la utilidad práctica de los resultados para la toma de decisiones en obra.

El control de la consistencia del mortero mediante el ensayo de flujo conforme a la ASTM C1437 (2022) es una decisión metodológica que garantiza que todas las mezclas evaluadas se elaboren bajo condiciones de trabajabilidad comparables, eliminando la consistencia como variable de confusión en el análisis de la resistencia. Sin este control, las diferencias en la resistencia observadas entre dosificaciones podrían reflejar parcialmente variaciones en la trabajabilidad del mortero y no solo el efecto específico de la arena reciclada. Al garantizar que todas las mezclas tienen la misma fluidez al momento de la fabricación de las probetas, el estudio permite atribuir las diferencias de resistencia directamente a la composición de la mezcla.

Investigadores especializados en materiales reciclados han recomendado la aplicación de análisis estadísticos rigurosos en estudios de esta naturaleza, dado que la heterogeneidad inherente a los materiales reciclados introduce variabilidad adicional en los resultados que debe cuantificarse y distinguirse de las diferencias reales de desempeño entre dosificaciones, para garantizar la solidez de las conclusiones y evitar que diferencias producidas por la variabilidad del material se interpreten erróneamente como diferencias sistemáticas de resistencia (Bravo et al., 2021). La incorporación del análisis estadístico en la metodología de esta investigación responde directamente a esa recomendación y permite establecer con el nivel de confianza apropiado cuáles diferencias entre dosificaciones son estadísticamente significativas y cuáles podrían atribuirse al azar del muestreo.

El análisis de costos integrado en la metodología proporciona una dimensión económica que permite evaluar la viabilidad práctica de la arena reciclada no solo desde el punto de vista del desempeño mecánico, sino también desde la perspectiva de la rentabilidad

del proceso constructivo. Un material técnicamente viable pero económicamente más caro que la alternativa convencional tiene pocas posibilidades de ser adoptado por la industria de la construcción, a menos que existan incentivos regulatorios o fiscales que compensen la diferencia de costos. El análisis económico integrado en este estudio permite identificar las condiciones de precio y escala a las que la arena reciclada resulta económicamente competitivo, información que es directamente útil para constructores y promotores de obras.

1.6 Hipótesis

La sustitución parcial de arena natural por arena reciclada en morteros de mampostería permite mantener niveles adecuados de resistencia a la compresión y reducir el costo de producción hasta un determinado porcentaje de reemplazo, identificándose proporciones técnica y económicamente viables para su utilización en la construcción.

1.7 Delimitación

1.7.1 Delimitación temporal

La investigación se desarrolla durante el período académico comprendido entre marzo y julio de 2026, tiempo en el que se ejecutan todas las etapas del proceso experimental: recolección y preparación de los materiales, caracterización físico-mecánica de las arenas, elaboración de las mezclas de mortero, fabricación y curado de las probetas cúbicas, ejecución de los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, y procesamiento estadístico y económico de los datos. La planificación detallada de las actividades garantiza que todos los procedimientos se completen dentro del plazo establecido, respetando los tiempos de curado requeridos por la normativa técnica de referencia y sin comprometer la calidad del proceso experimental por restricciones de tiempo.

1.7.2 Delimitación geográfica

La arena natural fue obtenida de una mina ubicada en el sector de Pifo, parroquia rural del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador, localizada en las coordenadas 0°14'43.04"S 78°18'51.97"W (Figura 3) La arena reciclada proviene de residuos de construcción y demolición generados en la ciudad de Quito, procesados mediante trituración y clasificación para obtener el material en el rango granulométrico requerido para su uso en morteros.

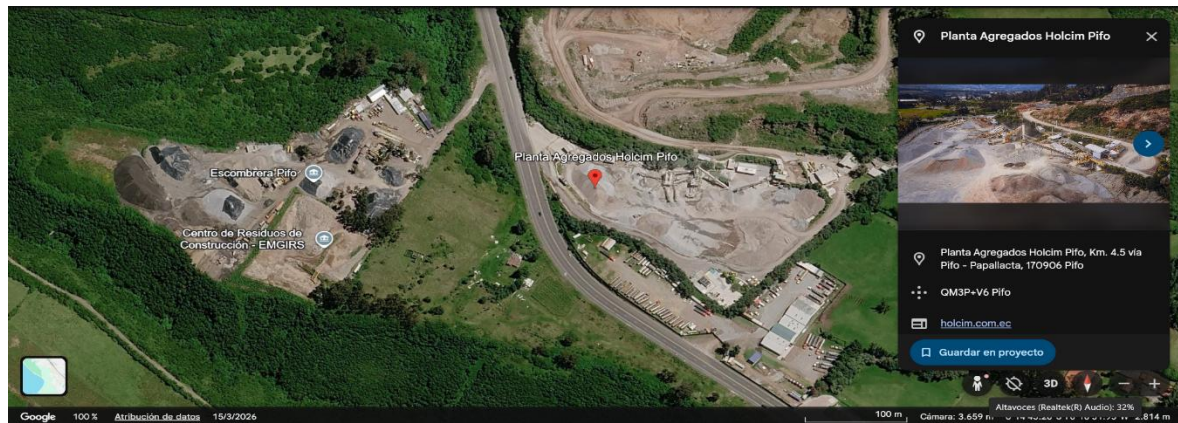


Figura 3. Localización geográfica de la mina de agregados en Pifo

Fuente: (Google Earth, 2026)

Los ensayos experimentales se realizan en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN), en la ciudad de Quito (Figura 4), bajo condiciones ambientales controladas que garantizan la reproducibilidad de los resultados.



Figura 4. Localización geográfica la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador

Fuente: (Google Earth, 2026)

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

1.8 Morteros

Los morteros son materiales compuestos formados por cemento, arenas finas, agua y ocasionalmente aditivos (Figura 5), cuya función principal en la construcción es actuar como elemento de unión entre las unidades de mampostería, transmitiendo y distribuyendo los esfuerzos a lo largo de las juntas horizontales y verticales del sistema. Su comportamiento no puede analizarse como el de un material homogéneo, sino como el de un material compuesto en el que las propiedades de cada componente y la naturaleza de las interfases entre ellos determinan el desempeño global del conjunto. Esta complejidad intrínseca hace que la selección y el control de cada ingrediente, y especialmente de las proporciones entre ellos, sean factores determinantes para garantizar la calidad del producto final en términos de resistencia, trabajabilidad y durabilidad.



Figura 5. Mortero en estado fresco durante su preparación.

Fuente: (Santiago Criado,2026)

Autores especializados en materiales de construcción explican que la resistencia del mortero depende fundamentalmente de la resistencia de la pasta de cemento endurecida, de la resistencia de las arenas y de la calidad de la zona de transición interfacial entre ambas fases, siendo esta última generalmente el componente más débil del sistema y el primero en fallar cuando el material es sometido a cargas compresivas (Nedeljković et al., 2021). La zona de transición interfacial presenta una microestructura más porosa que el resto de la pasta de cemento, como consecuencia de los efectos de segregación local del agua durante el proceso de fraguado, lo que genera puntos de menor resistencia y mayor permeabilidad en las regiones adyacentes a las superficies de las arenas.



Figura 6. Mortero en estado endurecido.

Fuente: (Santiago Criado,2026)

Esa mayor porosidad de la zona de transición interfacial tiene consecuencias tanto para la resistencia mecánica como para la durabilidad del mortero. Desde el punto de vista mecánico, es la región donde se concentran los esfuerzos bajo carga compresiva y donde se inician las micro fisuras que eventualmente se propagan hacia la pasta de cemento y producen la rotura del material. Desde el punto de vista de la durabilidad, es la vía preferencial de ingreso de agua y agentes agresivos al interior del mortero, lo que acelera los mecanismos de deterioro. Cualquier modificación en las propiedades de la arena que afecte la calidad de esa zona y la arena reciclada introduce varias de esas modificaciones tiene por tanto repercusiones tanto sobre la resistencia como sobre la vida útil del material.

La relación agua-cemento constituye el parámetro de diseño de mayor impacto sobre la porosidad de la pasta de cemento hidratada y, en consecuencia, sobre la resistencia y la durabilidad del mortero endurecido. Una reducción de la relación agua-cemento disminuye la cantidad de agua evaporable que, al secarse, genera vacíos en la microestructura de la pasta, densificando el material y mejorando su resistencia. Sin embargo, relaciones agua-cemento demasiado bajas producen mezclas con poca trabajabilidad que dificultan su

colocación en obra y pueden generar problemas de compactación que, paradójicamente, aumentan la porosidad del mortero endurecido al dejar vacíos sin llenar entre las partículas de arena.

Las propiedades de las arenas granulometría, forma, textura superficial y absorción influyen de manera determinante sobre la trabajabilidad del mortero en estado fresco y sobre su compacidad y resistencia en estado endurecido. Una distribución granulométrica bien graduada favorece el empaquetamiento de las partículas, reduciendo los vacíos internos que deben ser rellenados por la pasta de cemento y mejorando así la resistencia global del material endurecido. La textura rugosa de las partículas mejora la adherencia mecánica con la pasta de cemento porque favorece el anclaje físico en la interfaz, aunque al mismo tiempo incrementa la demanda de agua de la mezcla al aumentar la fricción entre partículas durante el mezclado.

La adherencia entre el mortero y las unidades de mampostería es una propiedad crítica que determina la capacidad del sistema para resistir esfuerzos de tracción perpendicular a las juntas y esfuerzos de corte paralelos a ellas. Una adecuada retención de agua por parte del mortero evita que los sustratos absorbentes extraigan la humedad necesaria para la hidratación del cemento en la zona interfacial, condición indispensable para el desarrollo de una interfaz de adherencia de calidad que permita la transferencia efectiva de esfuerzos entre el mortero y las unidades.

El comportamiento a la compresión del mortero se describe como una falla progresiva que comienza con la formación de micro fisuras en la zona de transición interfacial, las cuales se propagan hacia la pasta de cemento y eventualmente confluyen para generar fisuras macroscópicas que conducen a la rotura final del material bajo la carga aplicada (Zhao et al., 2021). Este mecanismo explica por qué la calidad de la zona de transición interfacial es el factor más determinante de la resistencia a la compresión del mortero, y por qué cualquier material que aumente la heterogeneidad o la porosidad de esa zona como la arena reciclada con su mortero adherido genera una reducción de la resistencia que puede ser más pronunciada de lo que sugeriría solo la resistencia intrínseca de la arena.

El reciclaje de residuos de construcción y demolición para producir arenas recicladas introduce nuevas variables en la composición del mortero que deben ser evaluadas experimentalmente antes de su adopción generalizada en la práctica constructiva. La presencia de mortero antiguo adherido en las partículas de arena reciclada genera zonas de

debilidad adicionales dentro de la microestructura del material endurecido, que pueden afectar tanto la resistencia mecánica como la durabilidad del mortero nuevo. La comprensión de estos mecanismos de interacción entre la arena reciclada y la pasta de cemento nueva es el punto de partida para el diseño de estrategias de dosificación que permitan aprovechar el potencial de la arena reciclada sin comprometer el desempeño del material.

1.9 Clasificación de los morteros

1.9.1 Según su composición

La clasificación de los morteros según su composición identifica el tipo de conglomerante empleado como agente aglomerante entre los componentes de la mezcla (Figura 7), lo que determina en gran medida sus propiedades mecánicas, su trabajabilidad y su comportamiento frente a los agentes de deterioro ambiental. Esta clasificación es importante porque orienta la selección del material más adecuado según las exigencias de cada aplicación específica, considerando factores como la resistencia requerida, las condiciones de exposición ambiental del elemento constructivo y el tipo de sustrato sobre el que se va a aplicar el mortero.

Los morteros de cemento Portland son los de mayor resistencia mecánica dentro de esta clasificación, producto de la formación de silicatos y aluminatos de calcio hidratados durante el proceso de hidratación del cemento, que generan una matriz cristalina densa con elevada capacidad resistente. Los morteros de cal, en contraste, desarrollan su resistencia principalmente a través del proceso de carbonatación, que produce materiales con menor resistencia, pero mayor plasticidad y reversibilidad, características que los hacen especialmente valorados en trabajos de conservación y restauración del patrimonio construido donde la compatibilidad con los materiales originales es prioritaria (Veiga, 2019).

Los morteros de cemento Portland son los predominantes en la construcción nueva convencional en Ecuador, debido a su alta resistencia, su tiempo de fraguado relativamente corto y la amplia disponibilidad del cemento en el mercado local. Su mayor rigidez respecto a los morteros de cal puede generar incompatibilidades mecánicas con sustratos de menor rigidez, especialmente en la rehabilitación de edificios históricos construidos con materiales tradicionales, pero en la construcción nueva con bloques de hormigón o ladrillos de arcilla cocida esa incompatibilidad no suele ser un problema relevante.

Los morteros mixtos, elaborados con cemento y cal en proporciones variables, ofrecen una combinación de la resistencia del cemento con la plasticidad y la trabajabilidad de la cal, resultando en materiales más versátiles que los morteros de cemento puro. La proporción entre cemento y cal define el equilibrio entre resistencia y trabajabilidad del mortero resultante, permitiendo ajustar las propiedades del material a las exigencias específicas de cada aplicación. En contextos donde la trabajabilidad es prioritaria, por ejemplo, en elementos de fachada que requieren aplicación manual prolongada los morteros mixtos ofrecen ventajas operativas importantes sobre los morteros de cemento puro.

La compatibilidad química y mecánica entre el mortero y los materiales con que entra en contacto es un criterio de selección tan importante como la resistencia del material en sí, especialmente en aplicaciones de rehabilitación donde el mortero nuevo debe coexistir con materiales históricos de características muy distintas (Arandigoyen & Álvarez, 2019). Un mortero más resistente y rígido que el sustrato puede generar esfuerzos de tensión durante los movimientos térmicos o por retracción del material, provocando el desprendimiento del mortero o la fisuración del sustrato, consecuencias que en muchos casos son más graves que el deterioro que se buscaba reparar.

La incorporación de arenas recicladas puede modificar el equilibrio de propiedades de cualquier tipo de mortero, introduciendo variaciones en la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad que dependen de las características específicas de la arena reciclada empleado y del porcentaje de sustitución utilizado. En los morteros de cemento Portland que son los evaluados en esta investigación, la mayor absorción de la arena reciclada y su menor gravedad específica respecto al arena natural requieren ajustes en la dosificación que deben determinarse experimentalmente para cada fuente de material reciclado y cada relación arena-cemento de interés.



Figura 7. Morteros según su composición.

Fuente: Imagen generada con IA, ChatGPT.

1.9.2 Según su uso

La clasificación de los morteros según su uso establece los requisitos técnicos específicos que cada aplicación impone sobre el material (Figura 8), orientando el diseño de mezclas hacia el equilibrio óptimo de propiedades que satisfaga las exigencias de resistencia, trabajabilidad y durabilidad propias de cada caso de uso particular. Esta clasificación tiene implicaciones directas para la selección del tipo de mortero, las proporciones de los materiales y los criterios de evaluación que deben aplicarse para verificar el cumplimiento de los requisitos de la aplicación.

Los morteros de pega, destinados a la unión de unidades de mampostería, deben equilibrar adecuadamente su resistencia a la compresión con su trabajabilidad, retención de agua y capacidad de adherencia, pues todas estas propiedades son determinantes para el desempeño mecánico del sistema de mampostería como conjunto integrado (Fonseca et al., 2017). Una resistencia excesiva del mortero respecto a la de las unidades puede generar incompatibilidades mecánicas que concentran esfuerzos en las unidades y conducen a su fisuración, mientras que una resistencia insuficiente compromete la capacidad de carga del muro y su comportamiento ante cargas sísmicas.

Los morteros de pega son el tipo más frecuentemente empleado en la construcción convencional de mampostería en Ecuador y constituyen el objeto específico de evaluación en la presente investigación. Su desempeño condiciona directamente el comportamiento global del sistema de mampostería, ya que actúan como el elemento de transmisión y distribución de cargas entre las unidades estructurales y como la primera línea de defensa contra las acciones sísmicas que generan esfuerzos de corte en las juntas. La evaluación de la arena reciclada en este tipo de mortero tiene, por tanto, implicaciones directas para la seguridad estructural de las construcciones de mampostería.

Los morteros de revestimiento tienen como función principal la protección de los elementos estructurales contra la exposición ambiental y la generación de superficies de acabado con las características estéticas y funcionales requeridas. Para esta aplicación, la adherencia al sustrato, la trabajabilidad y la resistencia a la fisuración por retracción son las propiedades prioritarias, mientras que la resistencia a la compresión, aunque importante, ocupa un lugar secundario. La evaluación de la arena reciclada en morteros de revestimiento plantea desafíos específicos relacionados con la mayor retracción que puede generar la

mayor superficie específica de las partículas recicladas, aspecto que queda fuera del alcance de este estudio.

La compatibilidad entre el mortero y las unidades de mampostería no es únicamente mecánica, sino también física, pues el mortero debe tener una porosidad compatible con la de las unidades para garantizar una adecuada distribución de la humedad en la interfaz durante el proceso de fraguado. Si el mortero es demasiado absorbente, extrae agua de las unidades porosas y puede generar una hidratación deficiente del cemento en la zona interfacial; si es poco absorbente, el exceso de agua en la interfaz puede debilitar la adherencia (Pereira et al., 2020). Este aspecto es especialmente relevante en morteros con arena reciclada, cuya mayor porosidad puede alterar el equilibrio de humedad en la interfaz de maneras que afectan negativamente la adherencia.

Los criterios de evaluación empleados en esta investigación para determinar la viabilidad de cada dosificación se basan en los requisitos mínimos de resistencia establecidos por la norma NTE INEN 1855 para morteros de mampostería. La aplicación de esa norma como referente garantiza que las conclusiones sobre la viabilidad de la arena reciclada sean interpretables en términos del cumplimiento de las exigencias técnicas específicas de la aplicación constructiva evaluada, y que las recomendaciones que se deriven del estudio sean directamente aplicables en la práctica constructiva ecuatoriana sin necesidad de convertirlas a otros marcos normativos.



Figura 8. Morteros según su uso.

Fuente: (MRS Constructores,2023)

1.9.3 Según su resistencia

La clasificación de los morteros según su resistencia a la compresión establece categorías de desempeño mecánico con requisitos mínimos cuantificados, que orientan la selección del tipo de mortero más adecuado según las cargas esperadas, las condiciones de exposición y los requisitos de la normativa de diseño estructural aplicable en cada caso. Esta

clasificación por resistencia es especialmente relevante en contextos sísmicos como el ecuatoriano, donde los requisitos de resistencia de los materiales de mampostería son más estrictos que en regiones de baja sismicidad.

La norma ASTM C270 establece cuatro tipos de mortero **M** (Máxima resistencia), **S** (Resistencia superior), **N** (Resistencia normal) y **O** (Resistencia baja), organizados de mayor a menor resistencia especificada, destinados respectivamente a aplicaciones de alta exposición y cargas elevadas, a aplicaciones con requisitos de resistencia moderados a altos como mampostería estructural en zonas sísmicas, a aplicaciones convencionales de mampostería interior y exterior, y a aplicaciones de baja resistencia en interiores protegidos sin requisitos estructurales exigentes. Cada categoría tiene especificaciones de proporciones mínimas de cemento y requisitos de resistencia mínima a los 28 días que deben verificarse mediante ensayos normalizados.

La norma NTE INEN 1855 establece los requisitos de resistencia para morteros de mampostería en el contexto ecuatoriano, constituyendo el referente normativo nacional con el que se comparan los resultados de esta investigación. La aplicación de esta norma como criterio de evaluación de las dosificaciones garantiza que los criterios de aceptación empleados sean representativos de las exigencias reales del sector de la construcción ecuatoriano y que las recomendaciones que se deriven del estudio sean aplicables directamente en proyectos sometidos a ese marco normativo.

La resistencia del mortero no debe considerarse de manera aislada como un indicador de calidad del material en sí mismo, sino en relación con la resistencia de las unidades de mampostería con las que se combinará en obra. La norma ACI 530 establece que la resistencia del mortero debe ser compatible con la de las unidades, evitando que el mortero sea significativamente más resistente que las unidades que une, porque un mortero excesivamente resistente puede actuar como un elemento rígido que concentra esfuerzos en las unidades y provoca su fisuración bajo cargas que el sistema de mampostería debería soportar sin problemas.

La identificación de las dosificaciones con arena reciclada que mantienen la resistencia dentro de los rangos normativos exigidos para cada categoría de uso constituye el aporte técnico más directo de esta investigación al conocimiento disponible sobre morteros con arenas recicladas en el contexto ecuatoriano. Al cuantificar esas dosificaciones y los porcentajes de sustitución asociados, el estudio proporciona criterios cuantitativos

directamente aplicables en la práctica constructiva, contribuyendo a cerrar la brecha entre la investigación experimental y la práctica de ingeniería en Ecuador.

1.10 Propiedades del mortero

1.10.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad es la propiedad del mortero en estado fresco que mayor influencia tiene sobre la facilidad de su colocación en obra (Figura 9), la calidad de las juntas formadas entre las unidades de mampostería y la adherencia que se desarrolla entre el mortero y las superficies de contacto. Un mortero con buena trabajabilidad puede distribuirse uniformemente sobre las superficies de los bloques o ladrillos, rellenando las irregularidades del sustrato y garantizando un contacto completo entre el mortero y las unidades en toda el área de la junta. Cuando la trabajabilidad es insuficiente, el mortero no llena adecuadamente los espacios disponibles, lo que genera juntas con vacíos que reducen la adherencia y comprometen la resistencia del sistema de mampostería.

La relación entre la trabajabilidad y el contenido de agua es directamente proporcional: un mayor contenido de agua reduce la viscosidad de la pasta de cemento y aumenta la lubricación entre las partículas de arena, facilitando el flujo del material y mejorando su capacidad de llenar los espacios disponibles. Sin embargo, el exceso de agua tiene un costo significativo en términos de resistencia, ya que el agua que no es consumida por las reacciones de hidratación del cemento genera vacíos al evaporarse del mortero durante el proceso de secado, vacíos que debilitan la microestructura y reducen la resistencia del material endurecido (Kurda et al., 2019).

Esa relación inversa entre trabajabilidad y resistencia es el principal desafío en el diseño de mezclas de mortero: la misma acción que mejora la facilidad de colocación añadir más agua; deteriora la propiedad más importante del material endurecido. Por eso, el objetivo del diseño de mezclas no es maximizar la trabajabilidad ni maximizar la resistencia por separado, sino encontrar el punto de equilibrio que satisfaga simultáneamente los requisitos de trabajabilidad para la colocación en obra y los requisitos de resistencia para el desempeño estructural del sistema. En morteros con arena reciclada, ese equilibrio es más difícil de alcanzar porque la arena demanda más agua para llegar a la misma trabajabilidad que la arena natural.

La granulometría de la arena incide de manera significativa sobre la trabajabilidad del mortero porque las partículas de menor tamaño presentan mayor superficie específica y requieren más pasta de cemento para ser adecuadamente lubricadas y envueltas en la mezcla. En morteros con arena reciclada, la mayor proporción de partículas finas que resulta del proceso de trituración incrementa la demanda de pasta de cemento y de agua para alcanzar una consistencia comparable a la del mortero convencional elaborado con arena natural, lo que se suma al efecto de la mayor absorción de la arena reciclada para aumentar la demanda total de agua de la mezcla.

La textura rugosa y la forma angular de las partículas de arena reciclada incrementan la fricción interna de la mezcla, reduciendo su fluidez respecto a un mortero elaborado con arena natural de morfología más redondeada y superficie más lisa (Martínez-García et al., 2020). Este efecto es particularmente pronunciado en arenas obtenidos mediante trituración mecánica de escombros, donde el proceso de fragmentación genera partículas con bordes cortantes y superficies irregulares que dificultan el deslizamiento relativo entre partículas durante la colocación y el compactado del mortero.

La norma ASTM C1437 (2022) establece el procedimiento para la evaluación de la trabajabilidad del mortero mediante el ensayo de flujo en mesa, que mide el porcentaje de expansión de una muestra de mortero colocada en un molde troncocónico sobre la superficie de la mesa de flujo, tras la aplicación de 25 golpes controlados en 15 segundos. El valor de flujo obtenido es un número adimensional que representa el porcentaje de aumento del diámetro de la muestra respecto al diámetro original del molde, y proporciona un indicador cuantificable y reproducible de la consistencia que permite comparar objetivamente la trabajabilidad de distintas dosificaciones evaluadas en diferentes momentos o en diferentes laboratorios.

El ajuste del contenido de agua de la mezcla para mantener un valor de flujo de referencia constante en todas las dosificaciones evaluadas es una estrategia metodológica que cumple una función clave en el diseño experimental: al garantizar que todas las mezclas se elaboren bajo las mismas condiciones de consistencia, permite aislar el efecto de la arena reciclada sobre la resistencia del efecto de las variaciones en la trabajabilidad, eliminando la consistencia como variable de confusión. Sin este control, parte de las diferencias de resistencia observadas entre dosificaciones podría atribuirse a diferencias en la trabajabilidad

y no al efecto específico de la arena reciclada, lo que oscurecería la relación entre el porcentaje de sustitución y el comportamiento mecánico del mortero.



Figura 9. Trabajabilidad en Morteros.

Fuente: (360 en Concreto,2022)

1.10.2 Retención de agua

La retención de agua es la capacidad del mortero en estado fresco para conservar el agua de la mezcla sin que sea absorbida rápidamente por los sustratos porosos sobre los que se aplica, garantizando que el cemento disponga de la humedad suficiente para completar su proceso de hidratación y desarrollar la resistencia que le corresponde. Esta propiedad es especialmente crítica en morteros aplicados sobre bloques de concreto o ladrillos de arcilla con alta capacidad de absorción, donde la extracción rápida de agua puede generar una hidratación incompleta del cemento en la zona interfacial, debilitando la adherencia entre el mortero y las unidades de mampostería.

La retención de agua depende fundamentalmente de la presencia de partículas finas en la mezcla, tanto del cemento como de las fracciones más pequeñas de la arena, que aumentan la superficie específica total del sistema y retienen el agua por mecanismos de adsorción superficial. Los morteros con mayor contenido de finos presentan generalmente mejor retención de agua porque la mayor superficie de adsorción disponible dificulta el movimiento del agua hacia el sustrato, aunque al mismo tiempo esos morteros requieren mayor cantidad de agua para alcanzar una consistencia dada por las mismas razones (Fonseca et al., 2017).

En morteros con arena reciclada, la mayor proporción de partículas finas derivadas del proceso de trituración puede mejorar la retención de agua respecto al mortero convencional, al aumentar la superficie específica disponible para la adsorción del agua. Sin embargo, la mayor absorción interna de la arena reciclada actúa en sentido contrario, reduciendo la cantidad de agua libre disponible para la hidratación del cemento al absorber parte del agua de la mezcla en sus poros internos durante el proceso de elaboración. El balance entre esos dos efectos opuestos: mayor adsorción superficial que mejora la retención versus mayor absorción interna que consume agua disponible, determina el comportamiento neto del mortero en términos de retención de agua, y ese balance varía según las características específicas de la arena reciclada y el porcentaje de sustitución empleado.

La evaluación de la retención de agua en la presente investigación se realiza de manera indirecta, a través del análisis de la consistencia del mortero medida mediante el ensayo de flujo y de los datos de absorción de las arenas obtenidas durante la caracterización de los materiales. Esta aproximación indirecta proporciona información útil para interpretar el comportamiento del mortero en condiciones reales de obra, donde el tiempo disponible para la colocación del material es limitado y una pérdida rápida de trabajabilidad por absorción del sustrato puede generar problemas de calidad en la junta.

El uso de aditivos retenedores de agua en morteros aplicados sobre sustratos de alta absorción o en condiciones ambientales de baja humedad relativa puede garantizar que el cemento disponga de la humedad necesaria para completar su hidratación y desarrollar la resistencia de diseño (Pereira et al., 2020). Estos aditivos actúan aumentando la viscosidad de la fase acuosa de la mezcla y reduciendo la movilidad del agua, retardando tanto su absorción por los sustratos como su evaporación al ambiente. Sin embargo, su uso introduce un costo adicional que debe considerarse en el análisis de viabilidad económica del mortero con arena reciclada.

1.10.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es el principal parámetro de evaluación del desempeño mecánico de los morteros de pega, pues determina directamente su capacidad para soportar las cargas transmitidas por las unidades de mampostería y para resistir los esfuerzos generados por acciones sísmicas y gravitacionales que actúan sobre el sistema constructivo. Su medición mediante ensayos normalizados sobre probetas de geometría estandarizada proporciona un valor cuantificable, reproducible y comparable con los requisitos mínimos

establecidos por la normativa técnica, lo que la convierte en el criterio de evaluación más utilizado en estudios de caracterización y comparación de morteros.

La resistencia del mortero es el resultado de la interacción entre la resistencia de la pasta de cemento hidratada, la resistencia de las arenas y la calidad de la zona de transición interfacial entre ambas fases (Figura 10). La pasta de cemento hidratada, compuesta principalmente por silicatos de calcio hidratados (C-S-H) y otros productos de la reacción de hidratación del cemento, es el componente que aporta la mayor parte de la resistencia total del sistema, mientras que las arenas actúan como elementos de relleno resistente que pueden contribuir o limitar la resistencia global del mortero dependiendo de sus propiedades físicas y de la calidad de su interfaz con la pasta (Nedeljković et al., 2021).

La resistencia del mortero aumenta con el tiempo de curado, siguiendo una curva de desarrollo que presenta crecimiento rápido durante los primeros siete días, una tasa de crecimiento moderada entre los siete y los veintiocho días, y una reducción progresiva de esa tasa a edades más avanzadas a medida que la hidratación del cemento avanza hacia su completitud. Los valores de resistencia a los 7 días se utilizan como indicadores tempranos del potencial de resistencia que permite verificar el proceso experimental sin esperar hasta la edad de referencia, mientras que los valores a los 28 días constituyen la resistencia de referencia establecida en la mayoría de las normas técnicas para clasificar, comparar y aceptar los morteros según sus propiedades mecánicas.

La zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y la arena es generalmente el punto de inicio de la falla en los morteros sometidos a carga compresiva, ya que su mayor porosidad respecto al resto de la pasta la convierte en la región donde se concentran los esfuerzos bajo carga y donde se inicia la propagación de las microfisuras que eventualmente conducen a la rotura del material. En morteros con arena reciclada, la presencia de mortero antiguo adherido a las partículas genera una segunda zona de transición interfacial entre el mortero viejo y el nuevo, que añade un nivel adicional de heterogeneidad y potencial debilidad a la microestructura del material endurecido (Zhao et al., 2021).

La influencia de la relación agua-cemento sobre la resistencia del mortero se manifiesta con especial claridad en mezclas con arena reciclada, donde el incremento en el contenido de agua necesario para mantener la consistencia de referencia genera un aumento de la relación agua-cemento efectiva que se traduce directamente en mayor porosidad de la pasta de cemento hidratada y menor resistencia del mortero endurecido. La cuantificación

de la relación entre el porcentaje de arena reciclada, el incremento en la demanda de agua y la reducción de la resistencia resultante es uno de los objetivos centrales del análisis de resultados de esta investigación (Coppola et al., 2020).

Los resultados de resistencia obtenidos para cada dosificación se comparan con los valores mínimos establecidos por la norma NTE INEN 1855, lo que permite determinar cuáles dosificaciones con arena reciclada cumplen los requisitos normativos y pueden ser recomendadas para su uso en aplicaciones constructivas convencionales de mampostería en Ecuador. Esta comparación directa con los límites normativos es la forma más práctica de traducir los resultados experimentales en recomendaciones aplicables para los profesionales de la construcción que trabajan bajo ese marco normativo.



Figura 10. Resistencia a la compresión en Morteros.

Fuente: (Laboratorio CITEMAC, 2024)

1.10.4 Durabilidad

La durabilidad del mortero hace referencia a su capacidad para resistir los mecanismos de deterioro físico y químico a los que está expuesto durante su vida útil en servicio, manteniendo sus propiedades mecánicas y funcionales dentro de rangos aceptables sin requerir intervenciones de mantenimiento frecuentes ni costosas (Figura 11). Esta propiedad depende fundamentalmente de la porosidad y permeabilidad del material, que determinan la facilidad con que los agentes agresivos del ambiente agua líquida, vapor de agua, iones cloruro y sulfato, dióxido de carbono; pueden penetrar en la masa del mortero y desencadenar los mecanismos de deterioro.

Los principales mecanismos de deterioro del mortero son la carbonatación de los productos de hidratación del cemento, la penetración de iones cloruro que puede desencadenar corrosión de armaduras en mampostería armada, y la acción de los sulfatos disueltos en el agua que generan reacciones expansivas dentro del material, todos ellos facilitados por una mayor porosidad y permeabilidad del mortero endurecido (Kurda et al., 2019). La carbonatación reduce el pH del mortero de manera progresiva desde la superficie hacia el interior, eliminando la protección alcalina que el cemento proporciona a las armaduras en estructuras de mampostería armada. El ataque por sulfatos genera expansiones internas que producen fisuras y desintegración progresiva del material.

En morteros con arena reciclada, la mayor porosidad derivada tanto de la arena como del posible incremento en la relación agua-cemento efectiva genera una estructura interna más permeable que favorece la penetración de agentes agresivos y puede acelerar los mecanismos de deterioro respecto a los morteros convencionales de referencia. Esta mayor susceptibilidad al deterioro puede traducirse en una vida útil reducida del sistema de mampostería, aspecto que debe considerarse al evaluar la viabilidad técnica integral de la arena reciclada y no solo su desempeño mecánico a los 28 días, que es solo uno de los múltiples indicadores de calidad relevantes.

Los ciclos de humedecimiento y secado a los que están expuestos los materiales de mampostería exterior generan esfuerzos internos derivados de los cambios volumétricos asociados a la absorción y desorción de agua. En morteros con alta capacidad de absorción, como los elaborados con arena reciclada, esos cambios volumétricos son mayores que en los morteros convencionales, lo que incrementa los esfuerzos de tracción generados durante los ciclos y puede originar fisuras por fatiga que se acumulan progresivamente y reducen la resistencia y la integridad del material con el tiempo. Este mecanismo de deterioro es especialmente relevante en el contexto climático ecuatoriano, donde la alternancia entre la estación seca y la estación lluviosa somete los materiales exteriores a ciclos repetidos de humedecimiento y secado a lo largo de toda su vida útil.

Mediante estrategias de optimización de la mezcla, como la reducción de la relación agua-cemento y el curado prolongado en agua, es posible mejorar la durabilidad de los morteros con arenas recicladas hasta niveles comparables con los de los morteros convencionales (Ossa-López et al., 2022). El curado prolongado favorece la hidratación del cemento en la zona de transición interfacial, reduciendo su porosidad y mejorando tanto la

resistencia mecánica como la resistencia al deterioro. Estudios con períodos de curado de hasta 90 días mostraron mejoras sustanciales en la densidad del material y en su resistencia a la penetración de agentes agresivos, aunque períodos de curado tan prolongados no son siempre factibles en condiciones de obra.



Figura 11. Durabilidad en Morteros.

Fuente: (Universidad de Burgos,2016)

1.11 Relación agua-cemento y su influencia en el mortero

La relación agua-cemento es, junto con la granulometría de la arena, el parámetro de diseño de mayor impacto sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros de cemento hidráulico. Su influencia se manifiesta principalmente a través de su efecto sobre la porosidad de la pasta de cemento hidratada: cuando aumenta la relación agua-cemento, aumenta la cantidad de agua libre en la mezcla que no es consumida por las reacciones de hidratación del cemento; esa agua libre genera vacíos capilares al evaporarse del material endurecido, debilitando la microestructura y reduciendo tanto la resistencia como la durabilidad del mortero.

Investigadores especializados en materiales cementantes establecen que la relación agua-cemento controla el grado de hidratación del cemento y la porosidad de la pasta resultante, siendo el factor determinante de la resistencia y la durabilidad del mortero endurecido (Zhao et al., 2021). Para una relación agua-cemento dada, la resistencia puede modularse en función del grado de curado y de la calidad de los materiales empleados, pero la relación fundamental entre la porosidad del material endurecido y la relación agua-

cemento de diseño se mantiene como el principio rector del proceso de diseño de mezclas de mortero y hormigón.

En la práctica del diseño de mezclas, la relación agua-cemento opera como una variable de compromiso entre trabajabilidad y resistencia. Incrementarla mejora la fluidez del mortero fresco y facilita su colocación, pero reduce la resistencia del material endurecido; reducirla mejora la resistencia, pero deteriora la trabajabilidad. Encontrar el valor óptimo de esa relación para una aplicación específica requiere considerar simultáneamente los requisitos de trabajabilidad para la puesta en obra y los requisitos de resistencia para el desempeño estructural, lo que generalmente implica una iteración de prueba y error con las proporciones de diseño hasta alcanzar el balance deseado.

La distinción entre la relación agua-cemento total y la relación agua-cemento efectiva es especialmente relevante en morteros con arenas recicladas, donde la mayor absorción del material reciclado modifica de manera significativa la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento. En mezclas con arena natural de baja absorción, la diferencia entre ambas relaciones es despreciable porque la arena absorbe muy poca agua de la mezcla; sin embargo, en morteros con arena reciclada, esa diferencia puede ser suficientemente grande como para generar una sobreestimación importante de la resistencia esperada si el diseño de la mezcla se basa en la relación agua-cemento total sin considerar la absorción de la arena reciclada.

El prehumedecimiento de la arena reciclada hasta su condición de saturación superficialmente seca (SSS) antes del mezclado es una estrategia eficaz para reducir la diferencia entre la relación agua-cemento total y la efectiva, ya que al estar el arena previamente saturado no absorbe agua adicional de la mezcla durante la elaboración del mortero. Esta condición puede alcanzarse sumergiendo la arena en agua durante un período suficiente para saturar sus poros y luego dejándolo escurrir sobre una superficie permeable hasta que no haya agua libre visible en la superficie de las partículas (Ossa-López et al., 2022). En esta investigación, la arena reciclada fue utilizado en condición de absorción natural sin prehumedecimiento previo.

Estudios recientes documentaron que la variación en la relación agua-cemento efectiva generada por la absorción de la arena reciclada es uno de los principales factores que explican la reducción de resistencia observada en morteros con altos porcentajes de sustitución, y que el control de ese parámetro mediante el prehumedecimiento de la arena

puede mejorar significativamente el desempeño mecánico del mortero sin necesidad de cambiar las proporciones de la mezcla (Bravo et al., 2021). Los datos de esos estudios mostraron que morteros elaborados con arena reciclada sin control de la absorción presentaron resistencias hasta un 20 % inferiores a las de morteros preparados con ajuste cuidadoso de la relación agua-cemento efectiva mediante prehumedecimiento de la arena antes del mezclado.

1.12 Morteros con agregados reciclados

El uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en la elaboración de morteros ha sido objeto de investigación científica sostenida durante los últimos quince años, motivado por la necesidad de reducir la explotación de arenas naturales y por el interés creciente en transformar los residuos de construcción en recursos productivos dentro de una visión de economía circular aplicada al sector de la edificación. Los estudios realizados en diferentes contextos geográficos han documentado el potencial técnico de la arena reciclada como sustituto parcial de la arena natural en morteros, aunque los resultados son variables y dependen en gran medida de las características específicas del material reciclado disponible en cada contexto y de las metodologías de ensayo empleadas.

Investigadores europeos evaluaron el desempeño mecánico de morteros de mampostería elaborados con arenas recicladas finas y documentaron que porcentajes de sustitución de hasta el 50 % permiten mantener resistencias dentro de los rangos normativos para morteros de uso general, siempre que se ajuste la dosificación para compensar la mayor absorción de la arena reciclada y se garantice una relación agua-cemento efectiva adecuada (Bravo et al., 2021). Sus resultados mostraron una tendencia de disminución progresiva de la resistencia con el aumento del porcentaje de sustitución, con pérdidas de hasta el 25 % respecto al mortero de referencia en la dosificación con 100 % de arena reciclada, una magnitud que si bien es significativa no compromete necesariamente el cumplimiento normativo en dosificaciones enriquecidas en cemento.

Las variaciones en las propiedades del mortero asociadas al uso de arena reciclada se originan principalmente en las diferencias físicas y químicas entre la arena reciclada y el natural. La arena reciclada presenta mayor porosidad interna, mayor absorción de agua, menor gravedad específica y mayor variabilidad en sus propiedades en comparación con las arenas naturales de origen geológico, factores que modifican tanto el comportamiento de la

mezcla en estado fresco especialmente la trabajabilidad y la demanda de agua como las propiedades mecánicas del material en estado endurecido principalmente la resistencia y la durabilidad.

La mayor absorción de la arena reciclada es probablemente la propiedad que mayor impacto tiene sobre el comportamiento del mortero, porque modifica la relación agua-cemento efectiva si no se realiza el ajuste correspondiente en la dosificación. Esa mayor absorción es consecuencia directa de la red de poros internos que se desarrolla en la arena reciclada como resultado de la pasta de cemento y el mortero viejos adheridos a las partículas originales de arena durante los procesos de demolición y trituración, poros que en la arena natural no existen y que en la arena reciclada actúan como reservorios que absorben parte del agua de amasado antes de que pueda contribuir a la hidratación del cemento (Zhao et al., 2021).

Investigaciones recientes basadas en análisis de microscopía electrónica de barrido confirmaron que la zona de transición interfacial en materiales cementantes elaborados con arenas recicladas es significativamente más ancha y porosa que la correspondiente a las arenas naturales, lo que se traduce en una mayor concentración de tensiones en esa región bajo carga y en una mayor facilidad de propagación de microfisuras desde esa zona hacia el resto de la pasta de cemento (Nedeljković et al., 2021). El mortero viejo adherido a las partículas recicladas genera una segunda zona de transición entre ese mortero viejo y la nueva pasta de cemento, que añade un nivel adicional de heterogeneidad microestructural al material compuesto.

A pesar de los efectos negativos identificados sobre la resistencia y la durabilidad, la arena reciclada también presenta características que pueden ser favorables para el desempeño del mortero en ciertos aspectos, especialmente la textura rugosa de sus partículas, que puede mejorar la adherencia mecánica entre la arena y la nueva pasta de cemento al favorecer el anclaje físico en la interfaz (Figura 12). Esa rugosidad superficial puede compensar parcialmente el debilitamiento de la zona de transición interfacial generado por la mayor porosidad de la arena reciclada, lo que explicaría por qué en algunos estudios la reducción de resistencia es menor de lo que se esperaría solo en función de la porosidad del material (Martínez-García et al., 2020).

El análisis de la bibliografía disponible evidencia que los rangos de sustitución más frecuentemente recomendados en la literatura oscilan entre el 25 % y el 50 %, con resultados

técnicamente aceptables para la mayoría de las aplicaciones convencionales de mampostería dentro de ese rango. La convergencia de recomendaciones provenientes de estudios realizados en contextos geográficos y con materiales muy distintos sugiere que existe un comportamiento relativamente universal de la arena reciclada en morteros de cemento Portland que puede tomarse como referencia para el diseño de estudios locales, aunque siempre con la cautela de que las variaciones locales son reales y pueden modificar ese rango.



Figura 12. Morteros con agregados reciclados.

Fuente: Imagen generada con IA, ChatGPT.

1.13 Extracción de arenas y manejo de escombros

La extracción de arenas naturales para abastecer a la industria de la construcción genera impactos ambientales significativos cuando se realiza de manera intensiva y sin planes de manejo ambiental adecuados que mitiguen las consecuencias sobre el entorno natural de las canteras (Figura 13). Entre los principales efectos identificados en la literatura se encuentran la erosión y desestabilización de taludes en las zonas de cantera, la alteración de la dinámica fluvial en ríos y quebradas utilizadas como fuentes de material, y la destrucción de hábitats naturales con consecuencias negativas sobre la biodiversidad local que en muchos casos son difícilmente reversibles a corto y mediano plazo.

Estudios realizados en comunidades de América Latina han documentado que la explotación de arenas naturales genera no solo impactos ambientales directos sobre el entorno físico, sino también conflictos sociales vinculados a la ocupación del suelo, la afectación de fuentes de agua que abastecen a comunidades rurales y el deterioro del paisaje que incide sobre el valor de los predios y la calidad de vida de los residentes cercanos (Rondón-Quintana et al., 2019). Los actores de la industria extractiva y los de las comunidades afectadas frecuentemente presentan perspectivas contrapuestas sobre los beneficios económicos y los daños ambientales de la actividad, lo que dificulta la gobernanza ambiental del sector y genera conflictos que en algunos casos han llevado a la suspensión de operaciones.

La situación específica del Distrito Metropolitano de Quito refleja esa problemática con claridad: la extracción de arenas en canteras periurbanas como la de Pifo enfrenta la presión creciente del crecimiento acelerado de la ciudad, que incrementa la demanda de materiales de construcción al mismo tiempo que reduce la tolerancia de las comunidades vecinas a los impactos ambientales asociados a la actividad extractiva. La coexistencia cada vez más tensa entre zonas residenciales en expansión y áreas de extracción en la periferia genera presiones que apuntan hacia una reducción gradual de la actividad extractiva en esos sectores, lo que a mediano plazo puede traducirse en escasez de arenas o en un aumento significativo de los costos de transporte desde fuentes más alejadas.

La generación de residuos de construcción y demolición en Ecuador ha alcanzado proporciones que superan ampliamente la capacidad de los sistemas de gestión existentes, generando pasivos ambientales significativos en forma de botaderos informales distribuidos por toda el área metropolitana. El Ministerio del Ambiente del Ecuador (2021) estima que en Quito se generan decenas de miles de toneladas de residuos de construcción por año, de las cuales únicamente una fracción relativamente pequeña recibe tratamiento en instalaciones formales de reciclaje o disposición final adecuada, mientras el resto se acumula en sitios no habilitados que generan problemas de contaminación del suelo y del agua subterránea.



Figura 13. Extracción de Escombros.

Fuente: (Sitio web: *La obra productos*, 2021)

El aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición como fuente de arenas recicladas ofrece una solución simultánea a dos problemas que hoy se abordan por separado: la escasez progresiva de arenas naturales y la acumulación inmanejable de escombros. Las políticas europeas de gestión de residuos de construcción han establecido objetivos específicos y vinculantes de reciclaje para este tipo de residuos, generando lecciones y modelos de gestión que son aplicables, con las adaptaciones necesarias, al contexto latinoamericano en general y al ecuatoriano en particular (European Environment Agency, 2020).

La viabilidad económica de la producción de arenas recicladas a partir de escombros está condicionada por la relación entre el costo del procesamiento de los residuos que incluye transporte al sitio de trituración, trituración, clasificación y control de calidad y el precio de la arena natural en el mercado local (Figura 14). En Quito, donde la distancia creciente entre las canteras periféricas y los sitios de construcción en la ciudad densa eleva progresivamente los costos de transporte de la arena natural, la producción local de arena reciclada en plantas urbanas puede resultar económicamente competitiva, especialmente para proyectos de gran volumen que puedan beneficiarse de economías de escala en el procesamiento.

1.14 Sustitución parcial de arena por agregado reciclado

La estrategia de sustitución parcial de arena natural por arena reciclada en morteros representa un equilibrio técnico entre dos objetivos que están en tensión: maximizar el aprovechamiento del material reciclado para reducir los impactos ambientales de la

construcción, y conservar las propiedades mecánicas del mortero dentro de los rangos normativos que garantizan la seguridad y la calidad constructiva. A diferencia de la sustitución total, que en la mayoría de los estudios compromete de manera significativa la resistencia y la durabilidad del mortero hasta niveles inaceptables desde el punto de vista normativo, la sustitución parcial permite mantener las arenas naturales como fracción mayoritaria que garantiza la estabilidad microestructural del material endurecido mientras se aprovecha el potencial de la arena reciclada.

Se ha demostrado que el tratamiento previo de la arena reciclada mediante prehumedecimiento antes del mezclado reduce significativamente la variabilidad de los resultados de resistencia en morteros con este material, mejorando la reproducibilidad de las mezclas y facilitando el control de calidad durante la producción (Ossa-López et al., 2022). El prehumedecimiento de la arena hasta la condición de saturación superficialmente seca estabiliza la relación agua-cemento efectiva de la mezcla, eliminando las fluctuaciones en la resistencia que resultan de variaciones en el contenido de humedad inicial de la arena reciclada entre diferentes lotes de material. En esta investigación, la arena reciclada se usó sin prehumedecimiento, representando así el escenario de elaboración más simple y económico, y los resultados deben interpretarse en ese contexto.

La evaluación de porcentajes específicos de sustitución distribuidos a lo largo del rango completo del 0 % al 100 % permite trazar una curva del comportamiento del mortero en función del contenido de arena reciclada con suficiente resolución para identificar con precisión el umbral técnico a partir del cual la disminución de resistencia supera los límites normativos. Esa curva proporciona información considerablemente más completa que la ofrecida por estudios que evalúan únicamente dos o tres niveles de sustitución, porque permite ver la progresión continua del deterioro de la resistencia con el aumento de la arena reciclada en lugar de solo puntos aislados sin información sobre lo que ocurre entre ellos.

La viabilidad de la sustitución parcial no depende solo del porcentaje de sustitución, sino también de la dosificación de la mezcla y especialmente de la relación arena-cemento. En dosificaciones más ricas en cemento como la relación 1:3, los efectos negativos de la arena reciclada sobre la resistencia pueden ser parcialmente compensados por la mayor cantidad de pasta de cemento disponible para envolver las partículas y desarrollar la zona de transición interfacial (Coppola et al., 2020). Por eso, la resistencia del mortero con arena reciclada es generalmente mayor en dosificaciones con menor relación arena-cemento, y el

umbral de sustitución por encima del cual no se cumple con los requisitos normativos puede ser más alto en dosificaciones más ricas en cemento.

La selección de las dosificaciones 1:3 y 1:4 para la evaluación experimental responde a la necesidad de cubrir el rango de relaciones arena-cemento más frecuentemente empleadas en la elaboración de morteros de pega en la construcción convencional ecuatoriana. La evaluación de los cinco niveles de sustitución en ambas dosificaciones proporciona un conjunto de datos suficientemente amplio para identificar las interacciones entre el porcentaje de arena reciclada y la relación arena-cemento, información que permite hacer recomendaciones más precisas para diferentes contextos de aplicación.

El rango de sustitución por arena reciclada puede variar significativamente en función de las propiedades específicas de la arena empleada, lo que hace necesaria la validación experimental para cada fuente de material reciclado y cada contexto geográfico y normativo de aplicación. Los trabajos de revisión sistemática de la literatura señalaron que el rango de sustitución entre el 25 % y el 50 % es el que ofrece el mejor equilibrio entre el aprovechamiento de la arena reciclada y la conservación de las propiedades mecánicas del mortero, con resultados técnicamente aceptables en la mayoría de los contextos evaluados (Bravo et al., 2021).



Figura 14. Sustitución de arena por agregado reciclado.

Fuente: Imagen generada con IA, ChatGPT.

1.15 Efectos del agregado reciclado en las propiedades del mortero

La incorporación de arena reciclada en la mezcla de mortero genera modificaciones en sus propiedades físicas y mecánicas que responden a los cambios en la microestructura del material derivados de las diferencias entre la arena reciclada y el natural. Esos efectos,

que afectan tanto al mortero en estado fresco como al material endurecido, son consecuencia directa de la mayor porosidad, menor gravedad específica, mayor absorción, granulometría irregular y presencia de mortero viejo adherido que caracterizan a la arena reciclada en comparación con la arena natural de origen geológico, y se manifiestan de maneras predecibles una vez que se entienden los mecanismos físicos y químicos que los gobiernan.

La diferencia en absorción de agua y densidad real de los materiales generan modificaciones predecibles en el comportamiento del mortero que pueden anticiparse y gestionarse mediante el diseño apropiado de la mezcla. Investigaciones especializadas documentaron que las arenas recicladas provenientes de residuos de construcción presentan una densidad real entre un 5 % y un 15 % inferior a la de las arenas naturales equivalentes, una absorción de agua entre 2 y 5 veces superior a la de la arena natural y una mayor variabilidad entre lotes en sus propiedades, derivada de la heterogeneidad inherente de los residuos de origen que incluyen materiales de diferentes épocas de construcción, diferentes tipos de cemento y diferentes composiciones (Ulsen et al., 2019).

El efecto de la arena reciclada sobre la densidad del mortero endurecido se manifiesta como una reducción proporcional al porcentaje de sustitución y a la diferencia de densidad entre la arena reciclada y el natural. Esa reducción de densidad implica que el material endurecido tiene mayor volumen de vacíos internos por unidad de volumen que el mortero convencional de referencia, lo que se traduce tanto en menor resistencia mecánica porque hay menos material sólido por unidad de área transversal resistente como en mayor susceptibilidad a la penetración de agua y agentes agresivos que pueden desencadenar mecanismos de deterioro.

La mayor absorción de la arena reciclada afecta el comportamiento del mortero tanto en estado fresco como en estado endurecido a través de mecanismos distintos en cada caso. En estado fresco, la absorción de la arena durante el proceso de mezclado reduce la cantidad de agua libre disponible para lubricar la mezcla y asegurar la hidratación del cemento, disminuyendo la trabajabilidad del mortero y obligando a incrementar el contenido total de agua para mantener la consistencia de referencia. En estado endurecido, la mayor porosidad interna de la arena reciclada aumenta la absorción total del mortero y su permeabilidad, reduciendo la resistencia a la penetración de agentes agresivos (Kurda et al., 2019).

La textura rugosa de las partículas de arena reciclada tiene efectos simultáneos y opuestos sobre distintas propiedades del mortero, lo que crea una complejidad adicional en

la interpretación de los resultados experimentales. Por un lado, la mayor rugosidad reduce la trabajabilidad al incrementar la fricción interna entre partículas y dificultar el flujo de la mezcla; por otro, puede mejorar la adherencia mecánica entre la arena y la nueva pasta de cemento al proporcionar mayor área de anclaje físico en la zona de transición interfacial. Ese segundo efecto puede compensar parcialmente el debilitamiento de esa zona generado por la mayor porosidad de la arena reciclada, lo que explica por qué en algunos estudios las reducciones de resistencia son menores de lo esperado (Martínez-García et al., 2020).

La granulometría irregular de la arena reciclada, caracterizada por una mayor proporción de partículas finas respecto al arena natural como resultado del proceso de trituración mecánica de los escombros, incrementa la demanda de pasta de cemento necesaria para recubrir adecuadamente todas las partículas y llenar los vacíos entre ellas. Ese efecto se suma al de la mayor absorción de la arena reciclada para incrementar la demanda efectiva de agua de la mezcla, lo que contribuye al aumento de la relación agua-cemento y a la reducción de la resistencia del mortero endurecido, generando un efecto sinérgico entre las distintas características desfavorables de la arena reciclada.

1.16 Análisis de la durabilidad en morteros con agregados reciclados

La durabilidad de los morteros con arenas recicladas es un aspecto de evaluación técnica igualmente relevante que la resistencia a la compresión, ya que determina la vida útil efectiva del material en condiciones reales de exposición ambiental a lo largo del tiempo. La mayor porosidad que caracteriza a estos morteros respecto a los convencionales genera una mayor susceptibilidad a los mecanismos de deterioro por penetración de agua y agentes agresivos, lo que puede comprometer la durabilidad del sistema de mampostería independientemente del cumplimiento de los requisitos mínimos de resistencia a los 28 días que exige la normativa técnica.

La durabilidad del mortero endurecido depende fundamentalmente de su permeabilidad al agua, la cual está controlada por la conectividad de la red de poros capilares que se desarrolla en la pasta de cemento hidratada durante el proceso de endurecimiento. Una mayor relación agua-cemento genera una red de poros más extensa y mejor comunicada, que facilita el transporte de agua líquida y de los agentes agresivos disueltos en ella hacia el interior del material. En morteros con arena reciclada, el incremento en la relación agua-cemento efectiva que resulta de la mayor absorción del material se traduce en mayor

permeabilidad del mortero endurecido, que puede comprometer su durabilidad a largo plazo (Nedeljković et al., 2021).

El proceso de carbonatación avanza de manera más rápida en morteros con mayor porosidad, porque la mayor conectividad de la red porosa facilita la difusión del dióxido de carbono desde el ambiente hacia el interior del material a través de los poros llenos de humedad. A medida que el frente de carbonatación avanza hacia el interior, el pH del mortero en esa región se reduce progresivamente, eliminando la protección alcalina que el cemento hidratado proporciona a las armaduras embebidas en morteros de mampostería armada y exponiendo al acero a las condiciones que pueden desencadenar la corrosión.

Los ciclos de humedecimiento y secado generan esfuerzos internos derivados de los cambios volumétricos asociados a la absorción de agua durante la estación lluviosa y a la desorción durante la estación seca. En morteros con alta capacidad de absorción, como los elaborados con arena reciclada, esas variaciones volumétricas son mayores que en los morteros convencionales, lo que incrementa los esfuerzos de tracción generados en el interior del material durante los ciclos y puede originar fisuras por fatiga que se acumulan con cada ciclo y reducen progresivamente la resistencia e integridad del material. En el contexto climático de la región andina ecuatoriana, con estaciones secas y lluviosas relativamente bien definidas, ese mecanismo de deterioro es una consideración relevante para el diseño de mampostería exterior.

Mediante estrategias de optimización de la dosificación, como el curado prolongado en agua durante períodos superiores a los 28 días estándar, es posible mejorar significativamente la microestructura de la zona de transición interfacial en morteros con arena reciclada, reduciendo su porosidad y mejorando la resistencia al deterioro por penetración de agentes agresivos (Ossa-López et al., 2022). El curado prolongado favorece la continuación de las reacciones de hidratación del cemento durante períodos más largos, densificando la microestructura del material especialmente en las zonas interfaciales donde la porosidad es mayor. Estudios con períodos de curado de hasta 90 días documentaron mejoras sustanciales en la densidad y la impermeabilidad del material.

La evaluación de la durabilidad potencial de los morteros con arena reciclada en esta investigación se realiza a través de la determinación de la absorción de agua conforme a la norma ASTM C642 (2021), que establece el procedimiento para medir la densidad, la absorción y el porcentaje de vacíos en materiales de cemento endurecidos mediante la

comparación de la masa seca con la masa saturada en agua. Esa medición proporciona un indicador cuantitativo de la porosidad accesible al agua del material endurecido, que puede correlacionarse con su susceptibilidad a los mecanismos de deterioro por penetración de agua y agentes Normativas aplicables a morteros

1.16.1 Normativas ASTM aplicadas a morteros

Las normas técnicas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) constituyen el referente internacional más ampliamente adoptado para la evaluación de materiales de construcción en general, y de morteros y arenas para morteros en particular. Su aplicación en esta investigación garantiza que los procedimientos de ensayo empleados estén alineados con los estándares internacionales más reconocidos, lo que permite comparar los resultados con los de investigaciones previas realizadas en distintos contextos geográficos y proporciona una base sólida para la revisión por pares y la validación externa de los hallazgos del estudio.

La ASTM C109/C109M edición 2023 es la norma central de este estudio porque regula el ensayo que produce el dato principal: la resistencia a compresión del mortero. Prescribe el uso de moldes cúbicos de acero de 50 mm por lado, el mezclado mecánico según la ASTM C305, las condiciones de inmersión en agua durante el curado y la velocidad de carga en la prensa. Sus criterios de aceptación estadística son también los que se usan para verificar si la dispersión de resultados dentro de cada grupo de probetas está dentro de rangos tolerables.

La misma norma fija un umbral de dispersión que los resultados deben respetar: el coeficiente de variación entre probetas de un mismo lote, cuando el ensayo lo realiza un único operador en un único laboratorio con los mismos materiales, no debe superar el 8,7 %. Por encima de ese límite, la variabilidad ya no puede atribuirse al ruido natural del proceso, sino que indica posibles inconsistencias en la preparación o en el ensayo de las muestras.

La norma ASTM C1437 (2022) define el procedimiento para evaluar la consistencia del mortero en estado fresco mediante el ensayo de flujo en mesa. Su aplicación sistemática como herramienta de control de la trabajabilidad en la presente investigación es una condición necesaria para la validez de las comparaciones de resistencia entre las diferentes mezclas evaluadas, porque garantiza que todas las dosificaciones se elaboren bajo

condiciones de consistencia comparables, eliminando la trabajabilidad como fuente de variación espuria en los resultados de resistencia.

La norma ASTM C128 (2023) establece el procedimiento para determinar la densidad relativa y la absorción de las arenas finas, parámetros fundamentales para el diseño de mezclas de mortero con arena reciclada. La gravedad específica determina las proporciones volumétricas de cada componente en la mezcla y es necesaria para garantizar que la sustitución de la arena natural por arena reciclada se realice sobre una base volumétrica consistente; la absorción define la cantidad de agua que la arena puede absorber de la mezcla durante el proceso de elaboración y es necesaria para calcular la relación agua-cemento efectiva de cada dosificación.

La norma ASTM C642 (2021) establece los procedimientos para determinar la densidad, la absorción y el porcentaje de vacíos en materiales de cemento endurecidos, parámetros que proporcionan información cuantitativa sobre la porosidad del mortero endurecido y su susceptibilidad al deterioro por penetración de agua y agentes agresivos. La determinación de esos parámetros complementa los datos de resistencia a la compresión con información sobre la durabilidad potencial de cada dosificación, proporcionando una caracterización más completa del desempeño del mortero con arena reciclada.

1.16.2 Normativas INEN aplicables en Ecuador

Las normas técnicas ecuatorianas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) constituyen el marco regulatorio nacional para la evaluación de materiales de construcción en el país. Su aplicación en la presente investigación garantiza que los criterios de aceptación de los materiales y los resultados de los ensayos sean interpretados conforme a los estándares nacionales vigentes, lo que da validez práctica a las conclusiones del estudio en el contexto del sector de la construcción ecuatoriano y facilita la comunicación de los hallazgos a profesionales que trabajan bajo ese marco normativo.

La norma NTE INEN 872 establece los requisitos que deben cumplir las arenas utilizadas en la elaboración de morteros y hormigones en Ecuador, incluyendo los criterios de gradación granulométrica, contenido máximo de material fino que pasa el tamiz N° 200, forma de las partículas, contenido de cloruros y sulfatos y otras propiedades físicas y químicas que afectan el comportamiento del material en las mezclas. Su aplicación en la caracterización de las arenas de esta investigación garantiza que las comparaciones entre la

arena natural y la arena reciclada se realicen sobre una base normativa reconocida a nivel nacional.

La NTE INEN 488 es el referente nacional que regula el mismo tipo de ensayo que la ASTM C109/C109M: resistencia a compresión sobre cubos de 50 mm de arista. Su adopción como norma principal del estudio permite comparar directamente los valores obtenidos con los límites normativos ecuatorianos sin necesidad de ajustes o factores de conversión que añadirían incertidumbre a las conclusiones.

La norma NTE INEN 1855 establece los requisitos de resistencia a la compresión y demás propiedades que deben cumplir los morteros utilizados en sistemas de mampostería en Ecuador, definiendo las categorías de clasificación del mortero según su resistencia mínima a los 28 días. Los valores de resistencia obtenidos para cada dosificación se comparan con los límites establecidos en esta norma para determinar cuáles dosificaciones con arena reciclada cumplen con las condiciones mínimas de desempeño mecánico requeridas para su uso en construcciones de mampostería en el país.

La aplicación combinada de las normas NTE INEN 872, NTE INEN 488 y NTE INEN 1855 proporciona un marco normativo integral que cubre desde la caracterización de los materiales de entrada hasta la evaluación del producto final, garantizando que todo el proceso experimental esté referenciado a los estándares nacionales vigentes. Esa coherencia normativa les da a los resultados del estudio una validez práctica directa en el contexto constructivo ecuatoriano que no tendría si se emplearan únicamente normas internacionales.

Las normas INEN y las normas ASTM cumplen roles complementarios en el marco de referencia de esta investigación: las normas ecuatorianas establecen los requisitos de aceptación aplicables en el contexto nacional y definen los criterios con los que se evalúa la viabilidad de cada dosificación; las normas ASTM proporcionan los procedimientos de ensayo internacionalmente reconocidos que garantizan la reproducibilidad de los resultados y su comparabilidad con los de la literatura internacional. Esa articulación entre ambos marcos normativos permite interpretar los resultados tanto en el contexto local para comunicarlos a profesionales de la construcción en Ecuador como en el contexto internacional para contribuir al cuerpo de conocimiento global sobre morteros con arenas recicladas.

CAPÍTULO 3

PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

3.1 Introducción del capítulo

En este capítulo se muestran, procesan e interpretan los resultados obtenidos en las pruebas con morteros en los que se ha sustituido parcialmente arena natural de Pifo por arena reciclada. Se procesan los resultados de las dosificaciones 1:3 y 1:4, así como los porcentajes de sustitución 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, para determinar la influencia que la arena reciclada tiene sobre el comportamiento físico, mecánico y económico del mortero.

Se inicia el desarrollo con la descripción de los agregados finos a través de los resultados de los ensayos de densidad relativa, absorción, granularidad y de peso unitario suelto, y que permiten comparar las propiedades de la arena natural y la arena reciclada, y constituyen el punto de partida para interpretar posteriormente la trabajabilidad y la resistencia de las distintas mezclas. La distribución granulométrica se muestra a partir de las curvas comparativas y las propiedades físicas se presentan en forma de tablas resumen.

A continuación, se ponen de manifiesto los resultados del mortero en estado fresco a partir del ensayo de flujo, que tiene como objetivo determinar la consistencia alcanzada por las mezclas en función del contenido de arena reciclada incluida en la fórmula, los cuales se acompañan con tablas comparativas y gráficos de barras, lo que facilita observar las variaciones de la propiedad de trabajabilidad de las distintas dosificaciones.

Por último, se lleva a cabo el análisis de la resistencia a compresión de los morteros en estado endurecido. Para ello, se exponen los resultados individuales de las probetas, las medias de las mezclas, los datos estadísticos básicos, al igual que la comparación entre las 2 dosificaciones 1:3 y 1:4. A continuación, se complementa el análisis con el control del cumplimiento normativo y con la evaluación de costos, con la intención de determinar la dosificación que sea la mejor en relación resistencia, cumplimiento técnico y viabilidad económica.

3.2 Diseño experimental y codificación de mezclas

El diseño experimental se estructuró a partir de dos relaciones cemento: arena, correspondientes a las dosificaciones 1:3 y 1:4. Para cada dosificación se consideraron cinco

niveles de sustitución de arena natural por arena reciclada: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Esta organización permitió evaluar el efecto progresivo de la arena reciclada sobre el comportamiento del mortero, manteniendo como referencia una mezcla patrón elaborada únicamente con arena natural.

Las combinaciones experimentales se organizaron mediante una codificación técnica que identifica la dosificación y el porcentaje de arena reciclada incorporado en cada mezcla. En la Tabla 1 se presenta la matriz de codificación empleada para ordenar los resultados de flujo, densidad, carga máxima y resistencia a compresión.

Tabla 1. Codificación de mezclas de mortero según dosificación y % de sustitución

Dosificación cemento:arena	Arena		Descripción de la mezcla
	Natural (%)	Reciclada (%)	
1:3	100	0	Mortero patrón 1:3 con 100% arena natural
1:3	75	25	Mortero 1:3 con 25 % de arena reciclada
1:3	50	50	Mortero 1:3 con 50 % de arena reciclada
1:3	25	75	Mortero 1:3 con 75 % de arena reciclada
1:3	0	100	Mortero 1:3 con 100 % de arena reciclada
1:4	100	0	Mortero patrón 1:4 con 100% arena natural
1:4	75	25	Mortero 1:4 con 25 % de arena reciclada
1:4	50	50	Mortero 1:4 con 50 % de arena reciclada
1:4	25	75	Mortero 1:4 con 75 % de arena reciclada
1:4	0	100	Mortero 1:4 con 100 % de arena reciclada

Fuente: (Defaz & Pacheco, 2026)

La Tabla 2 resume los factores considerados en el diseño experimental. Esta matriz muestra que el estudio no solo compara dos dosificaciones, sino también distintos porcentajes de arena reciclada y dos edades de ensayo, lo que permite analizar el comportamiento inicial y final de los morteros evaluados.

Tabla 2. Matriz general del diseño experimental

Factor experimental	Niveles considerados
Dosificación cemento: arena	1:3 y 1:4
Sustitución de arena reciclada	0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100%
Edad de ensayo	7 y 28 días
Tipo de agregado fino	Arena natural y arena reciclada
Réplicas	3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

A partir de esta matriz, los resultados se analizaron en tres niveles. En primer lugar, cada mezcla con arena reciclada se comparó con su mortero patrón correspondiente. En segundo lugar, se evaluó el efecto del incremento progresivo de arena reciclada dentro de una misma dosificación. Finalmente, se compararon las dosificaciones 1:3 y 1:4, con el fin de identificar si el mayor o menor contenido de cemento influye en la resistencia final del mortero.

Tabla 3. Normativas aplicadas para cada ensayo.

Ensayo	Norma aplicada	Edición	Aplicación
Granulometría del agregado fino	ASTM C136/C136M	2014	Determinación de la distribución del tamaño de las partículas del agregado mediante tamizado.
Densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino	ASTM C128	2015	Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino.
Masa unitaria y porcentaje de vacíos	ASTM C29/C29M	2023	Determinación de la masa unitaria del agregado, tanto en condición suelta como

			compactada, y cálculo de los vacíos.
Ensayo de flujo del mortero	ASTM C1437	2020	Determinación del flujo del mortero de cemento hidráulico para evaluar su trabajabilidad.
Fabricación y resistencia a compresión de morteros	ASTM C109/C109M	2024	Elaboración de especímenes cúbicos de 50 mm y determinación de la resistencia a compresión del mortero.
Requisitos de agregados para hormigón	NTE INEN 872	—	Verificación de los requisitos aplicables al agregado utilizado en la elaboración de las mezclas.
Requisitos relacionados con cemento/morteros	NTE INEN 488	—	Aplicación de los requisitos establecidos por la normativa ecuatoriana correspondiente a los materiales empleados.

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

3.3 Caracterización física de los agregados finos

La caracterización física de los agregados finos permitió identificar las principales diferencias entre la arena natural y la arena reciclada utilizada como material de sustitución. Para ello, se evaluaron propiedades como la densidad relativa, la absorción de agua, la granulometría y el peso unitario, debido a que estos parámetros influyen directamente en la trabajabilidad, la demanda de agua, la compactación y la resistencia final del mortero.

Los ensayos de densidad relativa y absorción se realizaron conforme a la ASTM C128 y la NTE INEN 856, mientras que el análisis granulométrico se desarrolló mediante la serie de tamices para agregado fino. Los resultados se presentan en tablas comparativas y figuras, con el propósito de evaluar si ambos materiales presentan condiciones adecuadas para su incorporación en morteros de pega.

3.3.1 Densidad relativa y absorción

La densidad relativa y la capacidad de absorción de agua ofrecen información sobre el comportamiento físico del agregado en el momento del contacto con el agua. Estos parámetros son importantes al tratar de morteros, ya que determinarán la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento y la consistencia de la mezcla. En la Tabla 3 se presentan los resultados que se obtuvieron para la arena reciclada y la arena natural de Pifo.

Tabla 4. Densidad relativa y absorción de agua de los agregados finos

Material	Densidad relativa			Absorción de agua (%)
	Seca	S.S.S.	Aparente	
Arena reciclada	2,12	2,32	2,64	9,28
Arena natural	2,50	2,55	2,63	2,03

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 3 evidencian que la arena reciclada presentó una densidad relativa seca de 2,12, valor inferior al registrado por la arena natural, que alcanzó 2,50. Esta diferencia indica que el agregado reciclado posee menor masa relativa en condición seca, lo cual puede asociarse con una mayor presencia de poros internos, partículas adheridas de material cementicio o mayor heterogeneidad en su composición.

En cuanto a la absorción de agua, la arena reciclada presentó un valor de 9,28 %, mientras que la arena natural registró 2,03 %. Esta diferencia es técnicamente significativa, debido a que el agregado reciclado puede retener mayor cantidad de agua durante la mezcla. En morteros, este comportamiento puede modificar la fluidez inicial, reducir el agua efectiva disponible para la pasta de cemento y afectar la resistencia si no se controla adecuadamente la dosificación.

La densidad relativa aparente fue similar en ambos materiales, con 2,64 para la arena reciclada y 2,63 para la arena natural. Sin embargo, la diferencia principal entre los agregados no se encuentra en la densidad aparente, sino en la absorción. Por tanto, el comportamiento de la arena reciclada debe analizarse principalmente desde su capacidad de absorción de agua, ya que este parámetro incide directamente en la trabajabilidad y en la compactación del mortero.

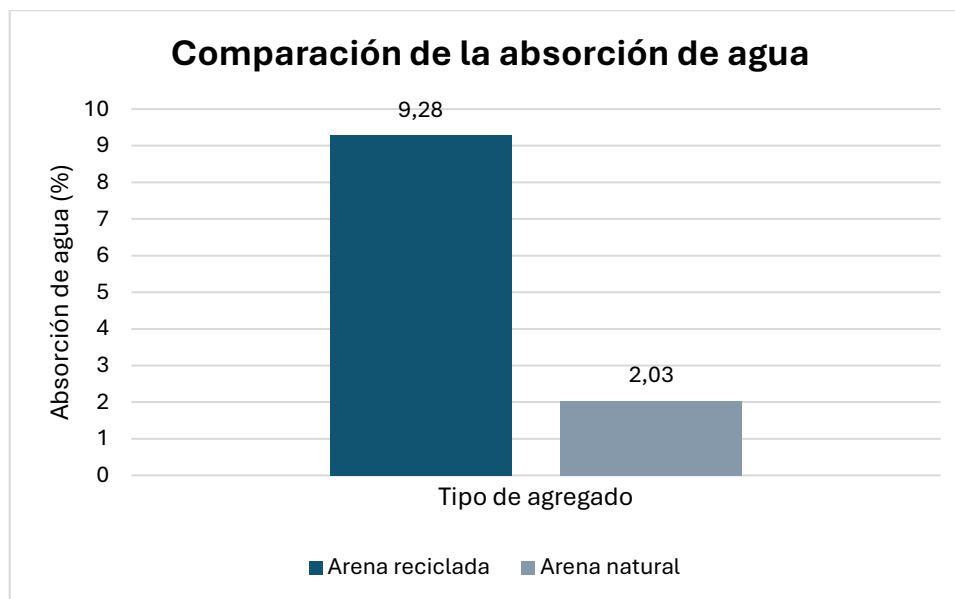


Figura 14. Comparación de la absorción de agua entre agregados finos

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Figura 14 permite visualizar con mayor claridad la diferencia de absorción entre los agregados finos. Se observa que la arena reciclada absorbe más agua que la arena de cantera, por lo que este material requiere mayor control durante la preparación del mortero para evitar variaciones en la consistencia y en la relación agua-cemento efectiva.

3.3.2 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico permitió determinar la distribución del tamaño de partículas de la arena de Pifo y de la arena reciclada. Este ensayo es fundamental porque la granulometría influye en la compacidad del mortero, la cantidad de vacíos, la demanda de pasta de cemento y la trabajabilidad de la mezcla. En las Tablas 4 y 5 se presentan los resultados individuales de cada agregado.

Tabla 5. Análisis granulométrico de la arena natural

Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	%			NTE INEN 872	
			Retenido	Retenido acumulado	Pasa	Límite inferior	Límite superior
N.º 3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
N.º 4	4,75	4,30	1,45	1,45	98,55	95	100
N.º 8	2,36	29,00	9,76	11,21	88,79	80	100
N.º 16	1,18	52,40	17,64	28,85	71,15	50	85
N.º 30	0,60	72,70	24,48	53,33	46,67	25	60
N.º 50	0,30	65,30	21,99	75,32	24,68	10	30

N.º 100	0,15	57,80	19,46	94,78	5,22	2	10
N.º 200	0,075	11,40	3,84	98,62	1,38	-	-
Bandeja	-	4,10	1,38	100,00	0,00	-	-
Total	-	297,00	100,00	-	-	-	-

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 4 muestran que la arena de cantera se mantiene dentro de los rangos establecidos por la NTE INEN 872 en los tamices principales evaluados. Esto indica que su distribución granulométrica es adecuada para su uso como agregado fino en morteros, ya que presenta una proporción equilibrada entre partículas gruesas, medias y finas.

Este comportamiento favorece la compacidad de la mezcla, debido a que las partículas pueden acomodarse de mejor manera dentro del volumen del mortero. Por ello, la arena de cantera se considera el material de referencia para comparar el desempeño de las mezclas con arena reciclada.

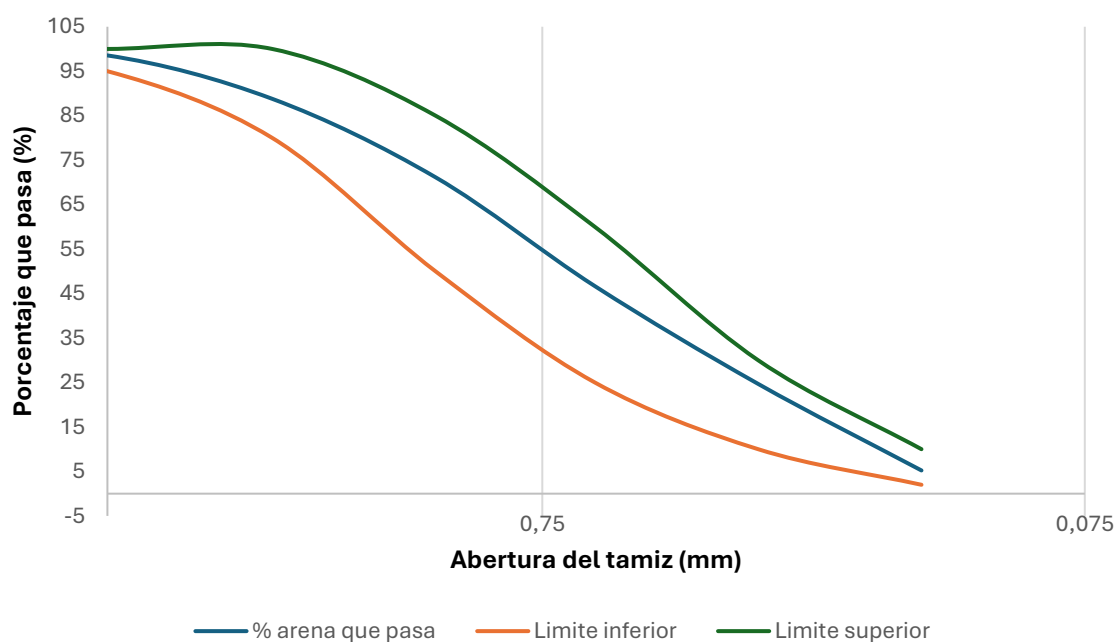


Figura 8. Curva granulométrica de la arena natural

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Figura 15 confirma que la curva granulométrica de la arena de cantera se mantiene dentro de los límites normativos para agregado fino. Esto respalda su uso como material patrón en la elaboración de los morteros evaluados.

Tabla 6. Análisis granulométrico de la arena reciclada

Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	%			NTE INEN 872	
			Retenido	Retenido acumulado	Pasa	Límite inferior	Límite superior
N.º 3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
N.º 4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
N.º 8	2,36	63,60	20,54	20,54	79,46	80	100
N.º 16	1,18	72,10	23,28	43,82	56,18	50	85
N.º 30	0,60	56,80	18,34	62,16	37,84	25	60
N.º 50	0,30	42,60	13,76	75,92	24,08	10	30
N.º 100	0,15	30,80	9,95	85,87	14,13	2	10
N.º 200	0,075	22,70	7,33	93,20	6,80	-	-
Bandeja	-	21,09	6,81	100,00	0,00	-	-
Total	-	309,69	100,00	-	-	-	-

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la Tabla 5 se observa que la arena reciclada presenta una distribución granulométrica más variable que la arena de cantera. En el tamiz N.º 8, el porcentaje que pasa se encuentra ligeramente por debajo del límite mínimo establecido, mientras que en el tamiz N.º 100 supera el límite máximo permitido. Esto indica que el material reciclado no tiene una gradación completamente equivalente a la arena convencional.

La mayor presencia de partículas finas en la arena reciclada puede aumentar la superficie específica del agregado. Como consecuencia, el mortero puede requerir más agua para alcanzar una consistencia adecuada, lo que ayuda a explicar la importancia de controlar la trabajabilidad en las mezclas con mayores porcentajes de sustitución.

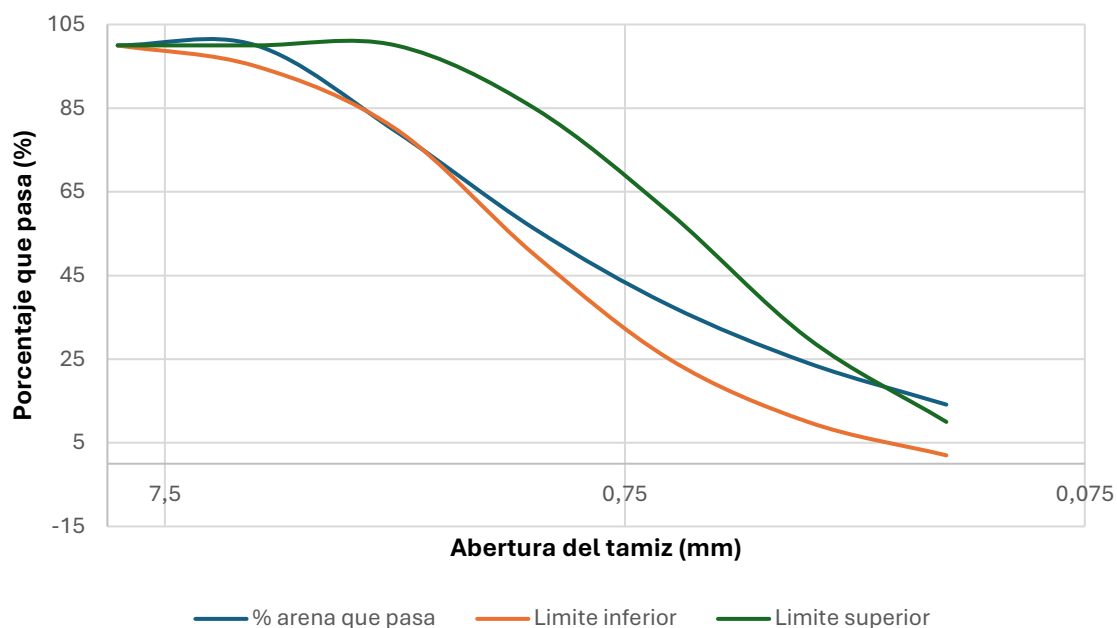


Figura 9. Curva granulométrica de la arena reciclada

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Figura 16 muestra que la curva granulométrica de la arena reciclada presenta desviaciones puntuales respecto a los límites normativos, especialmente en los tamices N.º 8 y N.º 100. Esto evidencia que el agregado reciclado contiene una proporción diferente de partículas gruesas y finas en comparación con la arena natural.

Para comparar ambos materiales, en la Tabla 6 se presenta el porcentaje que pasa por cada tamiz. Esta tabla permite visualizar las diferencias granulométricas entre la arena natural y la arena reciclada.

Tabla 7. Comparación granulométrica entre arena natural y reciclada

Tamiz	Abertura (mm)	% de arena que pasa		NTE INEN 872	
		Natural	Reciclada	Límite inferior	Límite superior
N.º 3/8	9,50	100,00	100,00	100	100
N.º 4	4,75	98,55	100,00	95	100
N.º 8	2,36	88,79	79,46	80	100
N.º 16	1,18	71,15	56,18	50	85
N.º 30	0,60	46,67	37,84	25	60
N.º 50	0,30	24,68	24,08	10	30
N.º 100	0,15	5,22	14,13	2	10
N.º 200	0,075	1,38	6,80	-	-

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La comparación de la Tabla 6 permite identificar que la arena de Pifo presenta una gradación más ajustada a los límites normativos, mientras que la arena reciclada muestra desviaciones puntuales en los tamices N.º 8 y N.º 100. En términos técnicos, esto evidencia que el agregado reciclado no presenta una distribución completamente equivalente a la arena natural. La mayor presencia de material fino en la arena reciclada puede aumentar la superficie específica del agregado, lo cual contribuye a una mayor absorción y a una posible modificación en la fluidez del mortero.

Además, la arena reciclada presentó un porcentaje más alto de material que pasa el tamiz N.º 200, con 6,80 %, frente al 1,38 % registrado en la arena de Pifo. Este resultado refuerza la necesidad de considerar el contenido de finos en el análisis del comportamiento del mortero, debido a que un exceso de partículas finas puede alterar la relación entre agua, cemento y agregado dentro de la mezcla.

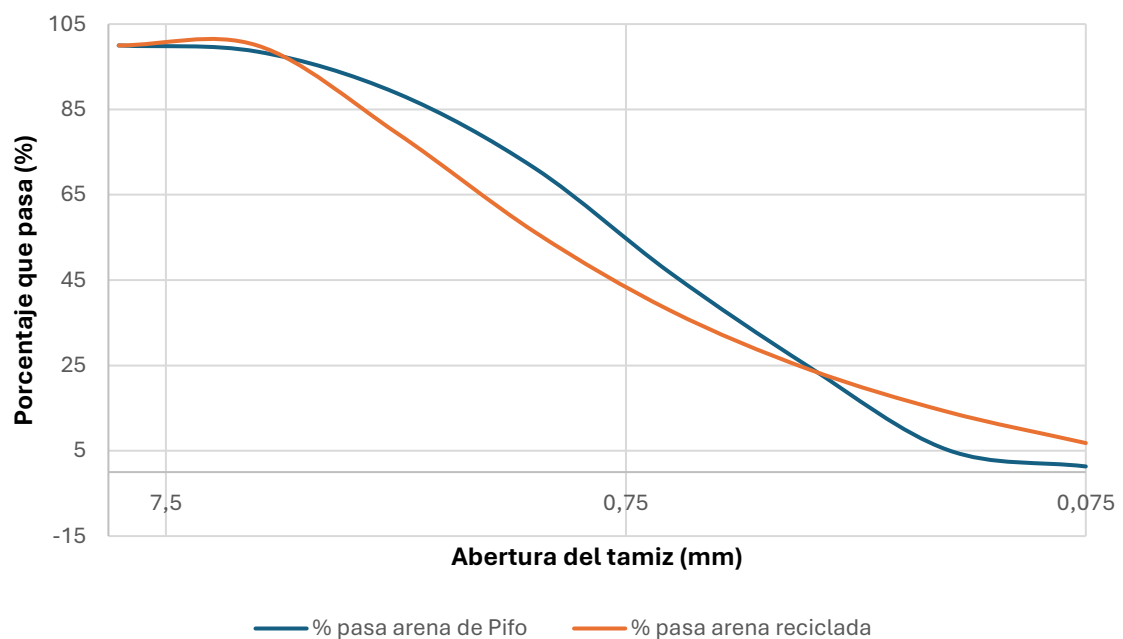


Figura 10. Comparación granulométrica entre arena natural y arena reciclada

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Figura 17 permite evidenciar que la arena reciclada presenta una distribución menos uniforme que la arena de Pifo, con mayor presencia de partículas finas en los tamices de menor abertura.

3.3.3 Peso unitario suelto

Este parámetro es importante porque permite comparar la forma en que la arena reciclada y la arena natural ocupan un mismo volumen, aspecto que se relaciona con la

distribución de vacíos, la compacidad del material y el comportamiento volumétrico dentro de la mezcla de mortero.

El ensayo fue realizado bajo la norma ASTM C29 / INEN 858, considerando tanto la condición suelta como la condición compactada de los agregados finos. En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para la arena reciclada y la arena natural.

Tabla 8. Densidad aparente y contenido de vacíos de los agregados finos

Material	Densidad seca suelta (kg/m ³)	Contenido de vacíos suelta (%)	q seca compactada (kg/m ³)	Contenido de vacíos compactada (%)
Arena reciclada	1340	37	1400	34
Arena natural	1530	39	1720	31

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 7 muestran que la arena reciclada presentó una densidad seca en condición suelta de 1340 kg/m³, mientras que la arena natural alcanzó 1530 kg/m³. Esta diferencia indica que la arena reciclada posee menor masa por unidad de volumen en estado suelto, lo cual puede relacionarse con una estructura más porosa, menor peso propio de las partículas o mayor irregularidad en la forma del agregado.

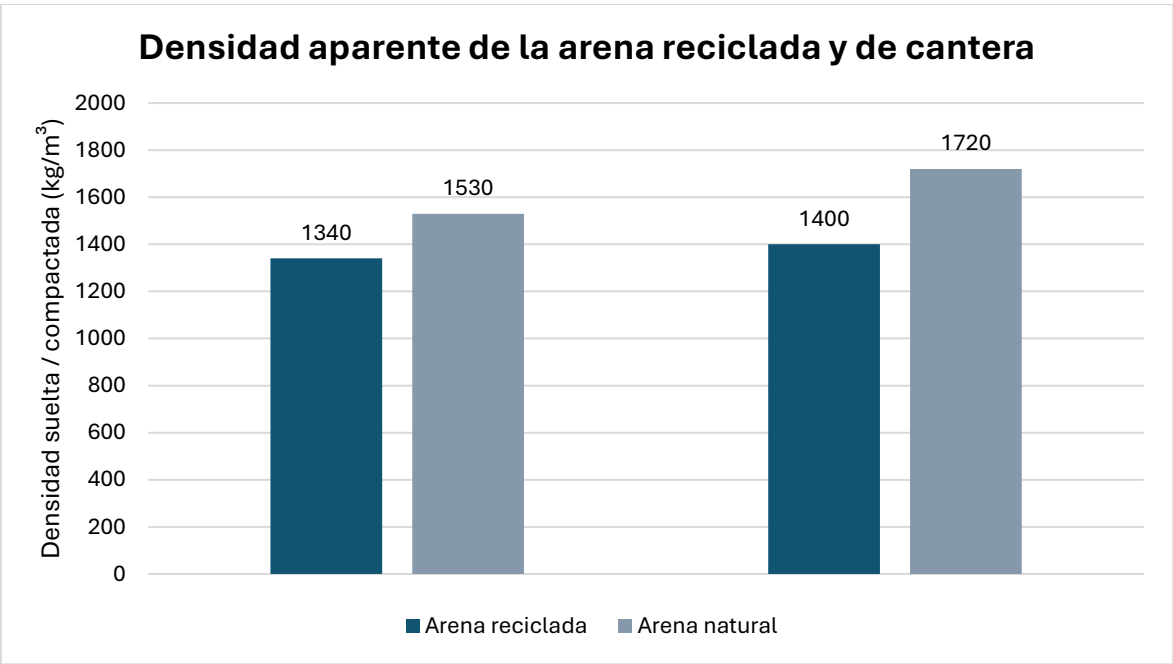


Figura 11. Densidad aparente de los agregados finos en condición suelta y compactada

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En condición compactada, la arena reciclada alcanzó una densidad seca de 1400 kg/m³, mientras que la arena natural registró 1720 kg/m³. Este resultado confirma que, aun después de aplicar compactación, la arena natural mantiene una mayor densidad aparente que la arena reciclada. Por tanto, el agregado reciclado presenta una menor capacidad de empaquetamiento en comparación con el agregado natural.

Respecto al contenido de vacíos, la arena reciclada registró 37 % en condición suelta y 34 % en condición compactada. La arena natural presentó 39 % en condición suelta y 31% en condición compactada. Estos valores muestran que ambos agregados reducen su contenido de vacíos al pasar de condición suelta a compactada, aunque la arena natural logra una compactación más eficiente, debido a que su contenido de vacíos disminuye en mayor proporción.

3.4 Fabricación y control de probetas cúbicas

La fase de fabricación de probetas cúbicas tiene lugar en el marco de un control necesario para poder comparar la resistencia a compresión que se obtiene para diferentes mezclas de mortero. En este trabajo, las probetas cúbicas se fabricaron de acuerdo con el criterio de la norma ASTM C109/C109M, que establece el uso de moldes cúbicos de 50 mm de lado para la evaluación de morteros de cemento hidráulico. Esta norma también contempla el control del moldeo, compactación, curado y posterior rotura de las muestras con el objetivo de minimizar las variaciones procedentes del proceso de fabricación.

El procedimiento de fabricación contempló el llenado de los moldes metálicos mediante capas, la compactación uniforme del mortero, el enrasado superficial y el control de las condiciones de curado, siendo relevantes, porque cualquier insuficiencia en la etapa de llenado, compactación o curado puede dar lugar a la aparición de vacíos internos, diferencias de densidad o superficies rugosas que inciden directamente sobre la carga máxima soportada por la probeta en el ensayo de compresión; y por lo tanto, el control de fabricación sensu estricto implicado permite que las diferencias encontradas en la resistencia se deban exclusivamente a la composición de las mezclas y no a fallos en el proceso de moldeo.

Tabla 9. Control de probetas cúbicas según dosificación y porcentaje de sustitución

Dosificación	Arena		Número de probetas
	Natural (%)	Reciclada (%)	
1:3	100	0	3
	75	25	3
	50	50	3
	25	75	3
	0	100	3
1:4	100	0	3
	75	25	3
	50	50	3
	25	75	3
	0	100	3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Tabla 8 muestra que cada grupo de mezcla fue representado por tres probetas cúbicas, lo cual permite obtener un valor promedio de resistencia y verificar la variabilidad entre muestras de una misma dosificación. En la dosificación 1:3 se registraron probetas para los cinco porcentajes de sustitución considerados en el diseño experimental. En la dosificación 1:4, los informes disponibles presentan probetas para las mezclas patrón, 25 % y 50 % de arena reciclada, organizadas según las series reportadas.

El control individual de las probetas permite relacionar cada resultado de resistencia con sus condiciones de fabricación y ensayo. Las fechas de fabricación y rotura registradas en los informes confirman que las muestras fueron ensayadas a una edad de 7 días, mientras que la densidad reportada para cada probeta permite evaluar la uniformidad del mortero endurecido antes del análisis mecánico.

3.5 Resultados integrales de la dosificación 1:3

El análisis de resistencia a 7 días se presenta en dos niveles. Primero, se exponen los resultados individuales de cada probeta, con el fin de evidenciar los valores registrados por el laboratorio. Luego, se calcula el promedio, valor mínimo, valor máximo, desviación estándar y coeficiente de variación para cada mezcla. Este procesamiento permite comparar el comportamiento de las mezclas con arena reciclada frente al mortero patrón correspondiente.

Para el análisis de los resultados de resistencia a compresión se aplicó estadística descriptiva básica, con el propósito de resumir el comportamiento de cada grupo de probetas y evaluar la variabilidad de los valores obtenidos. Cada mezcla fue representada por tres probetas, por lo que se calcularon la resistencia promedio, el valor mínimo, el valor máximo, la desviación estándar, el coeficiente de variación y la variación porcentual respecto al mortero patrón.

La resistencia promedio se calculó mediante:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

Donde:

- $\bar{x}$ = Resistencia promedio de la mezcla, en MPa
- x_1 = Resistencia individual de cada probeta, en MPa
- n = Número de probetas ensayadas

La desviación estándar se determinó mediante la Ecuación 2, con el fin de medir la dispersión de los valores individuales respecto al promedio.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Donde:

- s = Desviación estándar muestral, en MPa
- x_1 = Valor individual de resistencia, en MPa
- $\bar{x}$ = Promedio de resistencia, en MPa
- $n - 1$ = Grados de libertad de la muestra

El coeficiente de variación se calculó mediante la Ecuación 3. Este indicador permite expresar la dispersión de los resultados en términos porcentuales, facilitando la comparación entre mezclas con diferentes niveles de resistencia.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- CV = Coeficiente de variación, en %
- s = Desviación estándar, en MPa

- $\bar{x}$ = Resistencia promedio, en MPa

La variación porcentual respecto al mortero patrón se obtuvo mediante la Ecuación 4. Esta fórmula permite determinar si una mezcla con arena reciclada presentó incremento o reducción de resistencia frente a la mezcla elaborada con 100 % arena natural.

$$V_r = \frac{R_m - R_p}{R_p} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

- V_r = Variación porcentual respecto al patrón, en %
- R_m = Resistencia promedio de la mezcla con arena reciclada, en MPa
- R_p = Resistencia promedio del mortero patrón, en MPa

Cuando V_r es positivo, la mezcla con arena reciclada presenta una resistencia superior al mortero patrón.

Cuando V_r es negativo, la mezcla presenta una reducción de resistencia. Este criterio se utilizó para interpretar el efecto de cada porcentaje de sustitución sobre el comportamiento mecánico del mortero.

3.5.1 Flujo del mortero

El ensayo de flujo permitió evaluar la consistencia del mortero en estado fresco antes de la rotura de las probetas. Este parámetro es importante porque permite verificar la trabajabilidad de las mezclas y analizar si la incorporación de arena reciclada modifica el comportamiento fresco del mortero. Los valores de flujo registrados en los informes de laboratorio se presentan por dosificación y porcentaje de sustitución de arena reciclada.

En la Tabla 9 se resumen los valores de flujo para la dosificación 1:3. En esta dosificación se cuenta con resultados para los cinco porcentajes de sustitución considerados en el diseño experimental: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada.

Tabla 10. Flujo del mortero en la dosificación 1:3

Dosificación	Arena		Flujo	
	Natural (%)	Reciclada (%)	Individual (%)	Promedio (%)
1:3	100	0	115 - 115 - 115	115,00
	75	25	114 - 114 - 114	114,00
	50	50	113 - 113 - 113	113,00

25	75	114 - 114 - 114	114,00
0	100	114 - 114 - 114	114,00

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 9 muestran que los valores de flujo en la dosificación 1:3 se mantuvieron entre 113 % y 115 %. El mortero patrón, elaborado con 100% arena natural y 0 % arena reciclada, alcanzó un flujo promedio de 115 %, mientras que las mezclas con incorporación de arena reciclada presentaron valores entre 113 % y 114 %. Esta variación es reducida, por lo que se interpreta que, en la dosificación 1:3, la sustitución parcial o total de arena natural por arena reciclada no generó una disminución marcada de la trabajabilidad bajo las condiciones de ensayo reportadas.

El menor flujo promedio correspondió a la mezcla con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada, con un valor de 113 %. En cambio, las mezclas con 75 % arena natural y 25% arena reciclada, 25 % arena natural y 75% arena reciclada, y 0% arena natural y 100 % arena reciclada alcanzaron un flujo promedio de 114 %. Esta diferencia de uno a dos puntos porcentuales respecto al mortero patrón indica que las mezclas conservaron una consistencia similar, lo cual permite analizar posteriormente los resultados de resistencia a compresión sin atribuir grandes variaciones a cambios significativos en la fluidez del mortero.

3.5.2 Resistencia a compresión a los 7 días

En la dosificación 1:3 se evaluaron mezclas con 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada. Los resultados individuales de resistencia a compresión se presentan en la Tabla 10, considerando la densidad, carga máxima y resistencia obtenida para cada probeta.

Tabla 11. Resultados de resistencia a compresión a 7 días en dosificación 1:3

Arena		Flujo (%)	Densidad (kg/m ³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
Natural (%)	Reciclada (%)				
100	0	115	2118	27,48	11,2
100	0	115	2115	26,75	10,9
100	0	115	2119	27,72	11,3
75	25	114	2056	28,03	11,2
75	25	114	2042	28,29	11,1
75	25	114	2064	28,96	11,5
50	50	113	2073	26,85	10,3
50	50	113	2072	25,49	9,9

50	50	113	2051	28,11	10,6
25	75	115	2008	23,77	9,4
25	75	115	1999	23,14	9,1
25	75	115	1994	22,60	8,8
0	100	114	2032	19,76	8,0
0	100	114	2009	19,90	7,9
0	100	114	2017	19,85	8,0

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 10 muestran que, en la dosificación 1:3, el mortero patrón elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada alcanzó resistencias entre 10,9 MPa y 11,3 MPa. La mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó valores entre 11,1 MPa y 11,5 MPa, ubicándose en un rango similar e incluso ligeramente superior al mortero patrón.

En las mezclas con mayor contenido de arena reciclada se observó una disminución progresiva de la resistencia. La combinación con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada registró resistencias entre 9,9 MPa y 10,6 MPa, mientras que la mezcla con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada obtuvo valores entre 8,8 MPa y 9,4 MPa. Finalmente, el mortero elaborado con 0% arena natural y 100 % arena reciclada presentó las resistencias más bajas, entre 7,9 MPa y 8,0 MPa.

En la Tabla 11 se presenta el resumen estadístico de la resistencia a compresión para cada mezcla de la dosificación 1:3.

Tabla 12. Resumen estadístico a compresión a 7 días en dosificación 1:3

Arena		Resistencia promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Natural (%)	Reciclada (%)	MPa				(%)
100	0	11,13	10,9	11,3	0,21	1,87
75	25	11,27	11,1	11,5	0,21	1,85
50	50	10,27	9,9	10,6	0,35	3,42
25	75	9,10	8,8	9,4	0,30	3,30
0	100	7,97	7,9	8,0	0,06	0,72

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 11, la mayor resistencia promedio en la dosificación 1:3 correspondió a la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada, con un valor de 11,27 MPa. Este resultado fue ligeramente superior al mortero patrón, elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada, que alcanzó 11,13 MPa. La diferencia entre ambas mezclas fue reducida, pero permite señalar que la sustitución del 25 % de arena reciclada mantuvo el desempeño mecánico inicial del mortero e incluso presentó un incremento leve respecto a la mezcla de referencia.

A partir del 50 % de sustitución se observa una reducción progresiva de resistencia. La mezcla con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada alcanzó 10,27 MPa, la combinación con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada obtuvo 9,10 MPa, y el mortero elaborado con 0 % arena natural y 100 % arena reciclada registró 7,97 MPa. Esta tendencia evidencia que el aumento del contenido de arena reciclada disminuyó la resistencia a compresión a los 7 días, posiblemente asociado a la mayor absorción de agua del agregado reciclado, su heterogeneidad y la presencia de partículas más porosas.

En la Tabla 12 se presenta la variación porcentual de cada mezcla respecto al mortero patrón en 1:3.

Tabla 13. Variación de resistencia respecto al mortero patrón en dosificación 1:3

Arena reciclada (%)	Resistencia promedio (MPa)	Variación (%)	Interpretación
0	11,13	0,00	Mezcla patrón
25	11,27	+1,20	Incremento leve
50	10,27	-7,78	Reducción moderada
75	9,10	-18,26	Reducción significativa
100	7,97	-28,44	Reducción alta

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Tabla 12 confirma que la mezcla presentó una variación positiva de 1,20 % frente al mortero patrón. Sin embargo, las sustituciones de 50 %, 75 % y 100 % generaron reducciones de 7,78 %, 18,26 % y 28,44 %, respectivamente. Este resultado permite establecer que, para la dosificación 1:3, el comportamiento más favorable a edad temprana se obtuvo con el 25 % de arena reciclada.

La resistencia promedio a compresión de las mezclas con dosificación 1:3 se representa en la Figura 20. En esta figura se observa que la mezcla presentó el mayor valor promedio, mientras que las mezclas con porcentajes superiores de arena reciclada mostraron una disminución progresiva de resistencia.

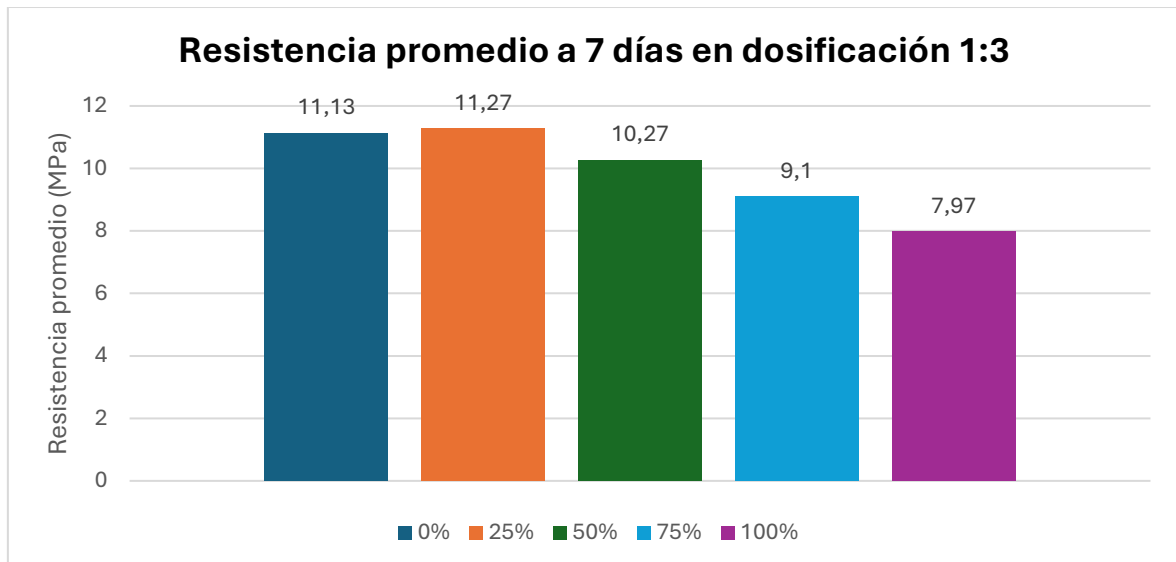


Figura 12. Resistencia promedio a compresión a 7 días en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

3.5.3 Resistencia a compresión a los 28 días

En la dosificación 1:3 se evaluaron cinco combinaciones de agregado fino. Los resultados individuales se presentan en la Tabla 13.

Tabla 14. Resultados de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:3

Arena		Flujo (%)	Densidad (kg/m ³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
Natural (%)	Reciclada (%)				
100	0	115	2072	49,88	20,0
100	0	115	2072	49,78	19,8
100	0	115	2084	48,82	19,5
75	25	114	2064	51,83	20,5
75	25	114	2031	55,64	21,7
75	25	114	2048	53,81	21,1
50	50	113	2017	45,77	17,2
50	50	113	2003	46,92	17,9
50	50	113	2027	46,51	17,7
25	75	114	2012	47,94	17,6

25	75	114	2007	47,21	17,4
25	75	114	1995	46,03	17,1
0	100	114	1998	38,09	13,9
0	100	114	1974	39,00	14,2
0	100	114	1973	38,64	14,3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 13 muestran que el mortero patrón con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada alcanzó resistencias entre 19,5 MPa y 20,0 MPa. La mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó valores entre 20,5 MPa y 21,7 MPa, ubicándose por encima del patrón en los tres resultados individuales reportados.

En las mezclas con porcentajes superiores de arena reciclada se observó una disminución de resistencia. La combinación con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada registró valores entre 17,2 MPa y 17,9 MPa, mientras que la mezcla con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada obtuvo resistencias entre 17,1 MPa y 17,6 MPa. Finalmente, el mortero con 0 % arena natural y 100 % arena reciclada presentó los valores más bajos, entre 13,9 MPa y 14,3 MPa.

Tabla 15. Resumen de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:3

Arena		Resistencia promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Natural (%)	Reciclada (%)	MPa			MPa	
100	0	19,77	19,5	20,0	0,25	1,27
75	25	21,10	20,5	21,7	0,60	2,84
50	50	17,60	17,2	17,9	0,36	2,03
25	75	17,37	17,1	17,6	0,25	1,46
0	100	14,13	13,9	14,3	0,21	1,47

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 14, la mayor resistencia promedio en la dosificación 1:3 correspondió a la mezcla con 75 % arena natural y 25% arena reciclada, con 21,10 MPa. Este valor fue superior al mortero patrón, que alcanzó 19,77 MPa, lo que evidencia que la sustitución del 25 % de arena reciclada mantuvo e incrementó el desempeño mecánico.

A partir del 50 % de arena reciclada se registró una reducción en la resistencia promedio. La mezcla con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada alcanzó 17,60 MPa, la combinación con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada obtuvo 17,37 MPa, y la mezcla con 0 % arena natural y 100 % arena reciclada registró 14,13 MPa. Esta tendencia muestra que el aumento del contenido de arena reciclada redujo progresivamente la resistencia a compresión en la dosificación 1:3.

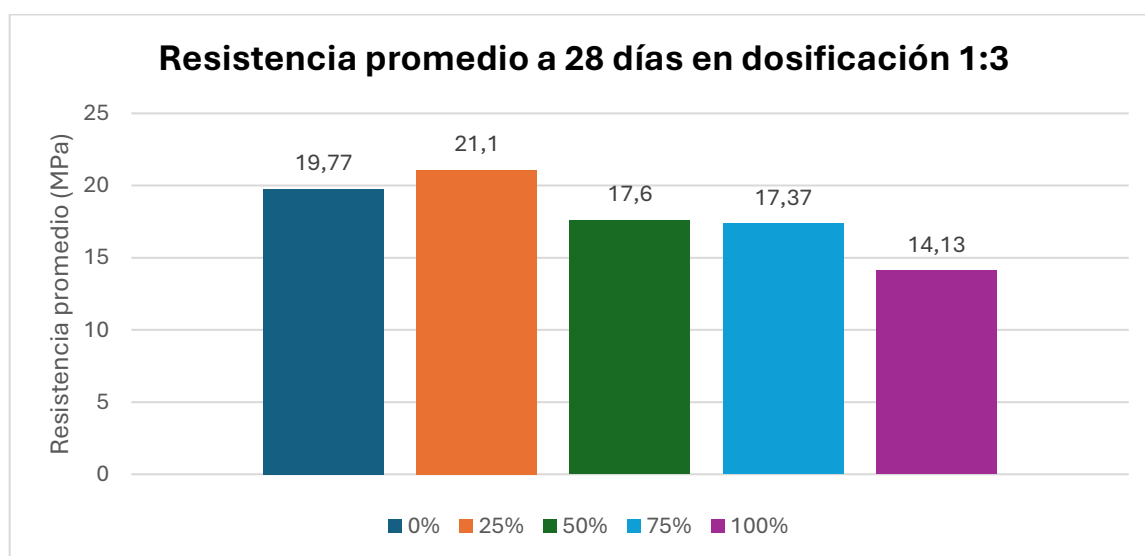


Figura 13. Resistencia promedio a compresión a 28 días en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

3.5.4 Comparación entre resistencia a 7 y 28 días

La comparación entre la resistencia a compresión a los 7 y 28 días permitió evaluar el incremento de resistencia de los morteros durante el periodo de curado. Este análisis se realizó a partir de los valores promedio obtenidos en cada porcentaje de sustitución de arena natural por arena reciclada, diferenciando las dosificaciones 1:3 y 1:4.

La resistencia a los 7 días representa el comportamiento mecánico inicial del mortero, mientras que la resistencia a los 28 días permite observar el desarrollo posterior del material endurecido. Para establecer esta comparación, se calculó el incremento absoluto en MPa y el incremento porcentual entre ambas edades de ensayo.

El incremento porcentual de resistencia se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Incremento(\%) = \frac{R_{28} - R_7}{R_7} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

- R_{28} = Resistencia promedio a compresión a los 28 días, en MPa

- R_7 = Resistencia promedio a compresión a los 7 días, en MPa

En la dosificación 1:3, todas las mezclas presentaron incremento de resistencia entre los 7 y 28 días. En la Tabla 15 se presenta la comparación entre ambas edades de curado para cada porcentaje de sustitución.

Tabla 16. Comparación de resistencia a compresión entre 7 y 28 días en 1:3

Arena		Resistencia (MPa)		Incremento	
Natural (%)	Reciclada (%)	7 días	28 días	MPa	%
100	0	11,13	19,77	8,64	77,63
75	25	11,27	21,10	9,83	87,22
50	50	10,27	17,60	7,33	71,37
25	75	9,10	17,37	8,27	90,88
0	100	7,97	14,13	6,16	77,29

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 15, la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó la mayor resistencia promedio a los 28 días, con 21,10 MPa, y un incremento de 9,83 MPa respecto a los 7 días. El mortero patrón, elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada, aumentó de 11,13 MPa a 19,77 MPa, con un incremento porcentual de 77,63%.

La mezcla con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada presentó el mayor incremento porcentual, con 90,88 %, pasando de 9,10 MPa a 17,37 MPa. Sin embargo, su resistencia final fue menor que la obtenida por el mortero patrón y por la mezcla con 25 % de arena reciclada. Por ello, el incremento porcentual debe interpretarse junto con la resistencia final alcanzada, no de forma aislada.

En términos generales, la dosificación 1:3 mantuvo la misma tendencia observada a los 7 días. La sustitución del 25 % de arena reciclada presentó el mejor comportamiento mecánico, mientras que los porcentajes de 50 %, 75 % y 100 % registraron resistencias finales inferiores al patrón.

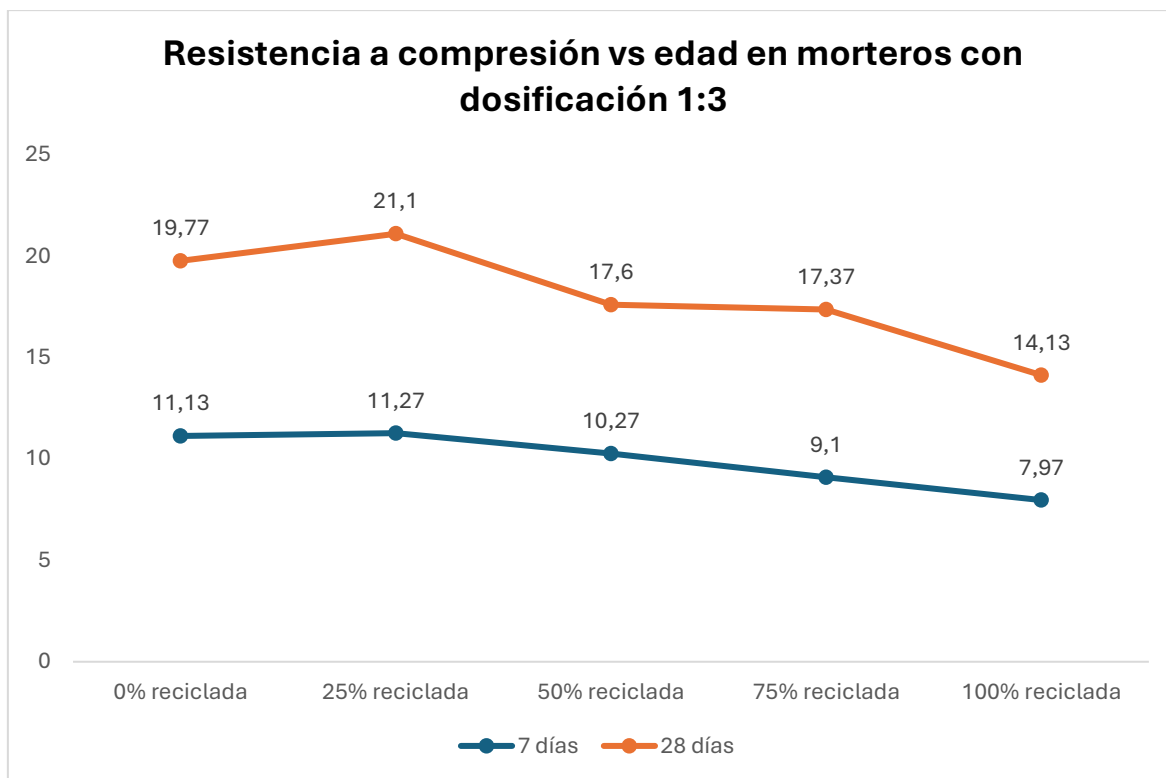


Figura 14. Resistencia a compresión vs edad en morteros con dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La evolución de la resistencia promedio entre los 7 y 28 días para la dosificación 1:3 se representa en la Figura 21. La gráfica permite observar que todas las mezclas incrementaron su resistencia con el tiempo de curado, manteniéndose como resultado más favorable la mezcla con 25 % de arena reciclada.

3.5.5 Registro visual de las mezclas

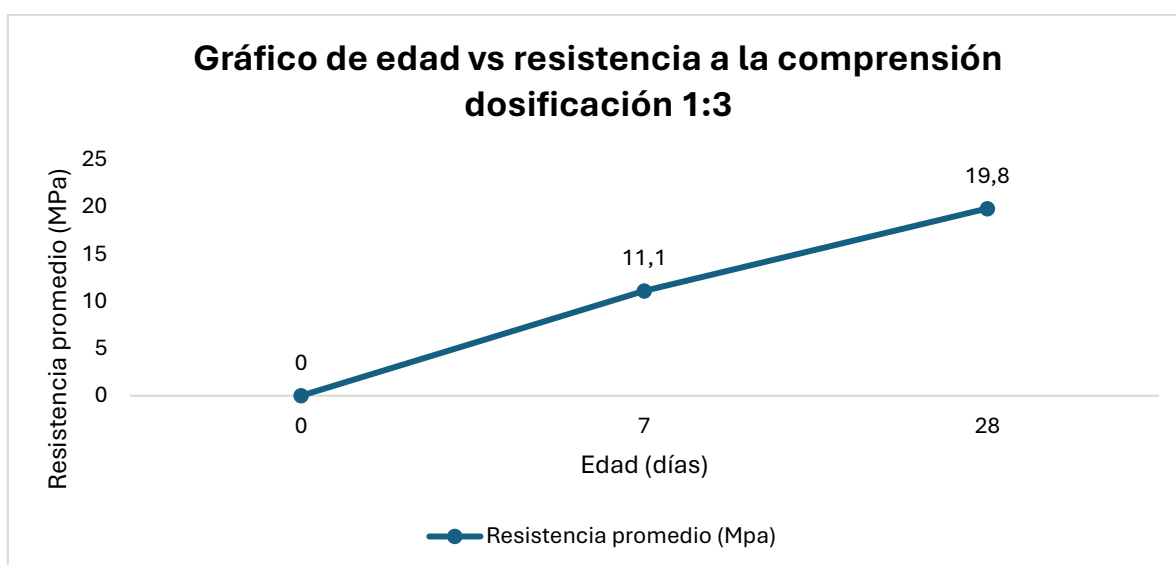


Figura 15. 100 % arena natural en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Figura 22 muestra que el mortero patrón con 100 % arena natural incrementó su resistencia promedio de 11,1 MPa a los 7 días a 19,8 MPa a los 28 días. Este comportamiento evidencia un desarrollo normal de resistencia con el tiempo de curado y sirve como referencia para comparar las mezclas con arena reciclada.

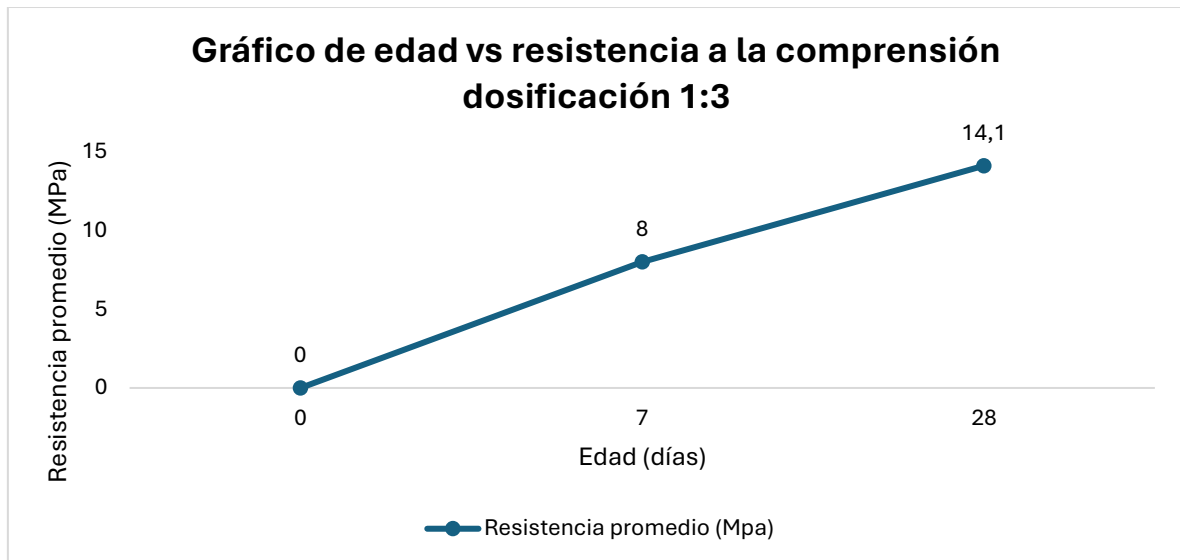


Figura 16. 100 % arena reciclada en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 100 % arena reciclada aumentó su resistencia promedio de 8,0 MPa a los 7 días a 14,1 MPa a los 28 días. Aunque presentó crecimiento con la edad, sus valores fueron inferiores al mortero patrón, lo que indica que el reemplazo total de arena natural redujo el desempeño mecánico.

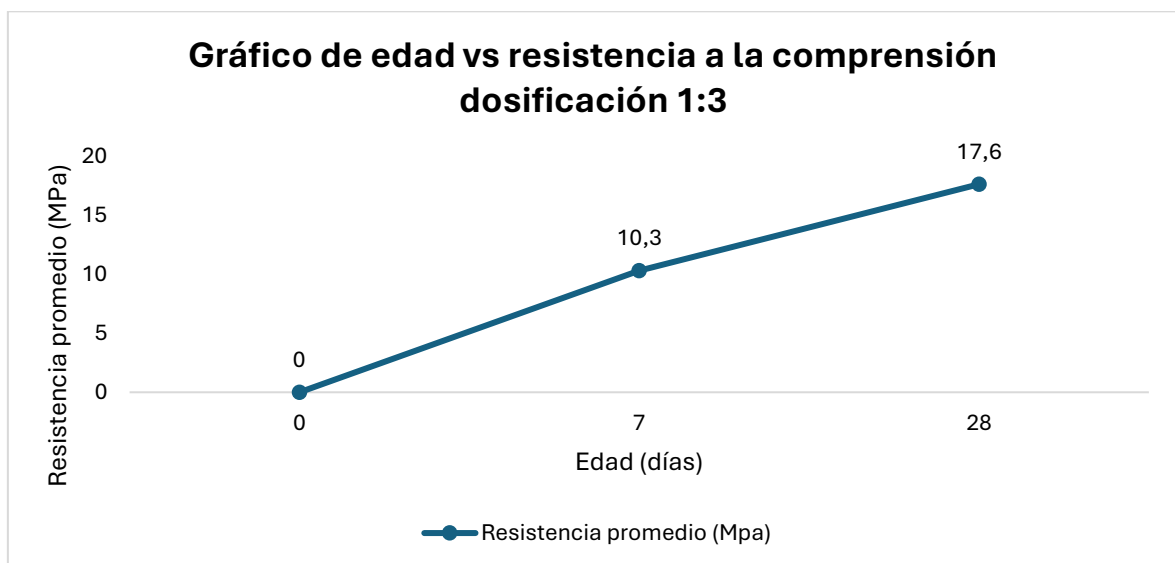


Figura 17. 50 % arena reciclada – 50 % arena natural en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 50 % arena reciclada y 50 % arena natural pasó de 10,3 MPa a los 7 días a 17,6 MPa a los 28 días. Este resultado muestra una mejora importante con el curado, aunque su resistencia final quedó por debajo del mortero patrón y de la mezcla con 25 % de arena reciclada.

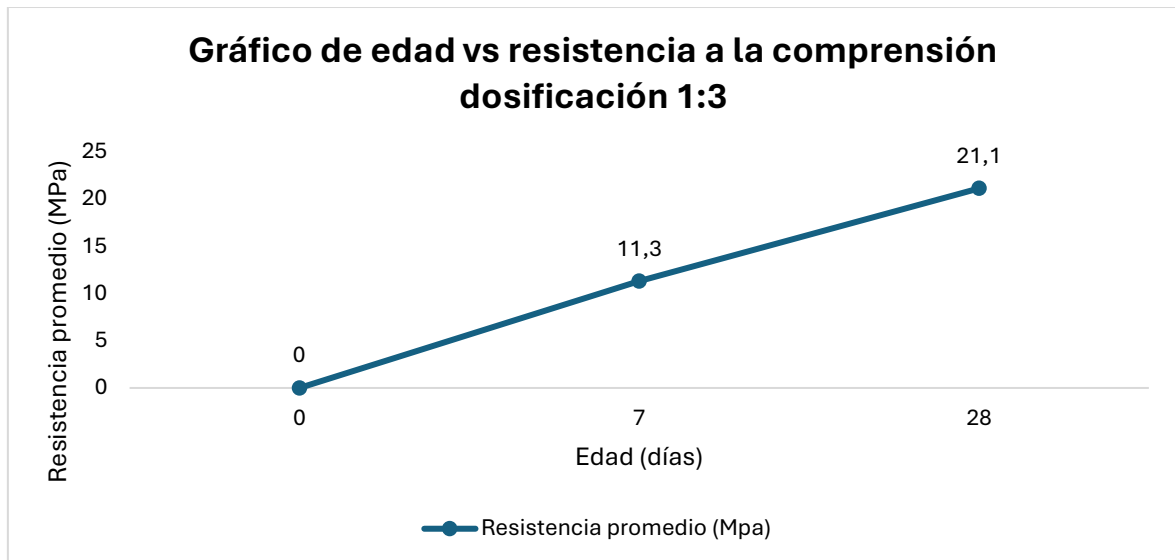


Figura 18. 25 % arena reciclada – 75 % arena natural en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 25 % arena reciclada y 75 % arena natural presentó el mejor comportamiento dentro de la dosificación 1:3, al aumentar de 11,3 MPa a los 7 días a 21,1 MPa a los 28 días. Este resultado indica que una sustitución baja de arena reciclada no afectó la resistencia, sino que permitió superar al mortero patrón.

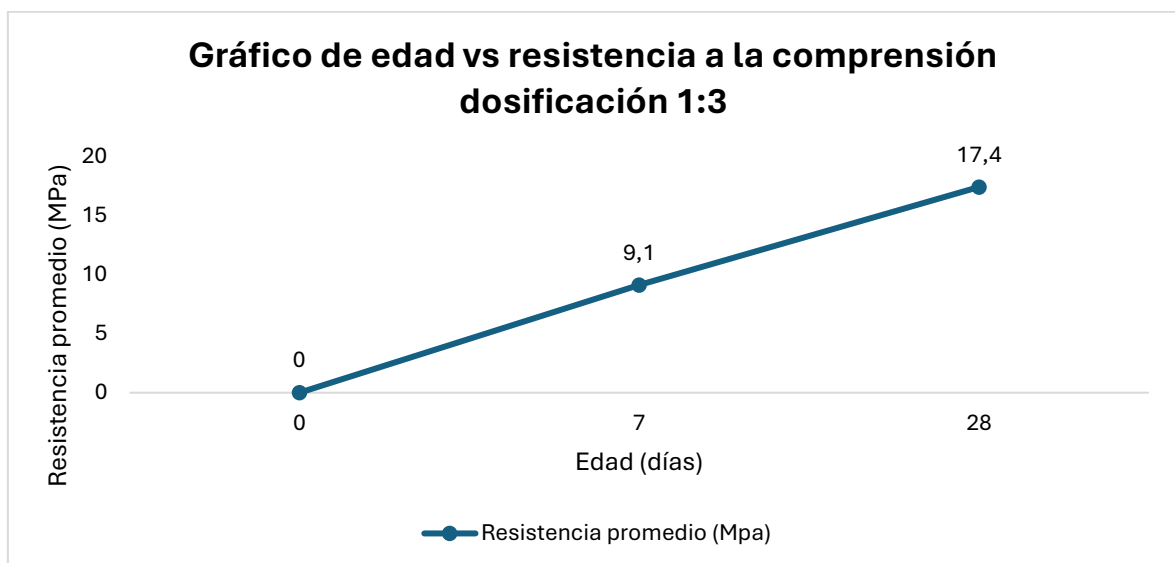


Figura 19. 75 % arena reciclada – 25 % arena natural en dosificación 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 75 % arena reciclada y 25 % arena natural incrementó su resistencia de 9,1 MPa a los 7 días a 17,4 MPa a los 28 días. Aunque el aumento fue considerable, la resistencia final fue menor que la obtenida con 25 % y 50 % de arena reciclada, lo que muestra que porcentajes altos de sustitución reducen el desempeño mecánico.

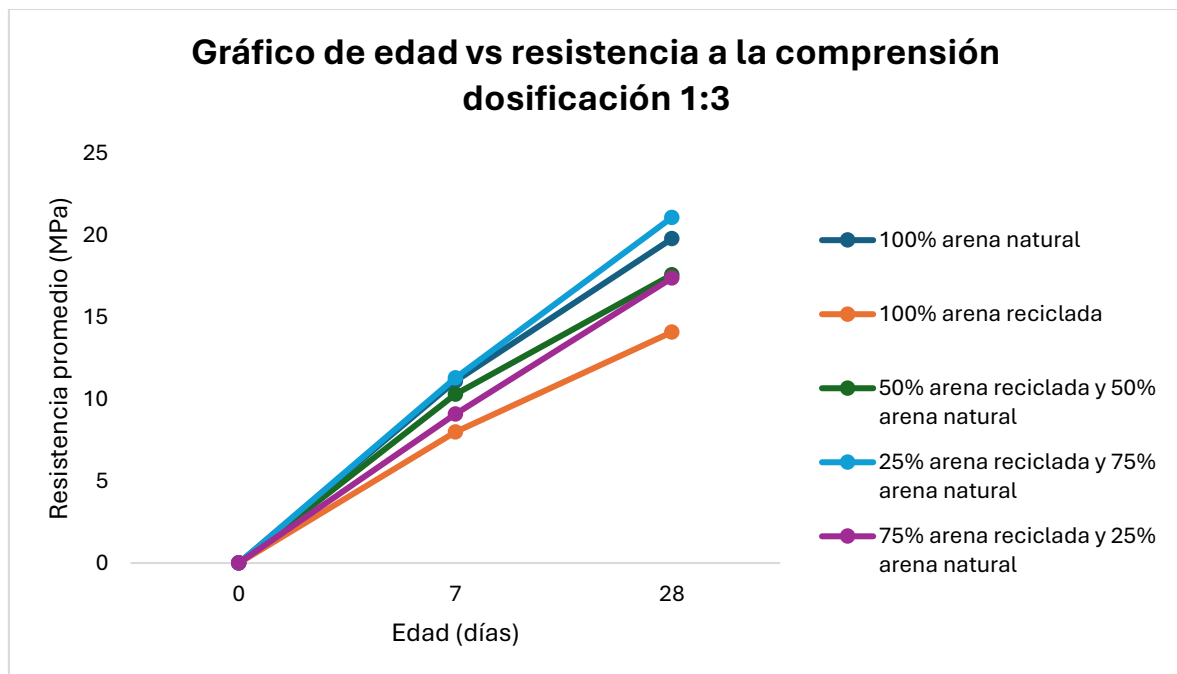


Figura 20. Dosificaciones en 1:3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La comparación general muestra que todas las mezclas incrementaron su resistencia entre los 7 y 28 días. La mejor dosificación dentro de la relación 1:3 fue la mezcla con 25 % arena reciclada y 75 % arena natural, debido a que alcanzó la mayor resistencia promedio a los 28 días, con 21,1 MPa. En cambio, la mezcla con 100 % arena reciclada presentó el menor desempeño, por lo que el reemplazo total no resultó la alternativa más favorable.

3.6 Resultados integrales de la dosificación 1:4

3.6.1 Flujo del mortero

En la Tabla 16 se presentan los valores de flujo para la dosificación 1:4. En este caso, los informes de laboratorio muestran resultados para diferentes series de ensayo, por lo que los datos se organizan según las mezclas reportadas.

Tabla 17. Flujo del mortero en la dosificación 1:4

Dosificación	Arena		Flujo	
	Natural (%)	Reciclada (%)	Individual (%)	Promedio (%)
1:4	100	0	115 - 115 - 115	115,00
	75	25	112 - 112 - 112	112,00
	50	50	106 - 106 - 106	106,00
	25	75	112 - 112 - 112	112,00
	0	100	112 - 112 - 112	112,00

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la dosificación 1:4, los valores de flujo se ubicaron entre 106 % y 115 %. El mortero patrón, elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada, presentó un registro de flujo promedio de 115 %. Para las mezclas con arena reciclada en dosificación 1:4, la combinación con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó un valor de flujo promedio de 112 %. El menor flujo correspondió a la serie con 50 % de arena reciclada, con 106 %, lo que refleja una reducción de trabajabilidad respecto al patrón de 115 %. Sin embargo, con un porcentaje de sustitución de 25 % arena natural y 75 % de arena reciclada alcanzó 112 %, por lo que su comportamiento debe interpretarse considerando las condiciones específicas de cada serie.

Los resultados muestran que la dosificación 1:4 presentó mayor variabilidad en el flujo que la dosificación 1:3, especialmente por la diferencia observada entre las series del mortero patrón y de la mezcla con 50 % de arena reciclada. Esta información es importante, debido a que la trabajabilidad puede influir en el llenado de moldes, la compactación de las probetas y la densidad del mortero endurecido.

3.6.2 Resistencia a compresión a los 7 días

Los datos incluyen mezclas patrón, mezclas con 25 % de arena reciclada y una mezcla con 50 % de arena reciclada. Debido a que existen registros en diferentes series, los resultados se presentan respetando la identificación de cada grupo de probetas.

Tabla 18. Resultados de resistencia a compresión a 7 días en dosificación 1:4

Arena		Flujo (%)	Densidad (kg/m ³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
Natural (%)	Reciclada (%)				
100	0	115	2073	22,04	8,4
100	0	115	2098	22,27	8,6

100	0	115	2069	22,76	8,6
75	25	106	2004,75	21,37	8,0
75	25	106	2052,97	21,79	8,4
75	25	106	2026,72	21,06	7,9
50	50	112	2023	16,67	6,5
50	50	112	2023,41	14,83	5,8
50	50	112	2034,63	16,68	6,5
25	75	112	1999	14,09	5,5
25	75	112	2003	13,61	5,4
25	75	112	2018	13,77	5,4
0	100	112	1981	12,87	5,1
0	100	112	1968	12,39	4,8
0	100	112	1997	13,08	5,2

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la Tabla 17 se observa los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días en la dosificación 1:4 presenta mayor variabilidad en los resultados de resistencia a compresión.

En la Tabla 18 se presenta el resumen estadístico de los resultados para la dosificación 1:4.

Tabla 19. Resumen estadístico de resistencia a compresión a 7 días en dosificación 1:4

Arena (%)		Resistencia promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Natural	Reciclada	MPa				(%)
100	0	8,53	8,4	8,6	0,12	1,35
75	25	8,10	7,9	8,4	0,26	3,27
50	50	6,27	5,8	6,5	0,40	6,45
25	75	5,43	5,4	5,5	0,06	1,06
0	100	5,03	4,8	5,2	0,21	4,14

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 18, en la dosificación 1:4, el mortero patrón elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada presentó una resistencia de 8,53 MPa en el primer

grupo y con 0% arena natural y 100% arena reciclada presento un valor de 5,03 MPa. Esta diferencia confirma la variabilidad existente entre las mezclas.

En la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada alcanzó una resistencia promedio de 8,10 MPa; el valor promedio con la mezcla 25 % arena natural y 75 % arena reciclada fue 5,43 MPa. La mezcla con 50% arena natural y 50 % arena reciclada presentó una resistencia promedio de 6,27 MPa, con valores individuales entre 5,8 MPa y 6,5 MPa.

En la Tabla 19 se presenta la variación porcentual de las mezclas con arena reciclada respecto a las mezclas patrón en cada serie.

Tabla 20. Variación de resistencia respecto al mortero patrón en dosificación 1:4

Arena reciclada (%)	Resistencia promedio (MPa)	Variación (%)	Interpretación
0	8,53	0,00	Mezcla patrón
25	8,10	-5,04	Reducción leve
50	6,27	-26,50	Reducción moderada
75	5,43	-36,34	Reducción significativa
100	5,03	-41,03	Reducción alta

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Tabla 19 evidencia que la dosificación 1:4 presentó un comportamiento menos uniforme que la dosificación 1:3, las sustituciones de 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada generaron reducciones de 5,04 %, 26,50 %, 36,34 %, 41,03 %, respectivamente. Este resultado permite establecer que la dosificación 1:4 es más probable a reducir su resistencia con la incorporación de la arena reciclada, esto compromete a la integridad mecánica del mortero de manera más pronunciada.

La resistencia promedio a compresión de las mezclas con dosificación 1:4 se presenta en la Figura 28. La gráfica evidencia diferencias entre series, por lo que los resultados se interpretan de acuerdo con los grupos reportados en los informes de laboratorio.

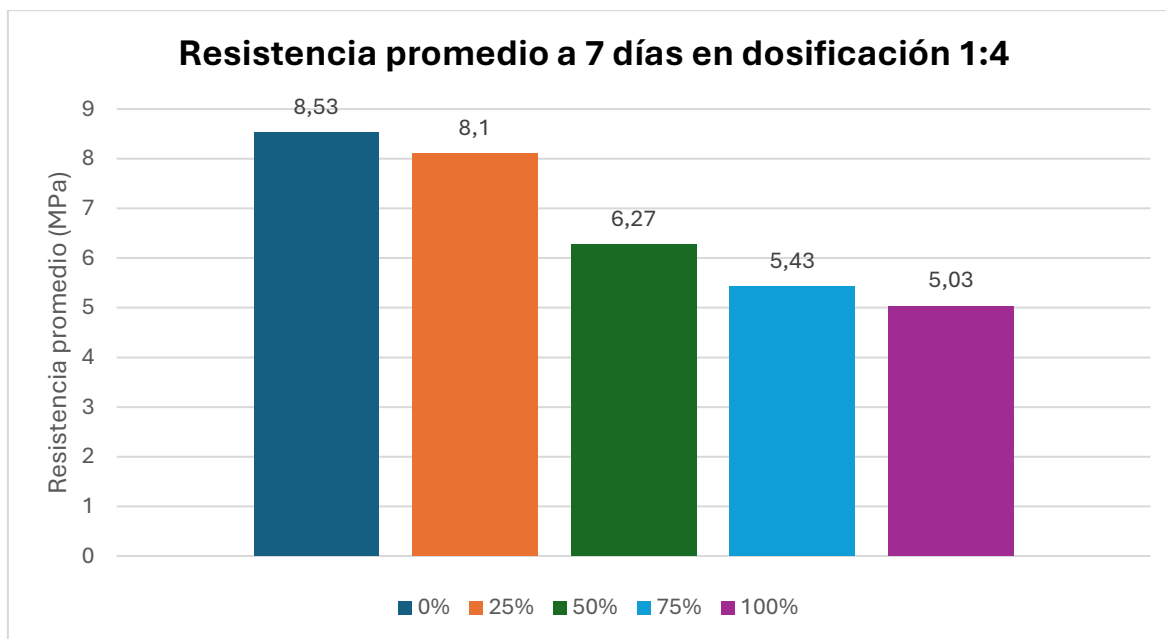


Figura 21. Resistencia promedio a compresión a 7 días en dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En términos generales, los resultados a 7 días indican que la dosificación 1:4 presentó resistencias menores y más dispersas que la dosificación 1:3. Esta diferencia puede asociarse a la menor proporción de cemento en la mezcla 1:4 y a la variabilidad propia de las series reportadas. Sin embargo, los resultados disponibles permiten observar que la incorporación de arena reciclada en porcentajes bajos puede mantener valores cercanos al patrón, especialmente cuando se analiza dentro de una misma serie experimental.

3.6.3 Resistencia a compresión a los 28 días

En la dosificación 1:4 se evaluaron las mismas proporciones de sustitución de arena natural por arena reciclada. Esta dosificación presentó resistencias inferiores a la relación 1:3, lo cual se relaciona con la menor proporción de cemento dentro de la mezcla. Los resultados individuales se presentan en la Tabla 20.

Tabla 21. Resultados de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:4

Arena		Flujo (%)	Densidad (kg/m ³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
Natural (%)	Reciclada (%)				
100	0	115	2027	35,18	13,2
100	0	115	2044	33,46	12,8
100	0	115	2075	38,85	14,7
75	25	106	2034	42,55	15,7

75	25	106	2072	42,47	16,1
75	25	106	2026	39,23	14,2
50	50	112	2004	32,80	12,5
50	50	112	1999	33,25	12,5
50	50	112	2014	31,91	12,1
25	75	112	2007	27,93	10,9
25	75	112	2028	29,26	11,5
25	75	112	2000	30,14	11,7
0	100	112	1975	25,11	9,8
0	100	112	1966	25,41	9,9
0	100	112	1967	26,61	10,3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la Tabla 20 se observa que el mortero patrón con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada presentó resistencias entre 12,8 MPa y 14,7 MPa. La mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada alcanzó valores entre 14,2 MPa y 16,1 MPa, superando al patrón en términos de resistencia promedio. La combinación con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada registró resistencias entre 12,1 MPa y 12,5 MPa, mientras que la mezcla con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada presentó valores entre 10,9 MPa y 11,7 MPa. El mortero elaborado con 0 % arena natural y 100 % arena reciclada obtuvo las resistencias más bajas de esta dosificación, con valores entre 9,8 MPa y 10,3 MPa.

Tabla 22. Resumen de resistencia a compresión a 28 días en dosificación 1:4

Arena		Resistencia promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Natural (%)	Reciclada (%)	MPa				(%)
100	0	13,57	12,8	14,7	1,00	7,39
75	25	15,33	14,2	16,1	1,00	6,54
50	50	12,37	12,1	12,5	0,23	1,87
25	75	11,37	10,9	11,7	0,42	3,66
0	100	10,00	9,8	10,3	0,26	2,65

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 21, la mayor resistencia promedio en la dosificación 1:4 correspondió a la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada, con 15,33 MPa.

Este valor fue superior al mortero patrón, elaborado con 100% arena natural y 0 % arena reciclada, que alcanzó 13,57 MPa.

A partir del 50 % de arena reciclada, la resistencia promedio disminuyó. La mezcla con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada obtuvo 12,37 MPa, la combinación con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada alcanzó 11,37 MPa, y el mortero con 0 % arena natural y 100 % arena reciclada registró 10,00 MPa. Estos resultados evidencian que, al igual que en la dosificación 1:3, la sustitución baja de arena reciclada presentó el mejor comportamiento mecánico a 28 días.

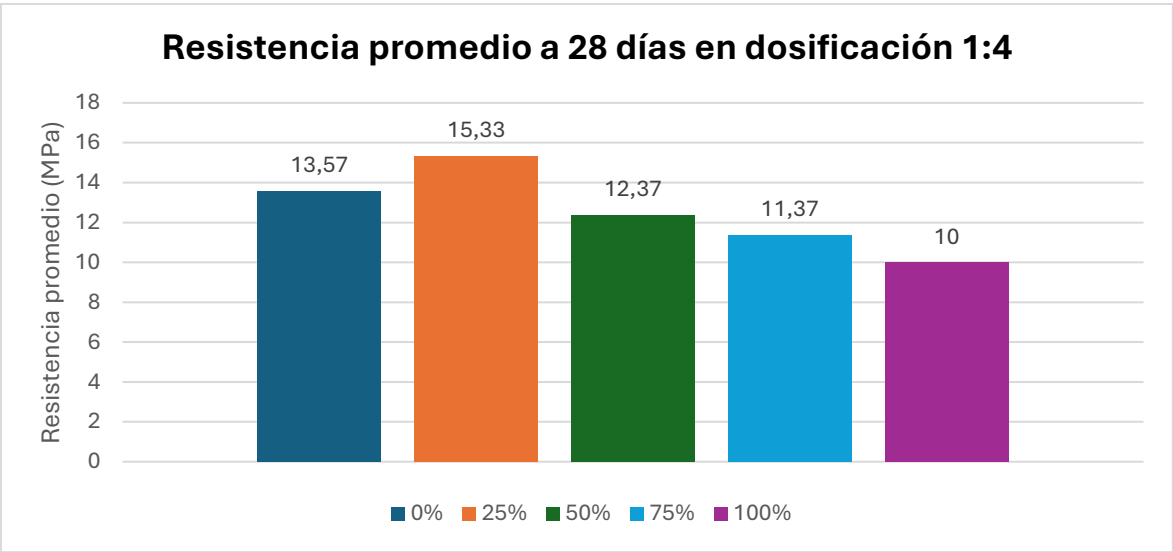


Figura 22. Resistencia promedio a compresión a 28 días en dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

3.6.4 Comparación entre resistencias a 7 y 28 días

En la dosificación 1:4, la comparación entre los 7 y 28 días se realizó con los grupos que cuentan con registros correspondientes en ambas edades. En la Tabla 22 se presenta la evolución de la resistencia promedio para cada porcentaje de sustitución evaluado.

Tabla 23. Comparación de resistencia a compresión entre 7 y 28 días en 1:4

Arena		Resistencia (MPa)		Incremento	
Natural (%)	Reciclada (%)	7 días	28 días	MPa	%
100	0	8,53	13,57	5,04	59,09
75	25	8,10	15,33	7,23	89,26
50	50	6,27	12,37	6,10	97,29
25	75	5,43	11,37	5,94	109,39
0	100	5,03	10,00	5,00	98,81

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 22, la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó la mayor resistencia promedio a los 28 días, con 15,33 MPa, superando al mortero patrón, que alcanzó 13,57 MPa. Esta misma mezcla registró un incremento de 7,23 MPa entre los 7 y 28 días, equivalente a 89,26 %.

La mezcla con 50 % arena natural y 50 % arena reciclada aumentó de 6,27 MPa a 12,37 MPa, mientras que la mezcla con 25 % arena natural y 75 % arena reciclada pasó de 5,43 MPa a 11,37 MPa. Aunque esta última presentó el mayor incremento porcentual, con 109,39 %, su resistencia final fue menor que la del patrón y que la mezcla con 25 % de arena reciclada.

En la dosificación 1:4, la evolución de resistencia también evidencia que el 25 % de arena reciclada fue la proporción con mejor desempeño a los 28 días. Las mezclas con porcentajes superiores de arena reciclada aumentaron su resistencia con la edad, pero no alcanzaron el valor promedio obtenido por la combinación con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada.

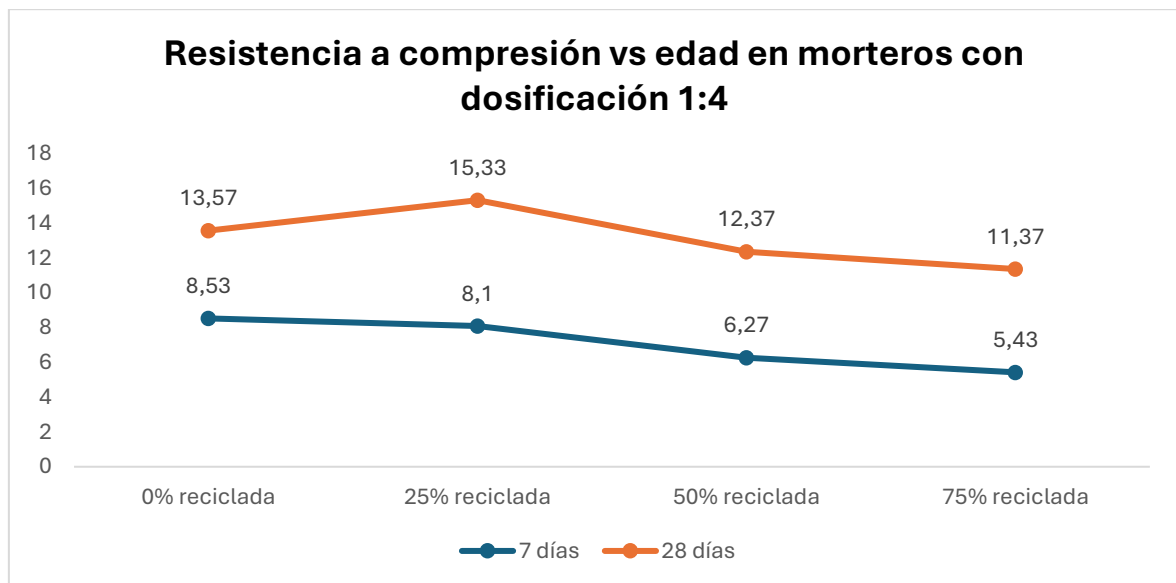


Figura 23. Resistencia a compresión vs edad en morteros con dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La evolución de la resistencia promedio entre los 7 y 28 días para la dosificación 1:4 se presenta en la Figura 30. La gráfica muestra que las mezclas incrementaron su resistencia con el tiempo de curado, destacándose la mezcla con 25 % de arena reciclada por presentar la mayor resistencia promedio a los 28 días.

La comparación entre edades muestra que todas las mezclas incrementaron su resistencia a compresión entre los 7 y 28 días. En ambas dosificaciones, la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó el mejor desempeño a los 28 días, superando al mortero patrón en resistencia promedio.

La dosificación 1:3 alcanzó resistencias superiores a la dosificación 1:4, lo cual se relaciona con su mayor proporción de cemento. Sin embargo, en ambas relaciones se observó una tendencia similar: la sustitución baja de arena reciclada presentó el comportamiento más favorable, mientras que los porcentajes más altos de sustitución redujeron la resistencia final del mortero.

3.6.5 Registro visual de las mezclas

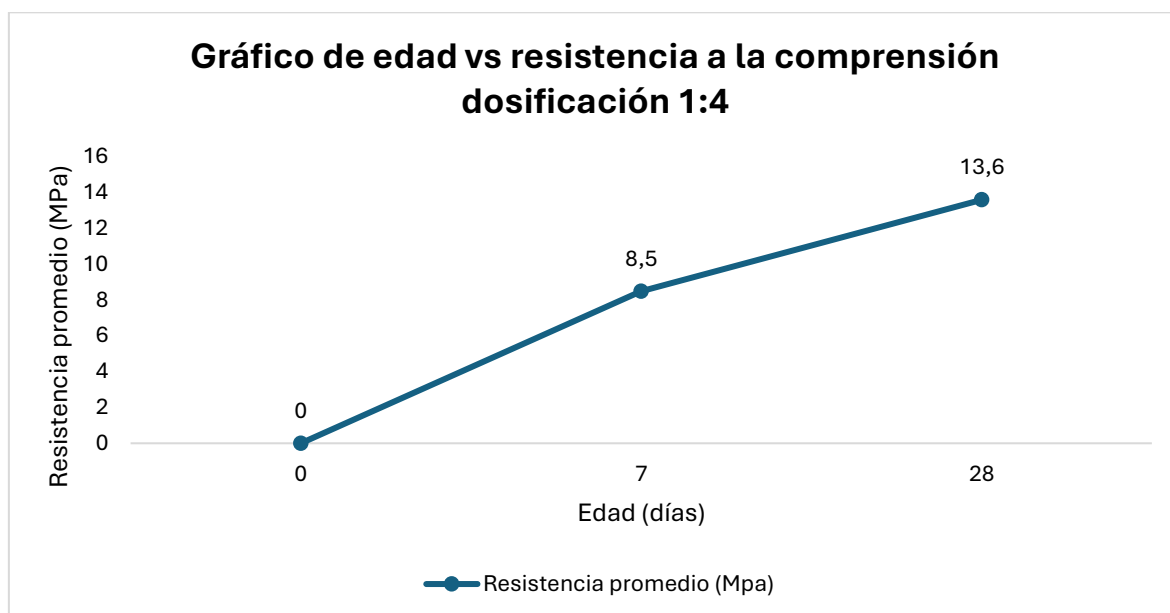


Figura 24. 100 % arena natural en dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Figura 31 muestra que el mortero patrón con 100 % arena natural incrementó su resistencia promedio de 8,5 MPa a los 7 días a 13,6 MPa a los 28 días. Este comportamiento evidencia el desarrollo de resistencia con el curado y sirve como referencia para comparar las mezclas con incorporación de arena reciclada en la dosificación 1:4.

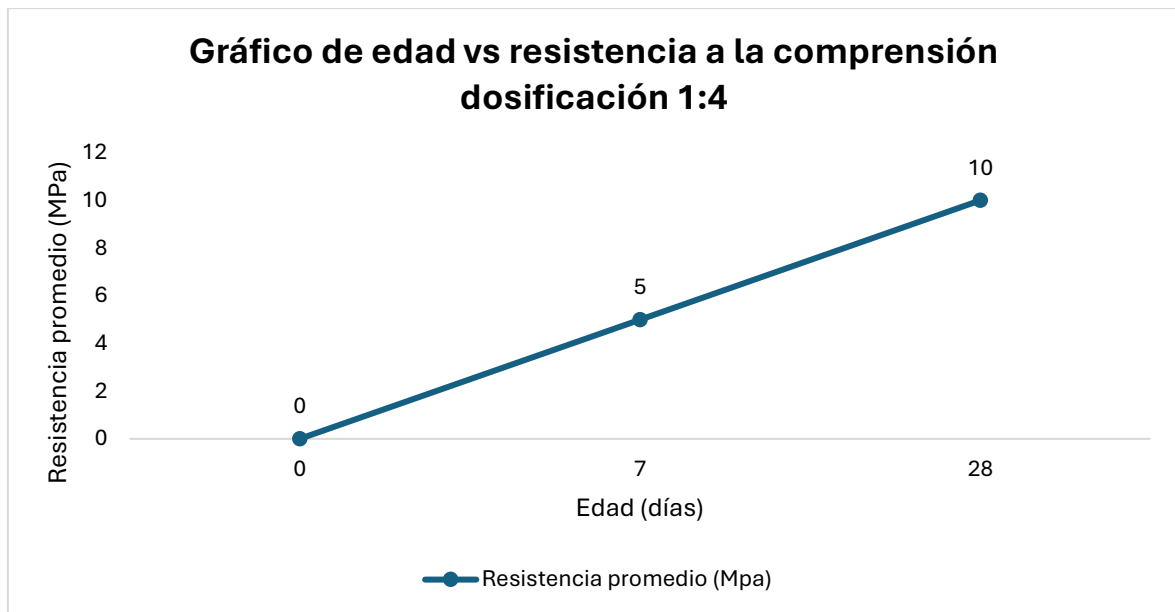


Figura 25. 100 % arena reciclada en dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 100 % arena reciclada aumentó su resistencia promedio de 5,0 MPa a los 7 días a 10,0 MPa a los 28 días. Aunque presentó incremento con la edad, sus valores fueron los más bajos dentro de la dosificación 1:4, lo que demuestra que el reemplazo total de arena natural redujo el desempeño mecánico del mortero.

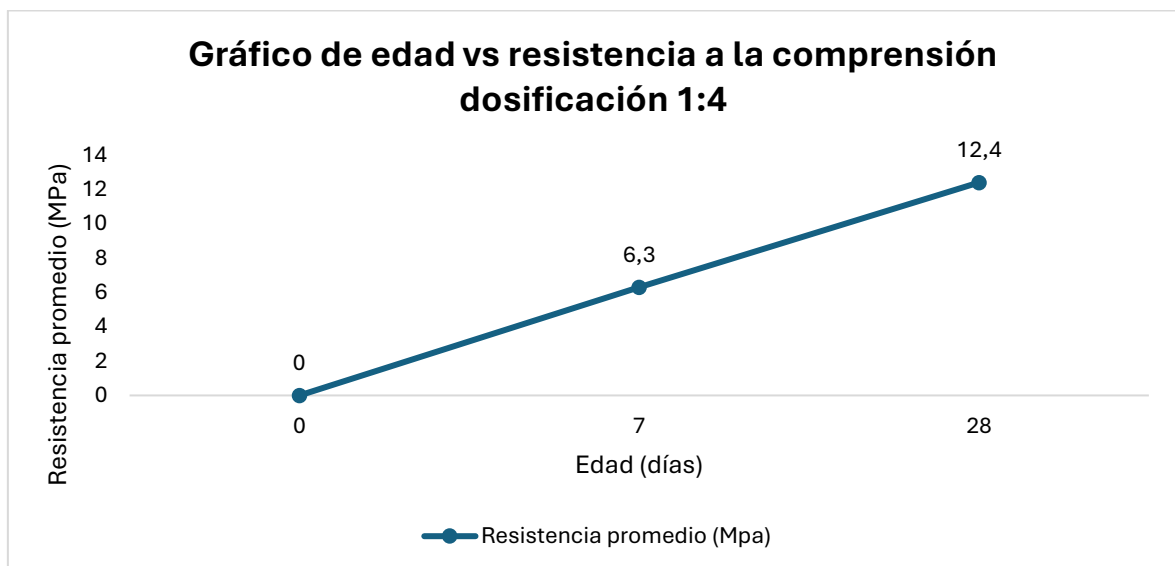


Figura 26. 50 % arena reciclada – 50 % arena natural en dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 50 % arena reciclada y 50 % arena natural pasó de 6,3 MPa a los 7 días a 12,4 MPa a los 28 días. Este resultado muestra una mejora considerable con el curado, aunque la resistencia final fue menor que la obtenida por el mortero patrón y por la mezcla con 25 % de arena reciclada.

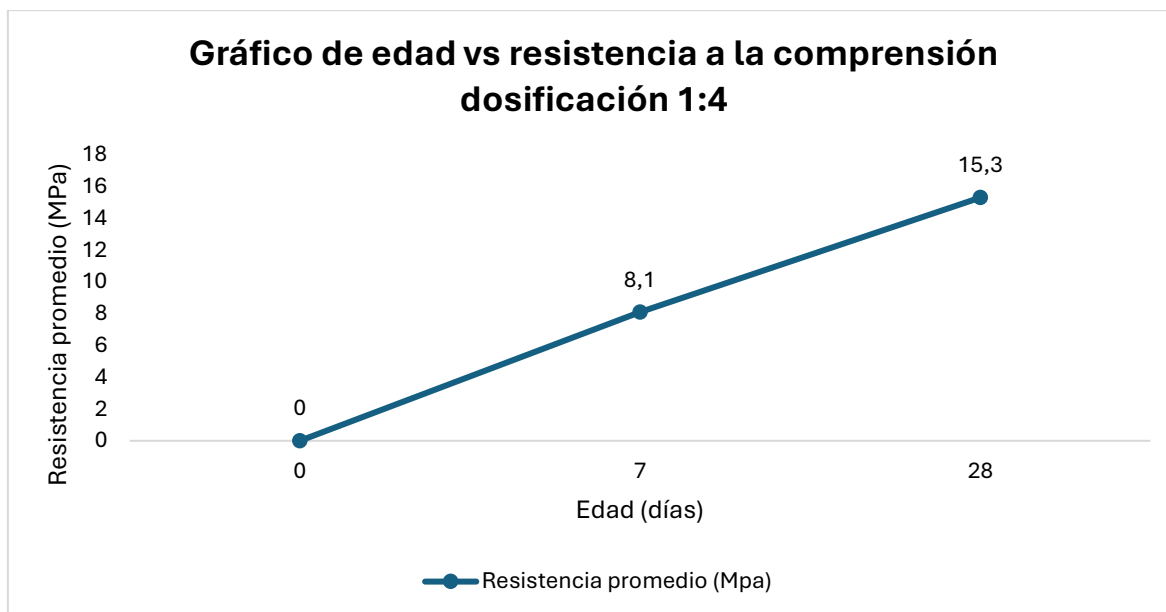


Figura 27. 25 % arena reciclada – 75 % arena natural en dosificación 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 25 % arena reciclada y 75 % arena natural presentó el mejor comportamiento dentro de la dosificación 1:4, al aumentar de 8,1 MPa a los 7 días a 15,3 MPa a los 28 días. Este resultado indica que una sustitución baja de arena reciclada permitió superar la resistencia del mortero patrón en esta dosificación.

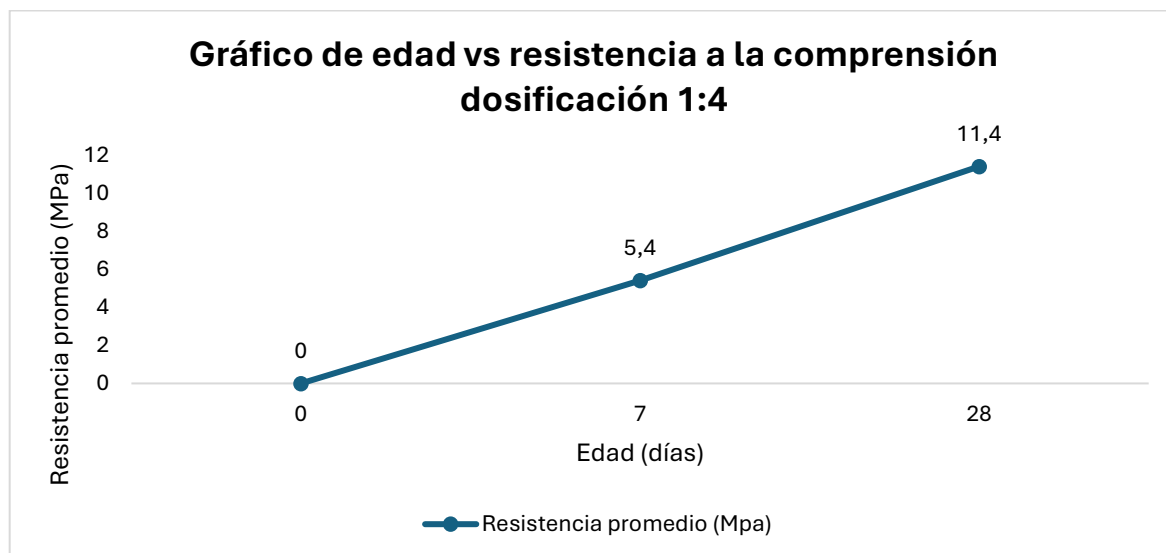


Figura 28. 75 % arena reciclada – 25 % arena natural en dosificación 1:4

Fuente (Defaz y Pacheco, 2026)

La mezcla con 75 % arena reciclada y 25 % arena natural incrementó su resistencia promedio de 5,4 MPa a los 7 días a 11,4 MPa a los 28 días. Aunque la ganancia de resistencia fue evidente, el valor final fue menor que el obtenido con 25 % y 50 % de arena reciclada, lo que confirma que porcentajes altos de sustitución reducen el desempeño mecánico.

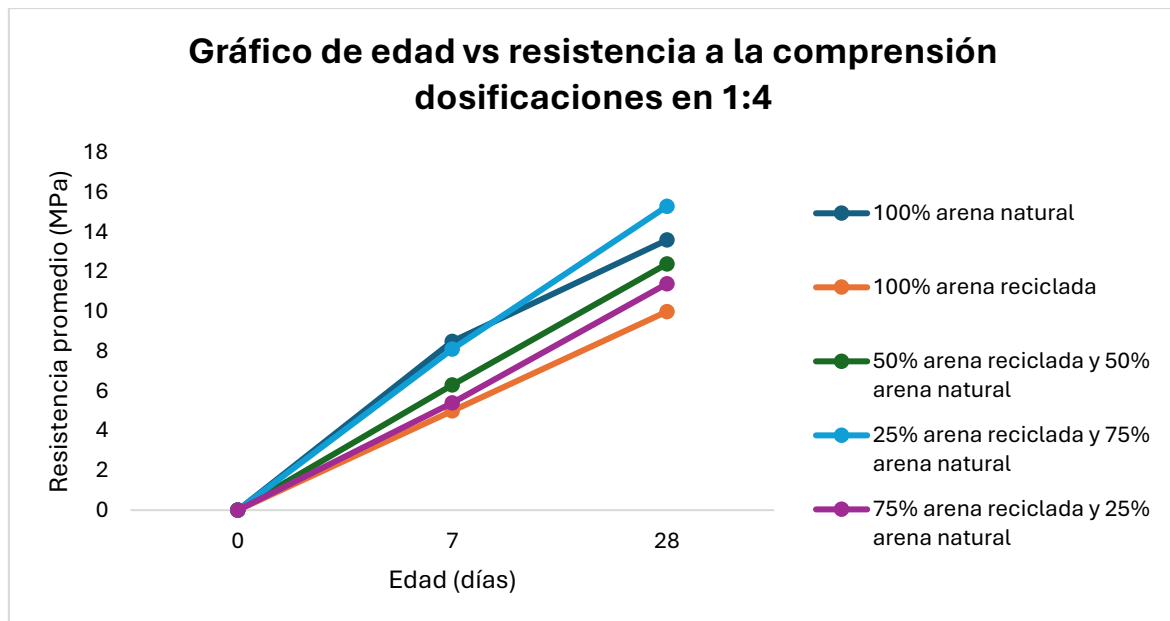


Figura 29. Dosificaciones en 1:4

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La comparación general de la dosificación 1:4 muestra que todas las mezclas aumentaron su resistencia entre los 7 y 28 días. La mejor mezcla fue la de 25 % arena reciclada y 75 % arena natural, porque alcanzó la mayor resistencia promedio a los 28 días, con 15,3 MPa. En cambio, la mezcla con 100 % arena reciclada presentó el menor desempeño, por lo que el reemplazo total no resultó favorable.

Al comparar ambas dosificaciones, la relación 1:3 presentó el mejor desempeño mecánico general, debido a que alcanzó resistencias superiores a la dosificación 1:4 en todos los porcentajes de sustitución. La mezcla más favorable de todo el estudio fue la de 25 % arena reciclada y 75 % arena natural en dosificación 1:3, con una resistencia promedio de 21,1 MPa a los 28 días. Por tanto, esta dosificación se identifica como la alternativa con mejor comportamiento mecánico entre las mezclas evaluadas.

Estas explicaciones están respaldadas por la literatura científica sobre morteros y hormigones con agregados reciclados y justifican adecuadamente por qué una sustitución del 25 % de arena reciclada puede alcanzar una resistencia incluso superior a la del mortero elaborado con 100 % de arena natural.

1. Curado interno debido a la alta absorción de agua de la arena reciclada

La arena reciclada posee una mayor capacidad de absorción de agua debido al mortero adherido y a su mayor porosidad. Durante el proceso de hidratación del cemento, parte de esta agua absorbida se libera gradualmente hacia la pasta, favoreciendo un curado

interno que mejora la hidratación del cemento, reduce la autodesecación y la formación de micro fisuras, lo que se traduce en un incremento de la resistencia a la compresión.

2. Mejor empaquetamiento de las partículas

La combinación de arena natural con un 25 % de arena reciclada puede generar una distribución granulométrica más eficiente, permitiendo que las partículas ocupen mejor los espacios vacíos entre sí. Este efecto reduce la porosidad del mortero, aumenta la compacidad de la matriz cementicia y favorece una mayor resistencia mecánica.

3. Mayor rugosidad superficial de la arena reciclada

Las partículas de arena reciclada presentan una superficie más rugosa e irregular como consecuencia del proceso de trituración del hormigón. Esta característica mejora el anclaje mecánico entre el agregado y la pasta de cemento, fortaleciendo la zona de transición interfacial (ITZ), considerada una de las regiones más críticas para la resistencia del mortero.

4. Efecto de relleno (filler) de las partículas finas.

Durante el proceso de trituración se generan partículas finas de mortero adherido que, cuando se incorporan en pequeñas cantidades, rellenan los poros existentes entre los agregados y la pasta de cemento. Este efecto de micro relleno incrementa la densidad del mortero, disminuye la porosidad y contribuye al aumento de la resistencia a la compresión.

En conjunto, estos cuatro mecanismos explican por qué un reemplazo moderado del 25 % de arena reciclada puede optimizar la microestructura del mortero y producir una resistencia superior a la obtenida con arena natural al 100 %. Sin embargo, cuando el porcentaje de sustitución aumenta, predominan los efectos negativos asociados a la mayor porosidad y absorción de la arena reciclada, provocando una disminución gradual de la resistencia.

Tabla 23. Análisis numérico con respecto a la granulometría.

Granulometría Sustituciones parciales arena natural por reciclada					
Abertura (mm)	100 %Natural – 0 %Reciclada	75 %Natural – 25 %Reciclada	50 %Natural – 50 %Reciclada	25 %Natural – 75 %Reciclada	0 %Natural – 100%Reciclada
9.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100

4.75	98.55	98.91	99.28	99.64	100
2.36	88.79	86.46	84.13	81.79	79.46
1.18	71.15	67.41	63.67	59.92	56.18
0.6	46.67	44.46	42.26	40.05	37.84
0.3	24.68	24.53	24.38	24.23	24.08
0.15	5.22	7.45	9.68	11.90	14.13
0.075	1.38	2.74	4.09	5.45	6.80

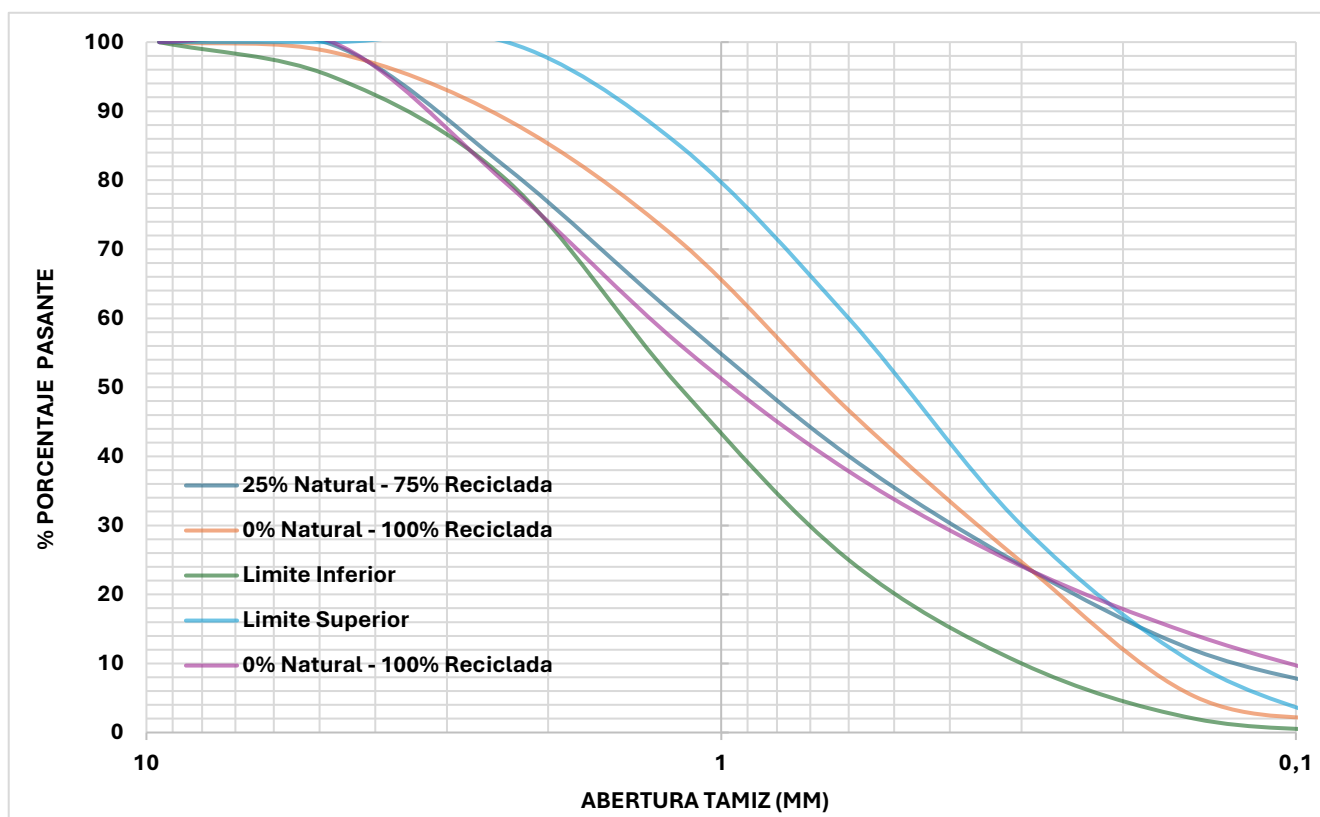


Figura 37. Análisis granulométrico del resultado con 75 % natural y 25 % reciclada.

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

3.7 Análisis estadístico inferencial de la resistencia a compresión

Con el propósito de determinar si las diferencias observadas en la resistencia a compresión a los 28 días fueron estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza factorial. Este procedimiento permitió evaluar el efecto de dos factores principales:

la dosificación del mortero, correspondiente a las relaciones 1:3 y 1:4, y el porcentaje de arena reciclada, considerado en los niveles de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %.

La variable dependiente fue la resistencia a compresión a los 28 días, expresada en MPa. Cada combinación experimental estuvo conformada por tres probetas cúbicas, lo que permitió comparar el comportamiento mecánico de los morteros según la dosificación y el porcentaje de sustitución de arena natural por arena reciclada.

Para el análisis se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas:

- **Hipótesis nula, H_0 :** La dosificación del mortero y el porcentaje de arena reciclada no generan diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a compresión a los 28 días.
- **Hipótesis alternativa, H_1 :** La dosificación del mortero, el porcentaje de arena reciclada o la interacción entre ambos factores generan diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a compresión a los 28 días.

El criterio de decisión se estableció con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Por tanto, cuando el valor de significancia fue menor a 0,05, se consideró que existía una diferencia estadísticamente significativa.

3.7.1 Estadísticos por dosificación y porcentaje de arena reciclada

Antes de interpretar el ANOVA (Análisis de varianza), se revisaron los valores promedio de resistencia a compresión a los 28 días para cada combinación experimental. En la Tabla 23 se presentan las medias y desviaciones estándar obtenidas para las dosificaciones 1:3 y 1:4.

Tabla 24. Estadísticos descriptivos de resistencia a compresión a 28 días

Dosificación	Arena reciclada (%)	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)	N
1:3	0	19,77	0,25	3
1:3	25	21,10	0,60	3
1:3	50	17,60	0,36	3
1:3	75	17,37	0,25	3
1:3	100	14,13	0,21	3
1:4	0	13,57	1,00	3
1:4	25	15,33	1,00	3

1:4	50	12,37	0,23	3
1:4	75	11,37	0,42	3
1:4	100	10,00	0,26	3

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 23 muestran que, en ambas dosificaciones, la mezcla con 75 % arena natural y 25 % arena reciclada presentó la mayor resistencia promedio. En la dosificación 1:3, esta mezcla alcanzó 21,10 MPa, mientras que en la dosificación 1:4 obtuvo 15,33 MPa. En los dos casos, el valor fue superior al mortero patrón elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada.

También se observa que las mezclas con 100 % arena reciclada registraron los valores promedio más bajos en ambas dosificaciones. En la relación 1:3, la resistencia fue de 14,13 MPa, mientras que en la relación 1:4 fue de 10,00 MPa. Este comportamiento evidencia que el incremento total de arena reciclada reduce el desempeño mecánico del mortero a los 28 días.

3.7.2 Prueba de homogeneidad de varianzas

La prueba de Levene se aplicó para verificar si las varianzas de los grupos podían considerarse homogéneas. En los resultados obtenidos se identificaron diferentes criterios de cálculo, por lo que se consideró la interpretación a partir de la mediana, debido a que este criterio es menos sensible a variaciones puntuales entre grupos.

Tabla 25. Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error

Criterio	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Se basa en la media	3,124	9	20	0,016
Se basa en la mediana	0,699	9	20	0,702
Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,699	9	7,150	0,698
Se basa en la media recortada	2,851	9	20	0,024

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

De acuerdo con la Tabla 24, el valor de significancia basado en la mediana fue 0,702, superior a 0,05. Por tanto, bajo este criterio se considera que las varianzas entre los grupos son homogéneas. Aunque

el criterio basado en la media presentó una significancia menor a 0,05, el diseño experimental fue balanceado, con tres probetas por cada combinación, lo que permite continuar con el análisis de varianza considerando la lectura conjunta de los resultados.

3.7.3 ANOVA factorial para resistencia a compresión a 28 días

El ANOVA factorial permitió evaluar el efecto de la dosificación del mortero, el porcentaje de arena reciclada y la interacción entre ambos factores sobre la resistencia a compresión a los 28 días. Los resultados se presentan en la Tabla 25.

Tabla 26. ANOVA factorial para resistencia a compresión a 28 días

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado
Modelo corregido	359,005	9	39,889	134,610	<0,001	0,984
Dosificación	224,133	1	224,133	756,355	<0,001	0,974
Arena reciclada	130,755	4	32,689	110,311	<0,001	0,957
Dosificación × arena reciclada	4,117	4	1,029	3,473	0,026	0,410
Error	5,927	20	0,296	-	-	-
Total	364,932	29	-	-	-	-

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 25 muestran que la dosificación del mortero presentó un valor de significancia menor a 0,001, por lo que se concluye que la relación 1:3 y la relación 1:4 generan diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a compresión a los 28 días. Esto confirma que la proporción cemento: arena influye directamente en el desempeño mecánico del mortero.

El porcentaje de arena reciclada también presentó una significancia menor a 0,001, lo que indica que el nivel de sustitución de arena natural por arena reciclada influye significativamente en la resistencia. Por tanto, las diferencias observadas entre 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada no son únicamente variaciones numéricas, sino diferencias estadísticamente comprobadas.

La interacción entre dosificación y porcentaje de arena reciclada presentó una significancia de 0,026, menor a 0,05. Esto significa que el efecto de la arena reciclada no fue exactamente igual en las dos dosificaciones. En otras palabras, el comportamiento de la sustitución varió según se tratara de un mortero 1:3 o 1:4.

3.7.4 Comparación entre dosificaciones

La comparación entre dosificaciones permitió establecer la diferencia general de resistencia entre los morteros 1:3 y 1:4, considerando todos los porcentajes de arena reciclada.

Tabla 27. Comparación de medias marginales según dosificación

Dosificación	Media estimada (MPa)	Error estándar	Límite inferior 95 %	Límite superior 95 %
1:3	17,993	0,141	17,700	18,287
1:4	12,527	0,141	12,233	12,820

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Tabla 26 muestra que la dosificación 1:3 alcanzó una media estimada de 17,993 MPa, mientras que la dosificación 1:4 obtuvo 12,527 MPa. La diferencia entre ambas dosificaciones fue de 5,467 MPa, con una significancia menor a 0,001. Esto confirma que la dosificación 1:3 presentó un desempeño mecánico significativamente superior al de la dosificación 1:4.

3.7.5 Comparación múltiple según porcentaje de arena reciclada

Debido a que el ANOVA evidenció diferencias significativas entre los porcentajes de arena reciclada, se aplicó la prueba post hoc de Tukey. Esta prueba permitió identificar entre qué niveles de sustitución se presentaron diferencias estadísticamente significativas.

Para facilitar la interpretación, en la Tabla 27 se presentan únicamente las comparaciones principales respecto al mortero patrón, elaborado con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada, y las comparaciones relevantes entre porcentajes consecutivos.

Tabla 28. Comparación múltiple de Tukey según porcentaje de arena reciclada

Comparación	Diferencia de medias	Sig.	Interpretación
0 % vs 25 %	- 1,550	<0,001	El 25 % de arena reciclada presenta mayor resistencia que el patrón
0 % vs 50 %	1,683	<0,001	El 50 % presenta menor resistencia que el patrón
0 % vs 75 %	2,300	<0,001	El 75 % presenta menor resistencia que el patrón
0 % vs 100 %	4,600	<0,001	El 100 % presenta menor resistencia que el patrón
25 % vs 50 %	3,233	<0,001	Existe diferencia significativa
50 % vs 75 %	0,617	0,319	No existe diferencia significativa

75 % vs 100 %	2,300	<0,001	Existe diferencia significativa
---------------	-------	--------	---------------------------------

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 27 muestran que la mezcla con 25 % de arena reciclada presentó una resistencia significativamente superior al mortero patrón. Esto significa que, considerando ambas dosificaciones, la sustitución parcial baja no redujo la resistencia, sino que generó el comportamiento promedio más favorable.

Las mezclas con 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada sí presentaron diferencias significativas frente al patrón. En estos casos, la diferencia de medias fue positiva al comparar el patrón contra dichos porcentajes, lo que indica que el mortero patrón obtuvo mayor resistencia que esas combinaciones.

La comparación entre 50 % y 75 % de arena reciclada presentó una significancia de 0,319, superior a 0,05. Esto indica que estos dos porcentajes tuvieron un comportamiento estadísticamente similar. En cambio, el 100 % de arena reciclada se diferenció significativamente de los demás porcentajes, ubicándose como el nivel con menor resistencia promedio.

3.7.6 Subconjuntos homogéneos de Tukey

Los subconjuntos homogéneos permiten agrupar los porcentajes de arena reciclada que no presentan diferencias significativas entre sí. Estos resultados facilitan la interpretación de la prueba de Tukey, ya que muestran qué grupos tienen comportamientos estadísticos similares.

Tabla 29. Subconjuntos homogéneos de Tukey para resistencia a 28 días

Arena reciclada (%)	N	Subconjunto 1	Subconjunto 2	Subconjunto 3	Subconjunto 4
100	6	12,067	-	-	-
75	6	-	14,367	-	-
50	6	-	14,983	-	-
25	6	-	-	-	18,217
0	6	-	-	16,667	-

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

La Tabla 28 muestra que los porcentajes de 50 % y 75 % de arena reciclada se ubican dentro del mismo subconjunto homogéneo, lo que confirma que entre ambos no existe diferencia estadísticamente significativa. En cambio, los porcentajes de 0 %, 25 % y 100 %

se ubican en subconjuntos distintos, lo que indica diferencias significativas en sus resistencias promedio.

El porcentaje de 25 % de arena reciclada se ubicó en el subconjunto con mayor media, con 18,217 MPa, considerando el promedio general de ambas dosificaciones. Este resultado confirma que dicho nivel de sustitución fue el más favorable desde el punto de vista estadístico.

3.7.7 Interpretación estadística

El análisis inferencial permitió confirmar que la resistencia a compresión a los 28 días depende tanto de la dosificación como del porcentaje de arena reciclada. La dosificación 1:3 presentó resistencias significativamente superiores a la dosificación 1:4, lo cual se relaciona con su mayor contenido de cemento dentro de la mezcla.

También se comprobó que el porcentaje de arena reciclada influye significativamente en la resistencia. El 25 % de sustitución presentó el mejor comportamiento estadístico, ya que alcanzó la media general más alta y se diferenció significativamente del mortero patrón. En cambio, los porcentajes de 50 %, 75 % y 100 % redujeron la resistencia en comparación con la mezcla de referencia, especialmente el reemplazo total con arena reciclada.

La interacción entre dosificación y porcentaje de arena reciclada indica que el efecto del agregado reciclado cambia según la relación cemento: arena utilizada. Por esta razón, la selección de una dosificación no debe basarse únicamente en el porcentaje de sustitución, sino también en la relación de mezcla empleada. En conjunto, los resultados estadísticos respaldan que la sustitución del 25 % de arena natural por arena reciclada presentó el mejor desempeño mecánico a los 28 días, tanto en el análisis descriptivo como en el inferencial.

3.8 Verificación normativa de las dosificaciones

La verificación normativa de las dosificaciones se realizó con base en la resistencia promedio a compresión obtenida a los 28 días, debido a que esta edad de curado se utiliza como referencia para clasificar el desempeño mecánico del mortero endurecido. Los resultados fueron contrastados con los valores mínimos establecidos para morteros de mampostería, considerando las categorías M, S, N y O.

Esta clasificación permite relacionar la resistencia del mortero con su posible uso técnico. El mortero Tipo M corresponde a la categoría de mayor resistencia, seguido por el Tipo S. Los morteros Tipo N y Tipo O se asocian con aplicaciones de menor exigencia

mecánica. En la Tabla 29 se presentan los valores mínimos utilizados como criterio de comparación.

Tabla 30. Criterios de clasificación del mortero según resistencia a compresión a 28 días

Tipo de mortero	Resistencia mínima a 28 días	Resistencia mínima a 28 días	Criterio de uso general
M	2500 psi	17,2 MPa	Alta resistencia
S	1800 psi	12,4 MPa	Resistencia media-alta
N	750 psi	5,2 MPa	Uso general en mampostería
O	350 psi	2,4 MPa	Baja resistencia

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Para la verificación se consideraron los valores promedio de resistencia a compresión a los 28 días obtenidos en cada dosificación. Estos resultados reportan los ensayos de compresión cúbica para las dosificaciones 1:3 y 1:4 con porcentajes de sustitución de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada.

Verificación normativa de la dosificación 1:3

En la Tabla 30 se presenta la clasificación normativa de los morteros elaborados con dosificación 1:3. Esta relación contiene mayor proporción de cemento respecto a la arena, por lo que se esperaba un mejor comportamiento mecánico frente a la dosificación 1:4.

Tabla 31. Clasificación normativa de los morteros con dosificación 1:3

Arena (%)		Resistencia promedio a 28 días (MPa)	Clasificación alcanzada	Cumplimiento técnico
Natural	Reciclada			
100	0	19,77	Tipo M	Cumple como Tipo M
75	25	21,10	Tipo M	Cumple como Tipo M
50	50	17,60	Tipo M	Cumple como Tipo M
25	75	17,37	Tipo M	Cumple como Tipo M
0	100	14,13	Tipo S	Cumple como Tipo S

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 30 muestran que la dosificación 1:3 alcanzó un desempeño mecánico favorable. Las mezclas con 0 %, 25 %, 50 % y 75 % de arena reciclada superaron el límite mínimo requerido para mortero Tipo M, por lo que se ubican dentro de la categoría de mayor resistencia. Dentro de este grupo, la mezcla con 25 % de arena reciclada presentó el valor más alto, incluso por encima del mortero patrón elaborado únicamente con arena de cantera.

La mezcla con 100 % de arena reciclada presentó una resistencia menor que las demás combinaciones, por lo que no alcanzó la clasificación Tipo M. Sin embargo, su resultado fue suficiente para cumplir como mortero Tipo S. Esto indica que, aun con reemplazo total de arena de cantera por arena reciclada, la dosificación 1:3 mantiene un nivel de resistencia aceptable desde el punto de vista normativo, aunque con menor desempeño que las sustituciones parciales.

Verificación normativa de la dosificación 1:4

En la Tabla 31 se presenta la clasificación normativa de los morteros con dosificación 1:4. A diferencia de la relación 1:3, esta dosificación contiene menor proporción de cemento, por lo que su resistencia esperada es más baja.

Tabla 32. Clasificación normativa de los morteros con dosificación 1:4

Arena (%)		Resistencia promedio a 28 días (MPa)	Clasificación alcanzada	Cumplimiento técnico
Natural	Reciclada			
100	0	13,57	Tipo S	Cumple como Tipo S
75	25	15,33	Tipo S	Cumple como Tipo S
50	50	12,37	Tipo N	Cumple como Tipo N
25	75	11,37	Tipo N	Cumple como Tipo N
0	100	10,00	Tipo N	Cumple como Tipo N

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

Los resultados de la Tabla 31 muestran que la dosificación 1:4 alcanzó clasificaciones inferiores a las obtenidas en la relación 1:3. El mortero patrón y la mezcla con 25 % de arena reciclada cumplieron como morteros Tipo S, lo que indica un desempeño mecánico medio-alto. Nuevamente, la sustitución parcial del 25 % presentó el mejor resultado dentro de esta dosificación.

Las mezclas con 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada se clasificaron como morteros Tipo N. En el caso de la mezcla con 50 % de arena reciclada, el valor obtenido fue muy cercano al límite mínimo requerido para Tipo S; sin embargo, bajo un criterio estricto de clasificación, corresponde ubicarla como Tipo N. Esto evidencia que, en la dosificación 1:4, el incremento de arena reciclada reduce progresivamente la clasificación normativa del mortero.

Por lo expuesto, la verificación normativa evidencia que la dosificación 1:3 presentó mejor desempeño que la dosificación 1:4. En la relación 1:3, la mayoría de las mezclas alcanzó la categoría Tipo M, mientras que en la relación 1:4 solo las mezclas con 0 % y 25 % de arena reciclada llegaron a Tipo S. Esto confirma que el mayor contenido de cemento favorece la resistencia final del mortero y permite mantener mejores clasificaciones normativas aun con porcentajes elevados de sustitución.

Desde el punto de vista mecánico y normativo, la sustitución del 25 % de arena de cantera por arena reciclada fue la alternativa más favorable en ambas dosificaciones. Esta mezcla alcanzó la clasificación Tipo M en la relación 1:3 y Tipo S en la relación 1:4, por lo que representa el porcentaje de reemplazo con mejor equilibrio entre incorporación de material reciclado y cumplimiento técnico.

3.9 Análisis comparativo de costos

El análisis de costos se realizó en función del peso de los materiales y no del volumen, debido a que la dosificación por volumen puede generar variaciones cuando los agregados presentan distinta densidad aparente, humedad o grado de compactación. En el caso de los agregados reciclados, estas diferencias son más relevantes por su mayor porosidad y absorción, propiedades que modifican la masa contenida en un mismo volumen de material; Mora-Ortiz et al. (2022) señalan que los morteros con agregados finos reciclados presentan cambios en densidad aparente y contenido de aire en estado fresco, mientras que Mora-Ortiz et al. (2021) analizaron el pre humedecimiento del agregado reciclado como una estrategia para reducir su absorción durante la elaboración de morteros. Por esta razón, el cálculo por

peso permite una comparación más uniforme entre la arena natural y la arena reciclada, evitando que las diferencias volumétricas alteren la estimación de costos.

Para el cálculo se tomó como referencia 1 kg de cemento, debido a que las dosificaciones 1:3 y 1:4 expresan la relación entre cemento y arena. En la dosificación 1:3, por cada 1 kg de cemento se consideran 3 kg de arena total. En la dosificación 1:4, por cada 1 kg de cemento se consideran 4 kg de arena total.

Tabla 33. Conversión de costos unitarios por peso

Descripción	Unidad de compra	Cantidad equivalente	Precio unitario	Precio total convertido
Cemento	Saco de 50 kg	50 kg	USD 8,50 / saco	USD 0,170 / kg
Arena natural	Metro cúbico	1530 kg/m ³	USD 22,85 / m ³	USD 0,014 / kg
Arena reciclada	Metro cúbico	1340 kg/m ³	USD 26,00 / m ³	USD 0,019 / kg

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la Tabla 32 se muestran los precios unitarios de los materiales convertidos en costo por kilogramo, con el fin de llevar a cabo el análisis económico bajo un único criterio de comparación. El cemento se convirtió a partir del precio perdido por saco de 50 kg. Se calculó la arena natural y la arena reciclada a partir de su precio por metro cúbico y de la densidad aparente seca. Esta conversión permitió tener el costo real por unidad de masa y realizar la comparación de las dosificaciones sin tener que depender del volumen ocupado por cada agregado.

3.9.1 Análisis de costos para dosificación 1:3

En la dosificación 1:3, se tomó como base 1 kg de cemento y 3 kg de arena total. La arena total se distribuyó según los porcentajes de sustitución evaluados: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada.

Tabla 34. Costo por peso de mezclas con dosificación 1:3

Arena (%)		Cemento		Arena natural		Arena reciclada		Total (USD)
Natural	Reciclada	Cantidad (kg)	Costo (USD)	Cantidad (kg)	Costo (USD)	Cantidad (kg)	Costo (USD)	
100	0	1,00	0,170	3,00	0,042	0,00	0,000	0,212
75	25	1,00	0,170	2,25	0,032	0,75	0,014	0,216
50	50	1,00	0,170	1,50	0,021	1,50	0,029	0,220

25	75	1,00	0,170	0,75	0,011	2,25	0,043	0,224
0	100	1,00	0,170	0,00	0,000	3,00	0,057	0,227

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la dosificación 1:3, el menor costo correspondió a la mezcla con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada, con USD 0,212 por unidad base de cálculo. El mayor costo se obtuvo con la mezcla de 100 % arena reciclada, con USD 0,227. Esto muestra que el costo aumenta conforme se incrementa el porcentaje de arena reciclada, debido a que esta presenta un costo unitario mayor que la arena natural.

3.9.2 Análisis de costos para dosificación 1:4

En la dosificación 1:4, se tomó como base 1 kg de cemento y 4 kg de arena total. Al igual que en la dosificación anterior, la arena total se distribuyó según los porcentajes de sustitución de arena reciclada.

Tabla 35. Costo por peso de mezclas con dosificación 1:4

Arena (%)		Cemento		Arena natural		Arena reciclada		Total (USD)
Natural	Reciclada	Cantidad (kg)	Costo (USD)	Cantidad (kg)	Costo (USD)	Cantidad (kg)	Costo (USD)	
100	0	1,00	0,170	4,00	0,056	0,00	0,000	0,226
75	25	1,00	0,170	3,00	0,042	1,00	0,019	0,231
50	50	1,00	0,170	2,00	0,028	2,00	0,038	0,236
25	75	1,00	0,170	1,00	0,014	3,00	0,057	0,241
0	100	1,00	0,170	0,00	0,000	4,00	0,076	0,246

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En la dosificación 1:4, el menor costo correspondió a la mezcla con 100 % arena natural y 0 % arena reciclada, con USD 0,226. El mayor costo se obtuvo con la mezcla de 100 % arena reciclada, con USD 0,246. Al igual que en la dosificación 1:3, el incremento del contenido de arena reciclada elevó el costo total de la mezcla.

3.9.3 Comparación de costos entre dosificaciones

Tabla 36. Comparación general de costos por peso entre dosificaciones

Arena reciclada (%)	Costo (USD)		Diferencia (USD)
	1:3	1:4	
0	0,212	0,226	0,014
25	0,216	0,231	0,015
50	0,220	0,236	0,016

75	0,224	0,241	0,017
100	0,227	0,246	0,019

Fuente: (Defaz y Pacheco, 2026)

En el análisis económico realizado, la arena reciclada presentó un costo mayor en comparación con la arena natural. Para esta investigación se consideró un valor de 26,00 dólares por m³ de arena reciclada, correspondiente al valor utilizado para el desarrollo del estudio.

La arena reciclada fue proporcionada directamente por Holcim Ecuador, por lo que no se contó con un desglose detallado de los costos relacionados con su procesamiento, como trituración, clasificación, transporte, lavado, secado, consumo de energía y mano de obra.

Por esta razón, estos valores no fueron calculados de manera independiente, sino que se trabajó con el precio de 26,00 dólares por m³ considerado para el material reciclado ya que este valor fue relaciona con el costo que se vende en otros países que si reciclan los desechos contractivos para así obtener la arena reciclada.

El mayor costo de la arena reciclada puede estar relacionado con los procesos necesarios para obtener y preparar este tipo de material, además de su disponibilidad limitada en comparación con la arena natural. Sin embargo, este resultado corresponde a las condiciones económicas consideradas en la presente investigación.

Al comparar las diferentes mezclas, se observó que el costo aumenta conforme se incrementa el porcentaje de arena reciclada, debido a que su precio unitario fue mayor.

No obstante, al relacionar el costo con la resistencia a la compresión obtenida a los 28 días, la mezcla con 75 % de arena natural y 25 % de arena reciclada presentó el mejor comportamiento económico y mecánico. Por lo tanto, aunque la incorporación de arena reciclada incrementó el costo de la mezcla, la sustitución del 25 % resultó ser la alternativa más favorable entre las dosificaciones analizadas.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. La caracterización física permitió establecer que la arena reciclada presenta propiedades distintas a la arena natural, principalmente por su menor densidad relativa seca, distribución granulométrica y su mayor absorción de agua. Esta condición demuestra que la arena reciclada tiene una mayor capacidad de retención de humedad, lo que incide en la demanda de agua de las mezclas y constituye uno de los factores que condiciona el comportamiento fresco y endurecido del mortero. El incremento de porcentaje de arena reciclada modifica las propiedades del mortero fresco especialmente a la mayor absorción y angularidad de arena reciclada por lo que se requirió controlar las condiciones de mezclado para garantizar que los resultados experimentales sean comparables control de trabajabilidad mediante el ensayo de flujo permitió comparar las mezclas bajo condiciones relativamente equivalentes. Este control fue necesario para que las diferencias de resistencia se interpretaran principalmente en función del porcentaje de sustitución de la arena natural y no por cambios marcados en la fluidez del mortero.

2. Se fabricaron probetas con porcentajes de sustitución (0 % - 100 %; 25 % - 75 %; 50 % - 50 %; 75 % - 25 %; 100 % - 0 %) con las arenas correspondientes arena natural y arena reciclada las cuales se realizaron con las dosificaciones 1:3 y 1:4 en las que pudimos observar que en la dosificación 1:3, la sustitución del 25 % de arena natural por arena reciclada presentó el mejor comportamiento mecánico, tanto a los 7 como a los 28 días. Esta mezcla alcanzó una resistencia similar y superior al mortero patrón, lo que evidencia que una sustitución baja puede incorporarse sin afectar negativamente la resistencia a compresión. En la dosificación 1:4, el comportamiento también favoreció la sustitución del 25 % de arena reciclada, debido a que esta mezcla alcanzó la mayor resistencia promedio a los 28 días dentro de esa relación arena-cemento. Por tanto, las mezclas con 50 %, 75 % y 100 % de arena reciclada en las dosificaciones tanto 1:3 como 1:4 presentaron resistencias menores, lo que

confirma que el incremento del contenido reciclado reduce la capacidad resistente del mortero cuando supera niveles bajos de sustitución.

3. El análisis estadístico mediante ANOVA factorial evidenció diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a la compresión a los 28 días asociadas a la dosificación cemento: arena y al porcentaje de sustitución de arena natural por reciclada ($p < 0,001$). Asimismo, la interacción entre ambos factores fue significativa ($p = 0,026$), indicando que el efecto de la sustitución depende de las dosificaciones utilizadas. La comparación múltiple de Tukey identificó al 25 % de arena reciclada utilizada. La comparación múltiple de Tukey identificó al 25 % de arena reciclada como el nivel con mayor resistencia promedio global.

4. La verificación normativa permitió identificar que las mezclas con dosificación 1:3 alcanzaron mejores niveles de clasificación resistente que las mezclas con dosificación 1:4. En la relación 1:3, las combinaciones con 0 %, 25%, 50 % y 75 % de arena reciclada alcanzaron la clasificación de mayor resistencia, mientras que la mezcla con 100 % arena reciclada descendió a una categoría inferior. En la relación 1:4, solo las mezclas con 0 % y 25 % de arena reciclada alcanzaron una clasificación superior, mientras que los porcentajes más altos se ubicaron en categorías de menor exigencia mecánica.

5. El análisis de costos permitió concluir que la evaluación económica debe realizarse por peso y no por volumen, debido a que la arena natural y la arena reciclada presentan densidades aparentes diferentes, lo que puede alterar la comparación cuando se trabaja volumétricamente. Bajo las condiciones experimentales evaluadas, la combinación 1:3 con 25 % de sustitución de arena natural por arena reciclada presentó el mejor desempeño integral, al combinar la mayor resistencia promedio a 28 días con un costo relativo por unidad de resistencia favorable; sin embargo, su selección para aplicaciones constructivas deberá condicionarse al cumplimiento de los requisitos normativos y a la evaluación de propiedades de durabilidad no abordadas en este estudio.

4.2 Recomendaciones

1. En esta investigación se realizó la caracterización física, densidad de los material, la resistencia a la compresión, costo y análisis estadístico, cabe mencionar que no se evaluó la durabilidad, adherencia, retratación, permeabilidad ni el comportamiento en muro real por lo tanto se recomienda que futuras investigaciones amplíen la evaluación del comportamiento de los morteros elaborados con arena reciclada mediante ensayos de durabilidad a mediano y largo plazo, considerando propiedades como la absorción de agua, permeabilidad, carbonatación, resistencia al ataque por sulfatos y ciclos de humedad-sequedad. La incorporación de estos análisis permitirá disponer de una evaluación más integral del desempeño del material, proporcionando información adicional para establecer su comportamiento bajo diferentes condiciones de exposición y fortalecer su posible aplicación en proyectos de construcción.

2. Se recomienda desarrollar investigaciones que evalúen el comportamiento de morteros con arena reciclada en condiciones reales de servicio, mediante su aplicación en elementos de mampostería o prototipos constructivos que permitan analizar su desempeño durante la ejecución de obras. La validación de los resultados obtenidos en laboratorio bajo escenarios de aplicación práctica contribuirá a generar mayor confianza técnica en el uso de este tipo de materiales y facilitará su incorporación dentro de proyectos de construcción que promuevan el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición.

3. Se recomienda ampliar el estudio incorporando diferentes fuentes de arena reciclada, relaciones arena-cemento y porcentajes de sustitución, con el propósito de establecer rangos de utilización que respondan a las características particulares de los materiales disponibles en distintas regiones del país. Asimismo, resulta conveniente incluir variables relacionadas con los costos de procesamiento, transporte y disponibilidad del agregado reciclado, permitiendo obtener un análisis técnico y económico más representativo para su posible implementación en el sector de la construcción ecuatoriano.

REFERENCIAS

- Arandigoyen, M., & Álvarez, J. I. (2019). Blended pastes of cement and lime: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252(23), 8077–8085. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.12.041>
- ASTM International. (2021). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete (ASTM C642-21). ASTM International.
- ASTM International. (2022). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136/C136M-22). ASTM International.
- ASTM International. (2022). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar (ASTM C1437-22). ASTM International.
- ASTM International. (2023). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (ASTM C109/C109M-23). ASTM International.
- ASTM International. (2023). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate (ASTM C128-23). ASTM International.
- Benítez-Díaz, P., & Ramos-Cañón, A. M. (2019). Evaluación mecánica de morteros de pega elaborados con arenas recicladas de demolición. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 289–308. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.305>
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2021). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.07.086>
- Coppola, L., Coffetti, D., Crotti, E., Gazzaniga, G., & Pastore, T. (2020). The durability of one-component alkali-activated slag-based mortars with recycled aggregates. *Sustainability*, 12(9), 3654. <https://doi.org/10.3390/su12093654>

- European Environment Agency. (2020). Sustainability of circular economy for construction and demolition waste in Europe. EEA Report No. 18/2020. European Environment Agency.
- Fonseca, N., de Brito, J., & Evangelista, L. (2017). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637–643. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.006>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). NTE INEN 872: Arenas para hormigón. Requisitos. INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2018). NTE INEN 488: Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista. INEN.
- Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2019). Combined economic and mechanical performance optimization of recycled aggregate concrete with high volume of fly ash. *Applied Sciences*, 8(7), 1189. <https://doi.org/10.3390/app8071189>
- Martínez-García, R., Guerra-Romero, M. I., Morán-del Pozo, J. M., Brito, J., & Juan-Valdés, A. (2020). Recycled aggregate concrete review focused on the transition region properties: A bibliometric analysis. *Materials*, 13(23), 5525. <https://doi.org/10.3390/ma13235525>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2021). Guía para la gestión integral de residuos de construcción y demolición. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.
- Mora-Ortiz, R. S., Díaz, S. A., & Del Angel, E. (2022). Recycled fine aggregates from mortar debris and red clay brick to fabricate masonry mortars: Mechanical analysis. *Materials*, 15(21), 7707. <https://doi.org/10.3390/ma15217707>
- Mora-Ortiz, R. S., et al. (2021). Effect of pre-wetting recycled mortar aggregate on the properties of masonry mortars. *Materials*, 14(6), 1547. <https://doi.org/10.3390/ma14061547>

- Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102196. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102196>
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2022). NEC-SE-DS: Diseño sismo resistente. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador.
- Ossa-López, A., Patiño-Vanegas, J. H., & Valencia-Corrales, M. E. (2022). Effect of pre-soaking of recycled concrete aggregates on mechanical behavior of structural mortars. *Construction and Building Materials*, 318, 126034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126034>
- Pereira, P., Evangelista, L., & de Brito, J. (2020). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 722–729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.10.052>
- Rondón-Quintana, H. A., Tenjo-Gaitán, J. A., & Fernández-Gómez, W. D. (2019). Influencia del origen de la arena reciclada en las propiedades físico-mecánicas del concreto. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(51), 55–67. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n51.2019.9430>
- Ulsen, C., Kahn, H., Hawlitschek, G., Masini, E. A., Goldemberg, S., & Angulo, S. C. (2019). Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 40, 1168–1173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.023>
- United Nations Environment Programme. (2022). Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. UNEP.
- Veiga, M. R. (2019). Air lime mortars: What do we know and what do we need to know? *Construction and Building Materials*, 232, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117125>
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2021). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.04>

ANEXOS

ANEXO A: OBTENCION DE ARENA

Material recolectado y transportado para ejecucion de los ensayos experimentales

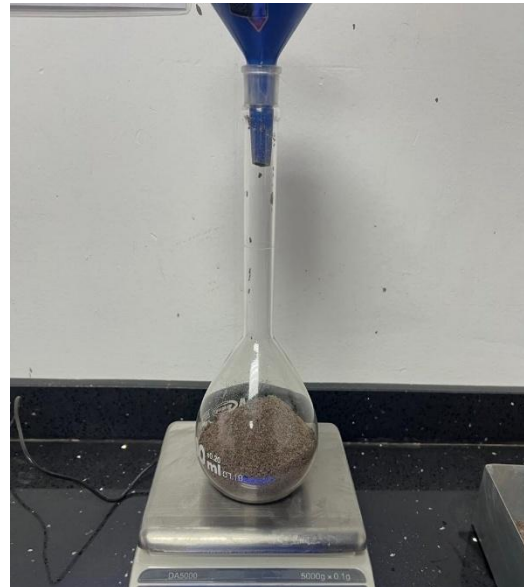


ANEXO B: ENSAYOS DE LABORATORIO

Ensayo de granulometría



Ensayo gravedad específica



ANEXO C: RESULTADOS EMITIDOS POR LA UNIVERSIDAD POLITECNICA DEL ECUADOR LABORATORIO LEMSUR

Resistencia a la compresión a los 7 días dosificación 1:3

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo (%)	Edad (días)	Densidad (kg/m³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	085-H-01	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-06	2026-05-13	115	7	2118	27,48	11,2
2	085-H-02	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-06	2026-05-13	115	7	2115	26,75	10,9
3	085-H-03	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-06	2026-05-13	115	7	2119	27,72	11,3
4	085-H-07	100 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-05-13	114	7	2032	19,76	8,0
5	085-H-08	100 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-05-13	114	7	2009	19,90	7,9
6	085-H-09	100 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-05-13	114	7	2017	19,85	8,0
7	085-H-13	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-05-13	113	7	2073	26,85	10,3
8	085-H-14	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-05-13	113	7	2072	25,49	9,9

9	085-H-15	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-05-13	113	7	2051	28,11	10,6
10	085-H-19	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-05-14	114	7	2056	28,03	11,2
11	085-H-20	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-05-14	114	7	2042	28,29	11,1
12	085-H-21	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-05-14	114	7	2064	28,96	11,5
13	085-H-25	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-05-14	114	7	2008	23,77	9,4
14	085-H-26	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-05-14	114	7	1999	23,14	9,1
15	085-H-27	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-05-14	114	7	1994	22,60	8,8

Resistencia a la compresión a los 28 días dosificación 1:3

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo (%)	Edad (días)	Densidad (kg/m³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	085-H-04	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-06	2026-06-03	115,00	28	2072	49,88	20,0
2	085-H-05	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-06	2026-06-03	115,00	28	2072	49,78	19,8
3	085-H-06	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-06	2026-06-03	115,00	28	2084	48,82	19,5
4	085-H-10	100 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-06-03	114,00	28	1998	38,09	13,9
5	085-H-11	100 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-06-03	114,00	28	1974	39,00	14,2
6	085-H-12	100 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-06-03	114,00	28	1973	38,64	14,3
7	085-H-16	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-06-03	113,00	28	2017	45,77	17,2
8	085-H-17	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-06-03	113,00	28	2003	46,92	17,9

9	085-H-18	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-06	2026-06-03	113,00	28	2027	46,51	17,7
10	085-H-22	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-06-04	114,00	28	2064	51,83	20,5
11	085-H-23	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-06-04	114,00	28	2031	55,64	21,7
12	085-H-24	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-06-04	114,00	28	2048	53,81	21,1
13	085-H-28	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-06-04	114,00	28	2012	47,94	17,6
14	085-H-29	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-06-04	114,00	28	2007	47,21	17,4
15	085-H-30	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-07	2026-06-04	114,00	28	1995	46,03	17,1

Resistencia a la compresión a los 7 días dosificación 1:4

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo (%)	Edad (días)	Densidad (kg/m³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	085-H-31	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-07	2026-05-14	115	7	2073	22,04	8,4
2	085-H-32	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-07	2026-05-14	115	7	2098	22,27	8,6
3	085-H-33	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-07	2026-05-14	115	7	2069	22,76	8,6
4	085-H-37	100 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	112,00	7	1981	12,87	5,1
5	085-H-38	100 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	112,00	7	1968	12,39	4,8
6	085-H-39	100 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	112,00	7	1997	13,08	5,2
7	085-H-43	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	112,00	7	2023	16,67	6,5
8	085-H-44	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	112,00	7	2023,41	14,83	5,8
9	085-H-45	50 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-12	2026-05-19	112,00	7	2034,63	16,68	6,5

		/ 50 % Arena reciclada							
10	085-H-49	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	106,00	7	2004,75	21,37	8,0
11	085-H-50	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-05-19	106,00	7	2052,97	21,79	8,4
12	085-H-51	25 % Arena reciclada / 75% Arena de cantera de Pifo	2026-05-12	2026-05-19	106,00	7	2026,72	21,06	7,9
13	085-H-55	25 % Arena reciclada / 75% Arena de cantera de Pifo	2026-05-13	2026-05-20	112,00	7	1999	14,09	5,5
14	085-H-56	25 % Arena reciclada / 75% Arena de cantera de Pifo	2026-05-13	2026-05-20	112,00	7	2003	13,61	5,4
15	085-H-57	25 % Arena reciclada / 75% Arena de cantera de Pifo	2026-05-13	2026-05-20	112,00	7	2018	13,77	5,4

Resistencia a la compresión a los 28 días dosificación 1:4

Nº	Código	Descripción	Fecha Fábrica	Fecha Rotura	Flujo (%)	Edad (días)	Densidad (kg/m³)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	085-H-34	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-07	2026-06-04	115,00	28	2027	35,18	13,2
2	085-H-35	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-07	2026-06-04	115,00	28	2044	33,46	12,8
3	085-H-36	100 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-07	2026-06-04	115,00	28	2075	38,85	14,7
4	085-H-40	100 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	112,00	28	1975	25,11	9,8
5	085-H-41	100 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	112,00	28	1966	25,41	9,9
6	085-H-42	100 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	112,00	28	1967	26,61	10,3
7	085-H-46	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	112,00	28	2004	32,80	12,5
8	085-H-47	50 % Arena de cantera de Pifo / 50 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	112,00	28	1999	33,25	12,5
9	085-H-48	50 % Arena de cantera de Pifo	2026-05-12	2026-06-09	112,00	28	2014	31,91	12,1

		/ 50 % Arena reciclada							
10	085-H-52	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	106,00	28	2034	42,55	15,7
11	085-H-53	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	106,00	28	2072	42,47	16,1
12	085-H-54	75 % Arena de cantera de Pifo / 25 % Arena reciclada	2026-05-12	2026-06-09	106,00	28	2026	39,23	14,2
13	085-H-58	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-13	2026-06-10	112,00	28	2007	27,93	10,9
14	085-H-59	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-13	2026-06-10	112,00	28	2028	29,26	11,5
15	085-H-60	25 % Arena de cantera de Pifo / 75 % Arena reciclada	2026-05-13	2026-06-10	112,00	28	2000	30,14	11,7