

Universidad de Lima  
Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Civil



**DESEMPEÑO FISICOMECAÁNICO,  
DURABILIDAD Y AMBIENTAL DE ADOQUINES  
TIPO II ELABORADOS CON AGREGADO  
RECICLADO PARA USO PEATONAL EN LIMA,  
2025**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

**Lidia Susana Rivero Solano**

**Código 20173814**

**Martin Enrique Gil Sanabio**

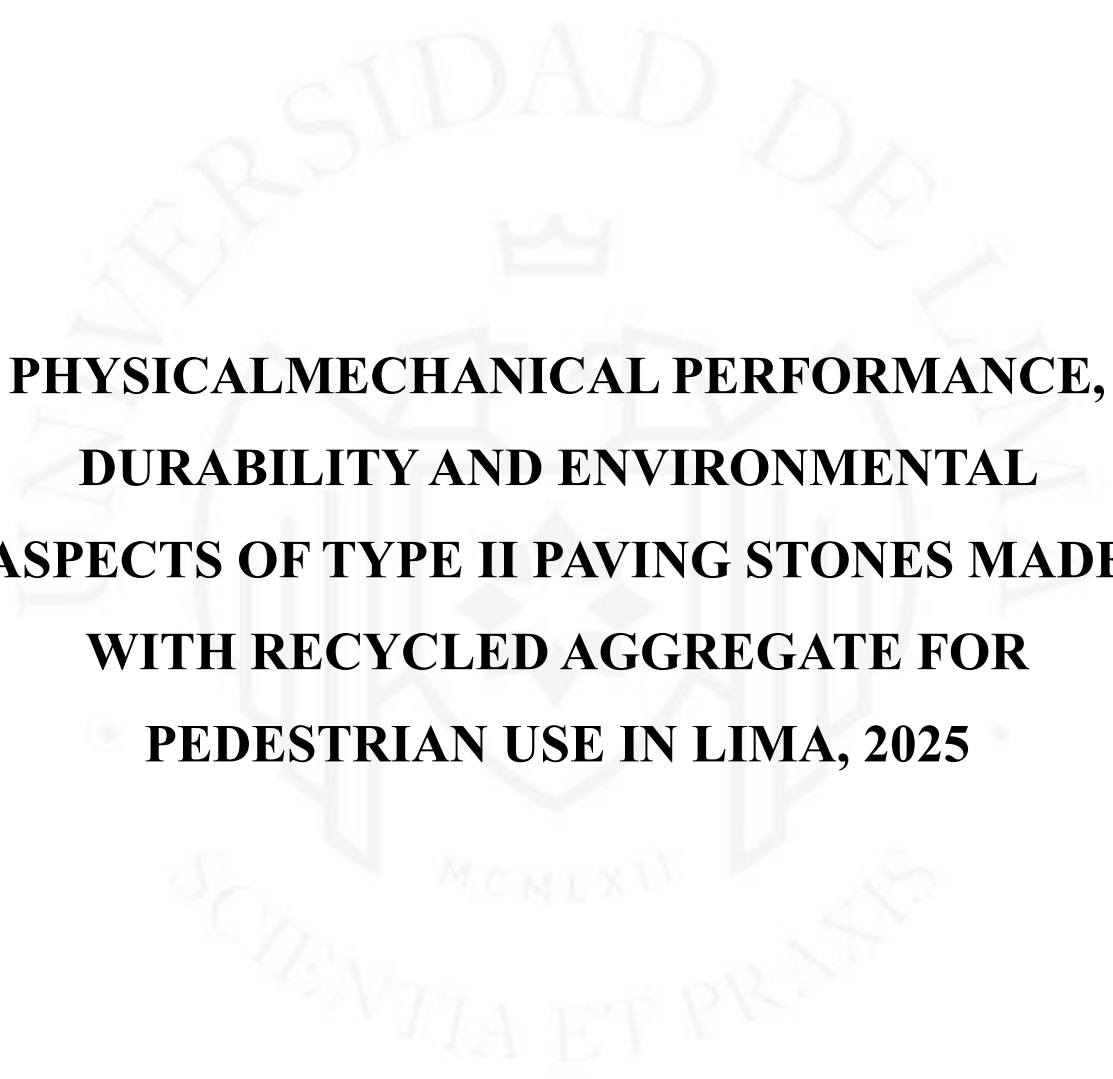
**Código 20180788**

**Asesor**

**Henry Saul Delgado Ortega**

Lima – Perú

Marzo de 2025



**PHYSICALMECHANICAL PERFORMANCE,  
DURABILITY AND ENVIRONMENTAL  
ASPECTS OF TYPE II PAVING STONES MADE  
WITH RECYCLED AGGREGATE FOR  
PEDESTRIAN USE IN LIMA, 2025**

## **AGRADECIMIENTO**

Nosotros, Lidia Susana Rivero Solano y Martín Enrique Gil Sanabio, tesistas de la carrera de Ingeniería Civil, expresamos nuestro más sincero y profundo agradecimiento a nuestro asesor, Mg. Henry Saul Delgado Ortega, por su guía constante, orientación académica y compromiso durante el desarrollo de la presente investigación. Su experiencia, paciencia y dedicación han sido pilares fundamentales para la culminación de este trabajo.

De manera especial, extendemos nuestro reconocimiento a nuestras familias, quienes con amor, comprensión y apoyo incondicional nos acompañaron en cada etapa de nuestra formación universitaria. Ellos han sido fuente de fortaleza e inspiración, alentándonos a superar los desafíos y a mantener firme nuestro propósito.

Asimismo, agradecemos a los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil por los conocimientos impartidos a lo largo de nuestra formación profesional, los cuales nos han permitido crecer académica y personalmente, consolidando nuestra vocación como futuros ingenieros civiles.

Finalmente, agradecemos a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este proyecto, el cual representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el inicio de nuestra vida profesional como ingenieros civiles.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRAC</b> .....	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	3
1.2 Justificación del tema .....	6
1.3 Pregunta de investigación.....	7
1.4 Alcance y limitaciones.....	8
1.4.1 Alcance .....	8
1.4.2 Limitaciones .....	8
1.5 Objetivos .....	8
1.5.1 Objetivo general .....	8
1.5.2 Objetivo específico.....	8
<b>CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>10</b>
2.1 Antecedentes internacionales .....	10
2.2 Antecedentes nacionales.....	11
<b>CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
3.1 Residuos de construcción y demolición .....	14
3.1.1 Clasificación de los residuos de construcción y demolición.....	15
3.1.2 Composición de los residuos de construcción y demolición.....	16
3.2 Adoquines .....	16
3.2.1 Requisitos de los adoquines .....	18
3.3 Humo de sílice.....	19
3.3.1 Comportamiento en la mezcla.....	19

3.4 Condiciones climáticas y costeras de Lima.....	21
3.5 Evaluación preliminar y costeras de Lima .....	22
3.6 Normativa técnica aplicables.....	23
3.6.1 Normas peruanas .....	23
3.6.2 Normas internacionales .....	24
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
4.1 Tipo de estudio y diseño de investigación.....	25
4.1.1 Tipo de estudio .....	25
4.1.2 Diseño de investigación.....	25
4.2 Población, muestra y muestreo.....	26
4.2.1 Población .....	26
4.2.2 Muestra.....	26
4.2.3 Muestreo .....	27
4.2.4 Materiales empleados .....	28
4.2.5 Variables de estudio.....	33
4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	33
4.3.1 Técnicas.....	33
4.3.2 Instrumentos .....	34
4.3.3 Procedimiento.....	34
4.3.4 Ensayos de agregados.....	35
4.3.5 Comparación de propiedades de agregados naturales y reciclados.....	36
4.4 Método de análisis de datos.....	37
4.4.1 Diseño de mezcla.....	38
4.4.2 Elaboración de adoquines.....	41
4.4.3 Ensayos a los adoquines de concreto .....	42
4.5 Evaluación ambiental preliminar de los adoquines.....	55

<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
5.1 Resultados .....	58
5.1.1 Ensayo de la resistencia a la compresión .....	58
5.1.2 Ensayo de la resistencia a la flexión.....	59
5.1.3 Ensayo de ciclo de humedad-secado .....	61
5.1.4 Ensayo de abrasión manual .....	62
5.1.5 Ensayo de absorción de agua por capilaridad .....	63
5.1.6 Ensayo de absorción total de agua por inmersión .....	64
5.1.7 Ensayo acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos .....	66
5.1.8 Evaluación de análisis preliminar ambiental.....	68
5.1.9 Análisis de sensibilidad .....	69
5.1.10 Validación estadística del diseño experimental .....	70
5.2 Discusión .....	72
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>RECOMENDACIÓN.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Espesor nominal y resistencia a la compresión .....	18
Tabla 3.2. Tolerancia dimensional.....	18
Tabla 4.1. Cantidad de adoquines.....	28
Tabla 4.2. Comparación de propiedades físicas y granulométricas de los agregados naturales y reciclados .....	36
Tabla 4.3. Dosificación de materiales por m <sup>3</sup> de mezcla.....	40
Tabla 5.1. Datos de ensayo de ciclo de humedad-secado.....	61
Tabla 5.2. Datos de ensayo de absorción total de agua por inmersión.....	64
Tabla 5.3. Estimación preliminar de emisiones y energía asociada por m <sup>3</sup> de mezcla .....	69
Tabla 5.4. Rango de emisiones considerando incertidumbre del factor .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Dimensiones de adoquines.....	17
Figura 4.1 Curva granulométrica de la arena y huso granulométrico según la NTP 400.037.....	30
Figura 4.2. Curva granulométrica de la piedra (confitillo) y huso granulométrico según la NTP 400.012. ....	31
Figura 4.3 Curva granulométrica del agregado reciclado y y huso granulométrico según la NTP 400.012. ....	32
Figura 4.4 Diagrama de flujo .....	35
Figura 4.5. Moldeado y compactación de adoquines .....	42
Figura 4.6. Ensayo de resistencia a la compresión.....	44
Figura 4.7. Ensayo de resistencia a la flexión .....	45
Figura 4.8. Ensayo de ciclos de humedad-secado (durabilidad).....	48
Figura 4.9. Ensayo de abrasión manual.....	50
Figura 4.10. Ensayo de absorción de agua por capilaridad .....	51
Figura 4.11. Ensayo de absorción de agua por inmersión.....	53
Figura 4.12. Ensayo acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados .....	55
Figura 5.1. Resistencia a compresión.....	58
Figura 5.2 Resistencia a flexión .....	60
Figura 5.3. Resistencia a la abrasión manual a 28 días .....	62
Figura 5 4. Absorción de agua por capilaridad.....	63
Figura 5.5. Ensayo de absorción total de agua por inmersión en adoquines con 0%, 25%, 45% y 60% de RCD a 7, 14, 21 y 28 días.....	65

Figura 5.6. Variación de peso vs 0%, 25%, 45% y 60% de RCD ..... 67

Figura 5.7. Resistencia a la compresión vs 0%, 25%, 45% y 60% de RCD ..... 67

Figura 5.8. Resumen del ANOVA para las propiedades físico–mecánicas y de durabilidad..... 71



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Matriz de operacionalización .....	92
Anexo B. Matriz de consistencia.....	93
Anexo C. Constancia de compra de sulfatos.....	94
Anexo D. Constancia y evidencia fotográfica de compra de RCD en cajas ecológicas .....	95
Anexo E. Caracterización de materiales.....	96
Tabla E1. Requisitos granulométricos Agregado Fino.....	96
Tabla E2. Granulometría del agregado fino .....	97
Tabla E3. Granulometría del agregado grueso-confitillo .....	97
Tabla E4. Granulometría del agregado grueso-RCD .....	98
Tabla E5. Requisitos granulométricos Agregado Grueso.....	101
Tabla E6. Resistencia requerida para diseño de mezcla. ....	103
Tabla E7. Cantidad de agua según el TMN .....	104
Tabla E8. Relación Agua (A)/Cemento (C) .....	105
Tabla E9. Peso del agregado grueso por unidad de volumen de concreto b/bo ....	106
Tabla E10. Dosificación de materiales por adoquín.....	108
Anexo F. Análisis de varianza (ANOVA).....	109
Tabla F11. Análisis de Varianza (ANOVA) de la resistencia a la compresión de los adoquines a 28 días.....	109
Tabla F12. Análisis de Varianza (ANOVA) de la resistencia a la flexión de los adoquines a 28 días.....	110
Tabla F13. Análisis de Varianza (ANOVA) – ciclos de humedad-secado (% pérdida de masa) de los adoquines a 28 días.....	110
Tabla F14. Análisis de Varianza (ANOVA) – ciclos de humedad-secado (resistencia a la compresión) de los adoquines a 28 días .....	111

Tabla F15. Análisis de Varianza (ANOVA) – ensayo de abrasión manual de los adoquines a 28 días.....	111
Tabla F16. Análisis de Varianza (ANOVA) – Absorción de Agua por Capilaridad de los adoquines a las 24 horas de los 28 días .....	112
Tabla F17. Análisis de Varianza (ANOVA) – Absorción Total de Agua por Inmersión de los adoquines a los 28 días .....	112
Tabla F18. Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Aluminio a los 28 días (% variación de peso) .....	113
Tabla F19. Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Aluminio a los 28 días (Ensayo de compresión) .....	113
Tabla F20. Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Magnesio a los 28 días (% variación de peso) .....	114
Tabla F21. Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Magnesio a los 28 días (Ensayo de compresión) .....	114
Anexo G. Ensayos preliminares .....	116
Anexo H. Elaboración y curado de adoquines .....	119
Anexo I. Ensayos de propiedades mecánicas y durabilidad de los adoquines .....	121

## RESUMEN

La presente investigación aborda el problema del manejo deficiente de los residuos de construcción y demolición (RCD) en Lima Metropolitana y su repercusión sobre la sostenibilidad ambiental. Se plantea como alternativa la reutilización parcial de dichos residuos, reemplazando una fracción de los agregados naturales en la fabricación de adoquines de concreto modificados con 10% de humo de sílice. Para ello, se efectuó un estudio experimental con proporciones de reemplazo de 0%, 25%, 45% y 60% de RCD, evaluando el comportamiento de las mezclas mediante ensayos de compresión, flexión, ciclos de humedad-secado, abrasión y absorción de agua, complementados con un análisis preliminar de emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo energético por metro cúbico. Los resultados indicaron que el empleo de agregados reciclados mejora el comportamiento mecánico del concreto. La mezcla con 60% de RCD alcanzó una resistencia a compresión de 72.72 MPa y una resistencia a flexión de 5.94 MPa a los 28 días, valores que superan los límites exigidos por la NTP 399.611:2017. Además, los adoquines conservaron su estabilidad física, con pérdidas de masa inferiores al 1.3% y absorciones menores al 8%. En el aspecto ambiental, se estimó una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre 14.4% y 34.7% en comparación con la mezcla convencional. En conclusión, las proporciones de reemplazo comprendidas entre 45% y 60% permitieron alcanzar un balance adecuado entre desempeño estructural, durabilidad y sostenibilidad. Por tanto, el aprovechamiento de RCD en la producción de adoquines se presenta como una opción sólida y responsable para promover una construcción más sostenible en Lima Metropolitana.

**Palabras claves:** adoquines de concreto, RCD, humo de sílice, durabilidad, sostenibilidad.

## ABSTRACT

The research addresses the inadequate management of construction and demolition waste (CDW) in Metropolitan Lima and its implications for environmental sustainability. The study proposes the partial reuse of CDW as a substitute for natural aggregates in concrete paving blocks incorporating 10% silica fume. Experimental mixtures with 0%, 25%, 45% and 60% replacement levels were analyzed through compressive and flexural strength tests, wet-dry cycles, abrasion and water absorption assessments, together with a preliminary estimation of CO<sub>2</sub> emissions and energy use per cubic meter. Results showed that recycled aggregates enhance the concrete's performance, reaching 72.72 MPa compressive and 5.94 MPa flexural strength at 28 days, surpassing the NTP 399.611:2017 standard. The environmental evaluation revealed a 14.4 – 34.7% reduction in CO<sub>2</sub> emissions compared with the control mix. Replacement rates between 45% and 60% provided the best balance of strength, durability and sustainability, confirming the feasibility of recycled concrete blocks for sustainable urban construction in Lima.

**Keywords:** concrete pavers, CDW, silica fume, durability, sustainability

# INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento sostenido del sector construcción ha incrementado de manera significativa la generación de residuos de construcción y demolición (RCD), especialmente en zonas urbanas con alta densidad poblacional. La disposición inadecuada de estos materiales no solo genera impactos negativos sobre el ambiente urbano, sino que también contribuye al deterioro del paisaje, la ocupación informal de espacios públicos y el aumento de la presión sobre los recursos naturales utilizados en nuevas edificaciones.

Ante esta problemática, resulta necesario adoptar enfoques constructivos que permitan reducir los impactos ambientales asociados a la actividad edificadora. Una de las alternativas más viables consiste en la reutilización de los RCD como insumos para la fabricación de elementos prefabricados de concreto, lo que contribuye tanto a la valorización de residuos como a la disminución del consumo de agregados naturales.

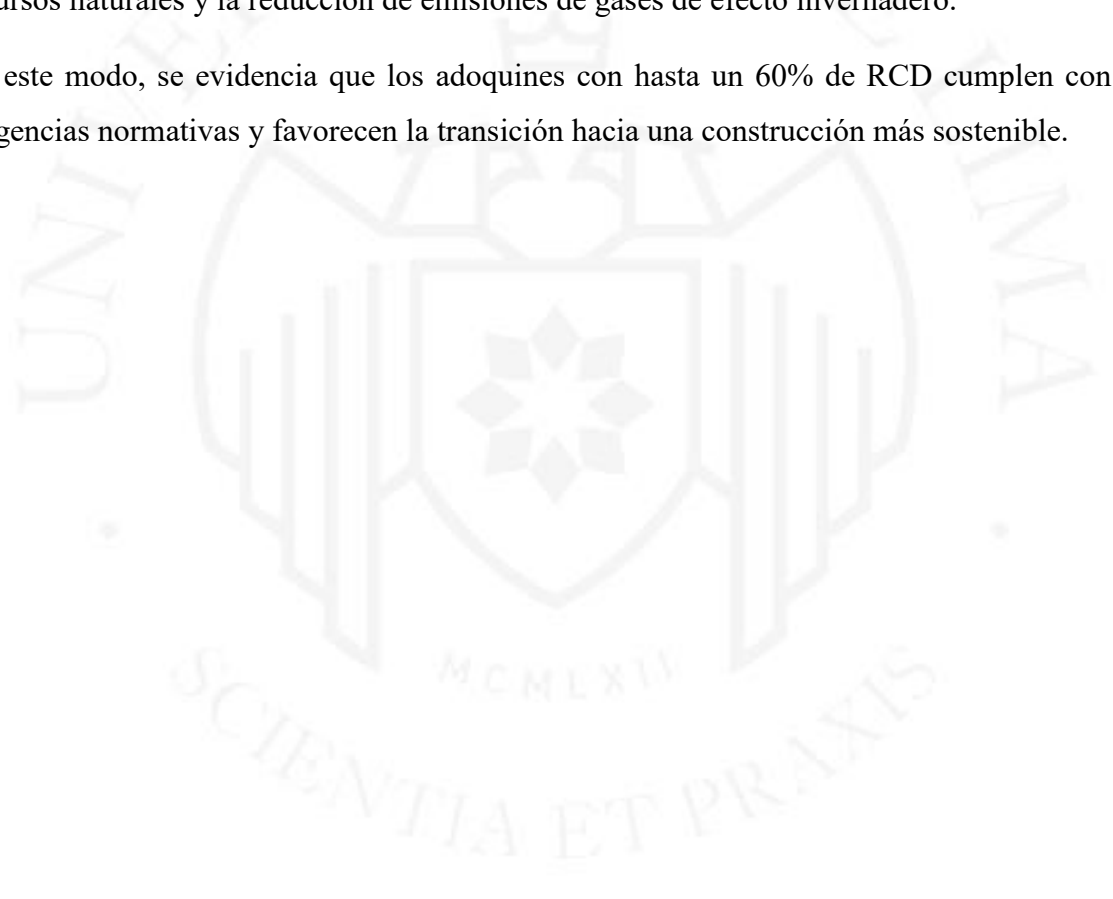
En este contexto, la presente investigación tiene como finalidad evaluar el comportamiento físico-mecánico, la durabilidad y los beneficios ambientales de adoquines tipo II elaborados con concreto reciclado, empleando residuos provenientes de la empresa Cajas Ecológicas. El análisis se orienta a verificar la factibilidad técnica de su empleo en superficies peatonales, así como su cumplimiento con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 399.611:2017. Para ello, se produjeron adoquines con distintos niveles de sustitución de agregados naturales por RCD y se les aplicaron ensayos de compresión, flexión, absorción de agua, contracción por secado y exposición a agentes como sulfatos y cloruros.

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental comparativo entre adoquines tradicionales y reciclados. Se plantea la hipótesis de que la incorporación del 10 % de humo de sílice en las mezclas con RCD optimizará las propiedades mecánicas y disminuirá la porosidad del concreto, logrando así el desempeño exigido para pavimentos peatonales. De igual forma, se espera que esta combinación de materiales favorezca la sostenibilidad ambiental al reducir la cantidad de residuos destinados a disposición final. Además de su aporte técnico, el estudio pretende contribuir al desarrollo del conocimiento sobre materiales de construcción sostenibles y fomentar prácticas constructivas más responsables que mitiguen los efectos ambientales del sector en el contexto peruano.

El componente ambiental es un eje fundamental del presente trabajo. Según Scrivener (2020), la producción mundial de cemento es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>; en tanto, en Lima Metropolitana, más del 70% de los RCD son eliminados sin tratamiento adecuado (MINAM, 2023). Reutilizar dichos residuos en la fabricación de adoquines contribuye a reducir la extracción de agregados naturales, el deterioro de cauces fluviales y la huella de carbono asociada a la construcción.

Esta investigación también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y ODS 13), al incorporar una evaluación ambiental preliminar basada en criterios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Se cuantificaron los posibles beneficios derivados del reemplazo parcial de agregados vírgenes por RCD, considerando la disminución de la demanda de recursos naturales y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

De este modo, se evidencia que los adoquines con hasta un 60% de RCD cumplen con las exigencias normativas y favorecen la transición hacia una construcción más sostenible.



# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

## 1.1 Planteamiento del problema

El manejo inadecuado del RCD se ha convertido en uno de los principales desafíos ambientales en América Latina. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (2021), la disposición inadecuada de residuos en zonas costeras genera alteraciones en los ecosistemas y afecta la gestión ambiental urbana. De igual modo, Galarza (2020) señala que la acumulación de RCD en zonas litorales incrementa la exposición a fenómenos como la erosión costera, marejadas y lluvias intensas, afectando directamente a comunidades vulnerables. Aunque se estima que hasta el 80% de los RCD podrían ser reciclados, esta posibilidad se ve limitada por la escasa existencia de plantas de valorización y la falta de políticas eficaces de gestión (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2023).

Durante la última década, la industria de la construcción se ha consolidado como uno de los sectores más dinámicos de la economía, con aportes cercanos al 7% del producto bruto interno (PBI) en diversos países de Latinoamérica (OECD, 2021). Este crecimiento ha generado impactos positivos en las economías a nivel global y local. No obstante, las actividades de construcción y remodelación también provocan efectos negativos en el entorno urbano, como la reducción del espacio público, el deterioro de la calidad del aire, la contaminación atmosférica por partículas y emisiones, y, uno de los problemas más relevantes, la generación de RCD (Contreras et al., 2021).

En el Perú, el manejo del RCD presenta serias deficiencias, principalmente por la falta de infraestructura adecuada para su disposición final y los elevados costos asociados a su tratamiento formal. En Lima Metropolitana, se generan más de 19000 toneladas diarias de RCD, pero solo el 30% se dispone correctamente en rellenos autorizados, mientras que el 70% restante termina contaminando espacios públicos, ríos y zonas marinas (MINAM, 2023). En muchos casos, estos materiales son arrojados ilegalmente en antiguas canteras o terrenos baldíos, agravando el impacto ambiental, especialmente en contextos costeros. Diario Uno (2025) reporta que el 38% de los residuos sólidos generados son dispuestos en botaderos informales, lo que refleja deficiencias graves en la gestión pública.

Un ejemplo reciente fue el cierre temporal del relleno sanitario “El Zapallal”, que afectó la recolección en más de diez distritos y generó preocupación por sus consecuencias sanitarias, especialmente en zonas vulnerables como Lomas de Carabayllo (Municipalidad de Lima, 2023). En este escenario, Lima enfrenta una doble problemática: por un lado, el inadecuado manejo de los RCD, y por otro, las condiciones climáticas particulares de la zona costera, caracterizada por una humedad relativa promedio anual del 80% y la presencia constante de niebla marina y aerosoles salinos (SENAMHI, 2022), factores que aceleran la corrosión y el deterioro de los elementos de concreto, comprometiendo su durabilidad.

Estas condiciones evidencian que el problema no solo radica en la gestión y disposición de los residuos, sino también en el comportamiento de los materiales que los incorporan. En este contexto, resulta indispensable analizar el efecto que tiene el uso de agregados reciclados en otros elementos constructivos como los adoquines de concreto, puesto que este tipo de elemento no solo representa una alternativa de valorización de residuos, sino también un componente estructural expuesto directamente a agentes ambientales. El desempeño del adoquín influye de manera significativa en la durabilidad y funcionalidad de los pavimentos urbanos, y su comportamiento depende tanto de la calidad del RCD empleado como de las condiciones climáticas donde se instala.

Cuando los adoquines son elaborados con agregados reciclados de baja calidad o con proporciones inadecuadas de sustitución, pueden presentar una mayor porosidad, absorción de agua y pérdida de masa frente a condiciones ambientales agresivas, lo que reduce su vida útil y eleva los costos de mantenimiento (Wijtmiko et al., 2024; Choudhary & Kumar, 2021). En zonas costeras como Lima, caracterizadas por una humedad relativa superior al 80% y la presencia constante de aerosoles salinos, estos efectos se intensifican debido al ataque simultáneo de cloruros y sulfatos, lo que acelera los procesos de fisuración y degradación superficial del concreto (Mendoza & Torres, 2022; Salazar, 2020).

Diversas investigaciones internacionales respaldan la necesidad de aplicar estrategias técnicas que mejoren el desempeño de los adoquines fabricados con RCD. Farooq et al. (2023) demostraron que es posible elaborar adoquines con hasta un 100% de áridos reciclados mediante técnicas de compactación controlada y la incorporación de humo de sílice, obteniendo resistencias y comportamientos durables equivalentes a los de mezclas convencionales.

De manera similar, Wang et al. (2021) evidenciaron que la adición del 10% de humo de sílice en adoquines reciclados sometidos a ciclos de humedecimiento y secado en medios marinos reduce la pérdida de masa y mejora la integridad superficial, lo que confirma la eficacia del uso de adiciones puzolánicas en entornos costeros.

En función de ello, las estrategias para mitigar los efectos negativos del uso de RCD en adoquines deben centrarse en la selección y el tratamiento adecuado del material reciclado (a través de procesos de trituración, lavado y clasificación granulométrica), en la optimización del diseño de mezcla mediante el control de la relación agua/cemento y en la incorporación de adiciones minerales activas como el humo de sílice, que densifican la pasta de cemento y disminuyen la permeabilidad. Asimismo, el control del curado y la aplicación de ensayos acelerados de durabilidad frente a humedad, sulfatos y cloruros permiten anticipar el desempeño real de los adoquines fabricados con RCD bajo condiciones de exposición marina. La adopción de normas técnicas nacionales e internacionales, como la NTP 399.611:2017 y la ASTM C936, complementa este enfoque al asegurar la calidad y resistencia requeridas para el uso peatonal.

Estas medidas no solo garantizan la viabilidad técnica del adoquín reciclado, sino que también fortalecen su viabilidad ambiental, al reducir la extracción de áridos naturales y la generación de residuos que impactan negativamente los ecosistemas urbanos. En consecuencia, el adoquín se posiciona como un elemento clave dentro de un modelo constructivo sostenible, que promueve la economía circular y la valorización de los residuos de construcción y demolición.

Por ello, resulta fundamental evaluar la resistencia de los adoquines fabricados con RCD frente a ambientes agresivos como los encontrados en zonas costeras, considerando parámetros de durabilidad como la absorción de agua, la pérdida de masa por ciclos húmedo-seco y la resistencia a cloruros y sulfatos. Estudios recientes han demostrado que los concretos expuestos a ambientes salinos como los de Lima presentan mayores niveles de desgaste superficial y pérdidas de masa superiores al 2% en ciclos acelerados de degradación (Vásquez & Delgado, 2021).

A este problema se suma la huella ambiental de la construcción, pues la producción de agregados naturales genera aproximadamente 0.3 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de material producido (Scrivener et al., 2020).

Sin estrategias de reutilización, los RCD no solo saturan los botaderos, sino que perpetúan la necesidad de extraer nuevos agregados, intensificando los impactos ambientales. En este sentido, evaluar preliminarmente los beneficios de reemplazar agregados convencionales por RCD constituye un aporte relevante en el contexto peruano.

## **1.2 Justificación del tema**

El crecimiento acelerado de la industria de la construcción genera grandes volúmenes de RCD, cuya disposición final representa un reto ambiental y urbano. El aprovechamiento de estos residuos como agregados reciclados en la producción de concreto se plantea como una alternativa sostenible que contribuye a la economía circular y a la reducción de la explotación de canteras naturales (Contreras-Llanes et al., 2023).

Diversos estudios recientes han demostrado que el uso de agregados reciclados en mezclas de concreto permite fabricar elementos constructivos con propiedades mecánicas adecuadas, alcanzando resistencias a la compresión entre 55 y 75 MPa y valores de flexión cercanos a 6 MPa, comparables con los de concretos elaborados con agregados naturales. Esto confirma que el empleo de RCD es una opción viable para aplicaciones no estructurales como pavimentos y adoquines (Helsing et al., 2024). No obstante, uno de los principales desafíos de este material es la presencia de una mayor porosidad y absorción, lo que puede afectar su durabilidad frente a ciclos de humedad-secado, carbonatación y ambientes agresivos.

En este contexto, la incorporación de adiciones puzolánicas como el humo de sílice ha demostrado mejorar significativamente la microestructura y las propiedades mecánicas del concreto con altos porcentajes de RCD. Nadim et al. (2024) señalan que la sustitución parcial de cemento por humo de sílice incrementa la densificación de la matriz y reduce la permeabilidad. Por su parte, Wijatmiko et al. (2024) destacan que esta adición optimiza la resistencia a la compresión incluso en mezclas con elevados contenidos de agregado reciclado.

Asimismo, el desarrollo de concretos con adiciones minerales y materiales reciclados se alinea con las tendencias actuales hacia la reducción de la huella de carbono en la construcción. La combinación de humo de sílice, polvos minerales y agregados reciclados permite la elaboración de concretos de baja emisión de CO<sub>2</sub>, favoreciendo prácticas constructivas más sostenibles (Zhao et al., 2024).

Finalmente, la validación industrial de pavimentos y adoquines fabricados con RCD se ha demostrado con resultados favorables en términos de resistencia mecánica y durabilidad, consolidando la viabilidad de su aplicación a gran escala (Contreras-Llanes et al., 2023).

De este modo, el presente estudio no solo contribuye al aprovechamiento eficiente de los residuos de construcción y demolición, sino que también promueve la producción de concretos con menor impacto ambiental y mayor desempeño, respondiendo a los desafíos actuales de sostenibilidad en la industria de la construcción.

Asimismo, esta investigación se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, contribuyendo directamente al ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, particularmente a la meta 11.6, que busca reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades mediante la mejora en la gestión de los residuos de construcción y demolición. De igual forma, se vincula con el ODS 12: Producción y consumo responsables, en su meta 12.5, orientada a disminuir significativamente la generación de desechos a través de la prevención, reducción, reciclaje y reutilización. En este contexto, la valorización de los residuos de construcción y demolición (RCD) para la elaboración de adoquines de concreto representa una alternativa coherente con estos objetivos globales, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la economía circular en el sector de la construcción (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015).

### **1.3 Pregunta de investigación**

¿Cuál es el porcentaje óptimo de reemplazo de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (RCD) que garantiza el desempeño físico-mecánico y la sostenibilidad ambiental de los adoquines de concreto modificados con 10% de humo de sílice en condiciones representativas del ambiente costero de Lima?

## **1.4 Alcance y limitaciones**

### **1.4.1 Alcance**

- Se optimizan las proporciones de agregado fino y grueso, el contenido de cemento y la presión de colada en la elaboración de adoquines tipo II con distintos porcentajes de reemplazo de RCD (0%, 25%, 45% y 60%) y 10% de humo de sílice, evaluando sus propiedades físico-mecánicas, de durabilidad y desempeño ambiental preliminar conforme a la NTP 399.611:2017.
- Se desarrolla la investigación en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Lima durante el período 2024–2025, bajo condiciones controladas que simulan el ambiente costero de Lima Metropolitana, sin incluir ensayos de campo ni análisis de ciclo de vida completo por limitaciones de recursos.

### **1.4.2 Limitaciones**

- El estudio se realiza bajo condiciones controladas de laboratorio, lo que puede diferir de su desempeño en el campo
- Solo se analizan adoquines de concreto; no se evalúan otros elementos estructurales.

## **1.5 Objetivos**

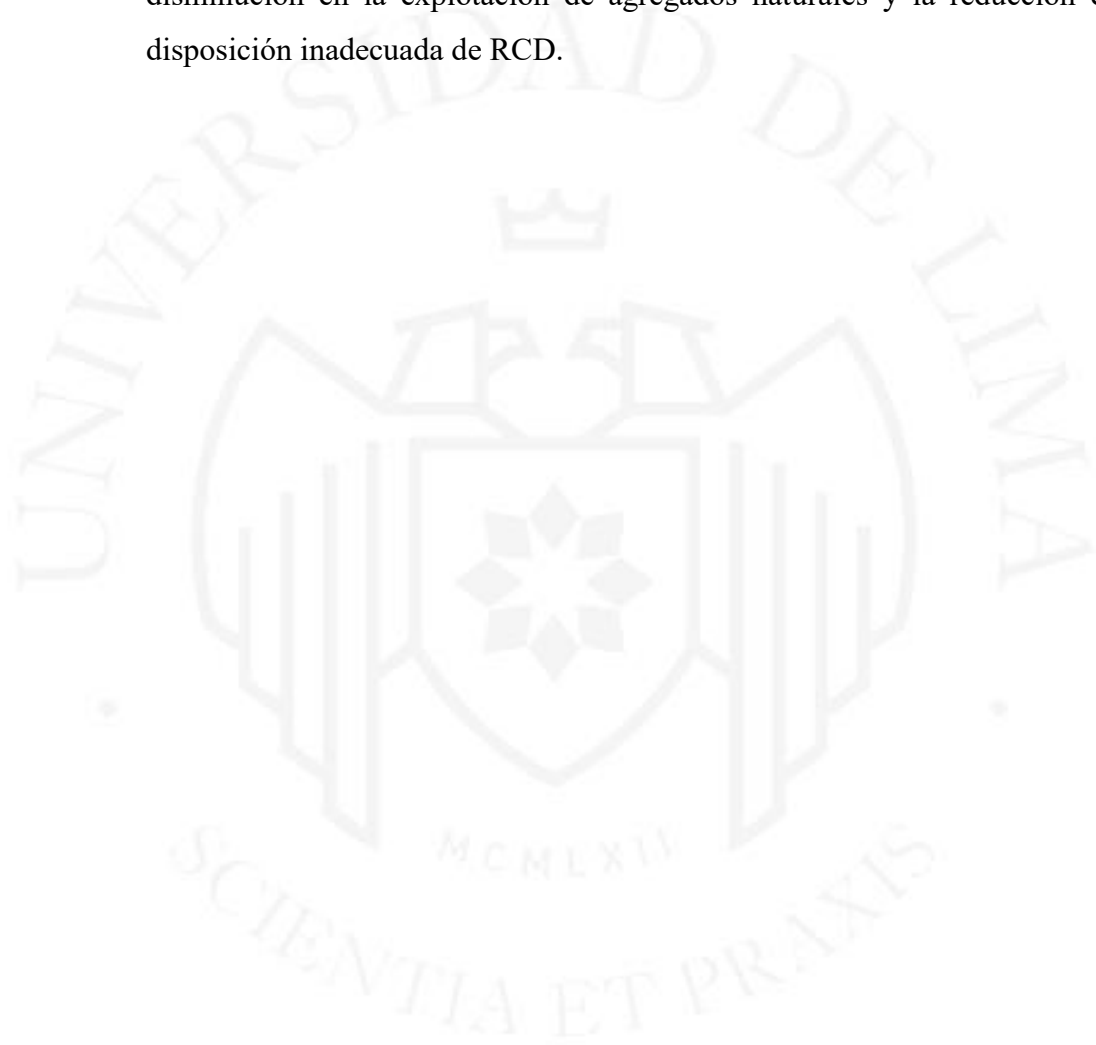
### **1.5.1 Objetivo General**

- Evaluar el efecto del reemplazo parcial de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (RCD) y la incorporación de 10% de humo de sílice en las propiedades físico-mecánicas, durabilidad y sostenibilidad ambiental de adoquines de concreto tipo II elaborados bajo condiciones representativas del ambiente costero de Lima.

### **1.5.2 Objetivo Específicos**

- Caracterizar los materiales empleados (RCD, humo de sílice y agregados naturales) y elaborar adoquines con diferentes porcentajes de sustitución, siguiendo criterios normativos.

- Determinar y analizar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión) y de durabilidad (absorción capilar, ciclos de humedad-secado, ataque por sulfatos y niebla salina) de los adoquines producidos con diferentes porcentajes de reemplazo de agregados naturales por RCD y la incorporación de humo de sílice al 10%.
- Evaluar preliminarmente la sostenibilidad ambiental de las mezclas de adoquines, considerando indicadores como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> la disminución en la explotación de agregados naturales y la reducción en la disposición inadecuada de RCD.



# CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

## 2.1 Antecedentes internacionales

Diversos estudios internacionales han demostrado que el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en la fabricación de adoquines es una alternativa técnica y ambientalmente viable. Farooq et al. (2023) comprobaron en Pakistán y Francia que es posible fabricar adoquines con hasta un 100% de áridos reciclados, alcanzando resistencias de 35 MPa a los 7 días y buen desempeño frente a ambientes agresivos como soluciones de ácido sulfúrico y cloruro de sodio. Resultados similares fueron reportados en India por Kumar y Sharma (2022) y Ashwini y Sheetal (2021), quienes señalaron que el reemplazo de agregados por RCD en proporciones entre 25% y 45% mantiene resistencias adecuadas para tránsito peatonal, aunque porcentajes más elevados reducen la capacidad mecánica.

Por otro lado, investigaciones recientes se han enfocado en la durabilidad y el comportamiento en condiciones ambientales agresivas. El estudio de Wang et al. (2021) analizó en China el desempeño de adoquines reciclados frente a la alternancia de humedad y secado en entornos marinos simulados, encontrando que la adición de un 10% de humo de sílice redujo en 48% la pérdida de masa frente al ataque de cloruros. De manera similar, Sumit y Ransinchung (2021) observaron en India que la combinación de escoria, ceniza volante y RCD mejoró la resistencia química en soluciones salinas, con pérdidas de masa inferiores al 7% después de 90 días. Asimismo, Revilla-Cuesta et al. (2020) en España destacaron que los concretos reciclados presentan mayor vulnerabilidad en zonas costeras debido a la penetración de cloruros, pero que adiciones como el humo de sílice o la ceniza volante contribuyen a mitigar dicho efecto. Complementariamente, Thomas et al. (2021) reportaron que el uso de humo de sílice en concretos con RCD mejora la resistencia a la penetración de cloruros hasta en un 30%, confirmando su importancia en la prolongación de la vida útil en ambientes marinos.

Finalmente, revisiones sistemáticas como la de Silva y Naik (2020) resaltan que el uso de RCD en el concreto permite reducir en promedio un 33% la extracción de recursos naturales y en un 25% las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, se subraya que los aditivos puzolánicos no solo mejoran la eficiencia mecánica, sino que extienden la vida útil de los elementos prefabricados. En síntesis, los antecedentes internacionales coinciden en que la reutilización de RCD en adoquines contribuye tanto a la sostenibilidad ambiental como al cumplimiento de parámetros técnicos. Sin embargo, diversos autores (Wang et al., 2021; Revilla-Cuesta et al., 2020) señalan la necesidad de más estudios enfocados en condiciones costeras específicas, como las de Lima Metropolitana, caracterizadas por alta humedad relativa y exposición constante a niebla salina rica en cloruros y sulfatos. En ese sentido, el presente estudio aporta al conocimiento existente al evaluar el comportamiento mecánico y la durabilidad de adoquines elaborados con distintos porcentajes de RCD y humo de sílice bajo condiciones de degradación simuladas representativas del entorno costero limeño, contribuyendo así a reducir la brecha de información sobre la aplicación de materiales reciclados en ambientes marinos.

## **2.2 Antecedentes nacionales**

En el Perú, la aplicación de agregados reciclados en la construcción ha recibido creciente atención en los últimos años, principalmente en la fabricación de adoquines de concreto. Huamán y Ríos (2019) desarrollaron adoquines sustituyendo en 25% los agregados naturales por RCD y reportaron resistencias a compresión superiores a 45 MPa a los 28 días, concluyendo que dicho porcentaje permite cumplir con la NTP 399.611. De manera similar, Cárdenas y Quispe (2020) comprobaron que reemplazos entre 20% y 40% mantienen un adecuado desempeño mecánico, con resistencia a la compresión y flexión superiores a los 30 MPa requeridos para adoquines tipo II, aunque advirtieron que porcentajes mayores reducen la cohesión de la mezcla y la resistencia a flexión.

Por otro lado, se han explorado estrategias combinadas entre RCD y adiciones minerales. Gutiérrez (2021) evaluó la incorporación de humo de sílice en mezclas con 30% de RCD, obteniendo incrementos del 12% en resistencia a compresión respecto a la mezcla patrón, además de una reducción significativa en la absorción de agua. Resultados complementarios fueron hallados por Castro et al. (2021), quienes verificaron que el uso combinado de RCD y adiciones minerales mantiene resistencias superiores a 40 MPa incluso en ambientes húmedos.

Más recientemente, Mendoza y Torres (2022) determinaron que la falta de materiales suplementarios de reemplazo en concretos de RCD expuestos a la humedad marina de Lima resulta en una caída del 35% en su desempeño a compresión. Esta evidencia justifica técnica y experimentalmente el uso de humo de sílice en la presente investigación para fortalecer la matriz del adoquín.

En esa misma línea, López y Sánchez (2022) cuantificaron el impacto positivo de integrar escombros reciclados en la fabricación de elementos prefabricados. Sus resultados indican que esta práctica no solo disminuye en casi una tercera parte la carga de desechos en vertederos clandestinos, sino que también optimiza la gestión de canteras al reducir cerca del 18% la extracción de áridos naturales, consolidando al RCD como un recurso viable para el urbanismo ecológico.

Finalmente, cabe destacar que el entorno costero de Lima presenta condiciones particulares que aceleran la degradación de mezclas de concreto. Talledo (2018) evidenció que la humedad relativa promedio entre 80% y 90% en la zona costera de Lima incrementa la susceptibilidad del concreto a procesos de deterioro prematuro. De forma complementaria, Salazar (2020) reportó que la exposición a niebla salina favorece la penetración de cloruros y sulfatos, lo que puede reducir la vida útil de las estructuras en aproximadamente un 30% a 40% (No se realizó ensayo de penetración de cloruros, ya que este requiere instrumentación especializada y exposición prolongada, fuera del alcance del presente estudio, centrado en la simulación acelerada de humedad–secado y ataque de sulfatos).

En síntesis, los antecedentes nacionales presentan coincidencias y divergencias. Por un lado, existe consenso en que reemplazos entre 20% y 40% de RCD permiten obtener resistencias adecuadas (Huamán & Ríos, 2019; Cárdenas & Quispe, 2020; Castro et al., 2021). No obstante, mientras algunos autores advierten reducciones en cohesión y resistencia a flexión en porcentajes mayores, otros (Gutiérrez, 2021; Mendoza & Torres, 2022) muestran que la adición de humo de sílice contrarresta estas limitaciones y mejora la durabilidad frente a ambientes salinos. En cuanto al aspecto ambiental, se reporta una tendencia favorable a la reducción de residuos y consumo de agregados vírgenes (López & Sánchez, 2022), aunque aún existen vacíos sobre el desempeño específico en ambientes costeros agresivos.

De esta forma, la presente investigación se diferencia al evaluar de manera integral la resistencia y durabilidad de adoquines con RCD y humo de sílice frente a las condiciones locales de Lima Metropolitana, caracterizadas por una humedad relativa promedio de 80–90%, presencia constante de niebla marina y alta concentración de cloruros y sulfatos atmosféricos.



# CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

## 3.1 Residuos de Construcción y Demolición

Los RCD se originan a partir de procesos como la edificación, reparación o demolición de obras civiles. Estos incluyen concreto, ladrillos, cerámicos, asfalto, madera, metales y plásticos, cuya composición varía según el tipo de infraestructura y el proceso constructivo de origen. En demoliciones urbanas predomina el concreto, mientras que en proyectos viales es común la presencia de materiales excavados como suelos y rocas de corte, que requieren una gestión y disposición final adecuadas (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020).

En el contexto peruano, los RCD se clasifican en peligrosos y no peligrosos, siendo estos últimos los que pueden aprovecharse mediante procesos de reciclaje o reutilización (MVCS, 2020). La Norma Técnica Peruana NTP 400.050 establece criterios para diferenciar los residuos de construcción, como sobrantes de concreto fresco, maderas, envases, plásticos y materiales de excavación, de los residuos de demolición, conformados por fragmentos de concreto endurecido, ladrillos, morteros, cerámicos y asfalto. Asimismo, esta norma establece opciones de manejo vinculadas al reciclaje, la reutilización y la disposición final, considerando la presencia de componentes potencialmente nocivos (INACAL, 2017).

A nivel normativo, la Resolución Ministerial N.º 257-2020-VIVIENDA dispuso la elaboración del Reglamento de Gestión y Manejo de Residuos Sólidos de Construcción y Demolición, con el propósito de regular los procedimientos, roles institucionales y lineamientos técnicos. De forma complementaria, el Código Técnico de Construcción Sostenible, aprobado mediante el Decreto Supremo N.º 014-2021-VIVIENDA y actualizado por la Resolución Ministerial N.º 058-2024-VIVIENDA, incorpora criterios de sostenibilidad, eficiencia energética y valorización de residuos constructivos, promoviendo la transición hacia una economía circular en el sector.

En el ámbito internacional, diversos estudios han caracterizado la composición de los RCD. Wu, Yu y Shen (2017) determinaron que el concreto constituye cerca del 40% del total de los residuos, mientras que los ladrillos representan entre 12% y 40%, la madera entre 2% y 4%, y el asfalto entre 4% y 26% (Deloitte, 2017). Estas proporciones reflejan el alto potencial de recuperación de materiales pétreos para su reincorporación en nuevos procesos constructivos.

Los agregados reciclados (RA) obtenidos a partir del procesamiento de RCD, mediante clasificación, trituración y limpieza, pueden reincorporarse como insumos en la fabricación de concreto y elementos prefabricados. Su uso contribuye a reducir el consumo de agregados naturales y a fomentar una gestión más sostenible de los residuos del sector. En el contexto internacional, las directrices europeas promueven la separación en origen y la clasificación por tipo de material, garantizando la calidad de los agregados reciclados para aplicaciones estructurales y no estructurales.

### **3.1.1 Clasificación de los residuos de construcción y demolición**

Según De Brito, et al. (2018), los RCD generalmente se clasifican de acuerdo con los materiales que contienen y la fuente de la cual provienen, es decir, dependiendo de su naturaleza y composición.

- Bloques de concreto: tipo de RCD más estudiado debido a que se obtienen los agregados reciclados (AR) de alta calidad y pureza. Se originan del proceso de demolición de estructuras como muros y edificios.
- RCD mezclados y limpios: contienen principalmente concreto o material bituminoso y se obtiene de un proceso de separación previo.
- Escombros de demolición mixta: no han sido seleccionados en su origen y requieren un tratamiento previo antes de ser utilizados.

Esta clasificación resulta importante porque permite identificar qué tipos de RCD tienen mayor potencial para generar agregados reciclados de mejor calidad (bloques de concreto o RCD limpios) y cuáles requieren procesos adicionales de separación o limpieza (escombros mixtos).

En el caso peruano, existen dos enfoques normativos:

- Decreto Supremo N° 003-2013-VIVIENDA: establece una clasificación en residuos peligrosos y no peligrosos, en función del riesgo ambiental.
- NTP 400.050 (2017): clasifica según el origen del residuo (construcción o demolición) y establece criterios de manejo, incluyendo reciclaje, reutilización o disposición final.

De este modo, ambas normas son complementarias: el decreto tiene un enfoque de gestión ambiental, mientras que la NTP se orienta hacia la diferenciación técnica y el manejo adecuado de los RCD

### **3.1.2 Composición de los residuos de construcción y demolición**

La composición de los RCD depende del tipo de infraestructuras y está en función al sitio donde se genera la actividad, por ejemplo, para la construcción de carreteras los RCD estarán compuestos por gran cantidad de materiales excavados; en el caso de la demolición de edificios, estos estarán compuestos en su mayoría por concreto (Gálvez-Martos, Styles, Schoenberger, y Zeschmar-Lahl, 2018). Los materiales como el concreto y el ladrillo se consideran de baja reactividad química en condiciones ambientales normales, razón por la cual suelen clasificarse como residuos no peligrosos. No obstante, estos materiales no son completamente inertes, ya que pueden experimentar reacciones fisicoquímicas frente a agentes agresivos como sulfatos, cloruros o dióxido de carbono, generando procesos de deterioro y potenciales impactos ambientales (Wu, Yu y Shen, 2017).

Por ello, se identificaron que entre los materiales más comunes que se generan están: los residuos de concreto que representan un 40% del total de RCD, ladrillos (12-40%), madera tratada entre 2-4%, asfalto (4-26%), metales 4%, plásticos (0.1-2%) y otros que incluye, aerosoles, restos electrónicos, envases removedores de grasa, restos de tubos fluorescentes, restos de cerámicos, baterías, filtros de aceite, envases lubricantes, que representan de 2 a 36% (Deloitte, 2017).

### **3.2 Adoquines**

Los adoquines de concreto son elementos prefabricados empleados en pavimentos urbanos y peatonales por su resistencia, facilidad de instalación y mantenimiento. En el Perú, la NTP 399.611:2017 establece los requisitos técnicos, diferenciando categorías según el tipo de tránsito que soportan (peatonal, vehicular ligero o pesado) (INACAL, 2017).

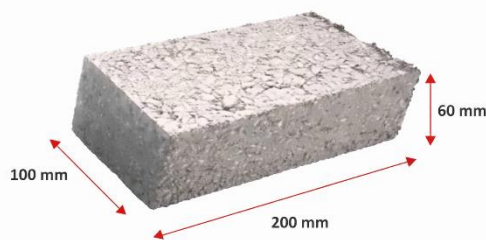
La norma contempla criterios de resistencia a la compresión, absorción de agua, tolerancias dimensionales y resistencia al desgaste, garantizando la calidad del producto final. De esta forma, se asegura que los adoquines fabricados puedan responder a las condiciones climáticas y de uso propias del país.

Requisitos principales:

- Espesor nominal y resistencia mínima a compresión.
- Límites de absorción de agua ( $\leq 6\%$ ).
- Tolerancias en dimensiones y apariencia

**Figura 3.1**

*Dimensiones de adoquines Tipo II*



### 3.2.1 Requisitos de los adoquines

- **Requisitos físicos**

**Tabla 3.1**

*Espesor nominal y resistencia a la compresión*

Tipo	Espesor nominal (mm)	Resistencia a la compresión, min. MPa (kg/cm <sup>2</sup> )	
		Promedio de 3 unidades	Unidad individual
I (Peatonal)	40	31 (320)	28 (290)
	60	31 (320)	28 (290)
II (Vehicular ligero)	60	41 (420)	37 (380)
	80	37 (380)	33 (340)
	100	35 (360)	32 (325)
III (Vehicular pesado, patios industriales o de contenedores)	≥80	55 (561)	50 (510)

Nota. Los valores corresponden a los requisitos mínimos de resistencia a la compresión establecidos en función del espesor nominal del adoquín.

Fuente: Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Norma Técnica Peruana NTP 399.611:2017.

Adoquines de concreto

- **Requisitos de tolerancia dimensional**

**Tabla 3.2**

*Tolerancia dimensional*

Tolerancia dimensional, máximo. (mm)		
Longitud	Ancho	Espesor
± 1.6	± 1.6	± 3.2

Nota. Las tolerancias dimensionales corresponden a los límites máximos permisibles para adoquines de concreto.

Fuente: Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Norma Técnica Peruana NTP 399.611:2017.

Adoquines de concreto.

### 3.3 Humo de sílice

El humo de sílice (o sílice micrométrica) es un subproducto ultrafino generado en los procesos de producción de silicio y ferro-silicio. Está compuesto predominantemente por dióxido de silicio en estado amorfo, con un tamaño de partícula muy fino y una superficie específica alta, del orden de 15-30 m<sup>2</sup>/g, lo que lo convierte en una adición mineral altamente reactiva para materiales de concreto (Zhao et al., 2024).

Su incorporación en mezclas de concreto aporta mejoras en las propiedades mecánicas y de durabilidad mediante dos mecanismos principales:

1. Reacción puzolánica: el dióxido de silicio reacciona con hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) liberado durante la hidratación del cemento, formando gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) adicional, lo que densifica la matriz y refuerza la liga interna (Boomibalan & Perumal, 2023; Zhao et al., 2024).
2. Efecto físico de relleno: las partículas ultrafinas del humo de sílice rellenan microvacíos dentro de la matriz, reducen la porosidad y mejoran la densidad del material

Además, en condiciones de exposición ambiental agresiva, se ha observado que el humo de sílice mejora la adhesión de capas de recubrimiento, reduce la penetración de cloruros y mejora la resistencia frente a condiciones de variación humedad-secado (Zhang et al., 2023)

#### 3.3.1 Comportamiento en la mezcla

La inclusión del humo de sílice en la mezcla genera efectos favorables tanto desde el punto de vista químico como físico:

- Químico: como ya se mencionó, reacciona con Ca(OH)<sub>2</sub> para producir más C-S-H, lo cual incrementa la resistencia y mejora la microestructura.
- Físico: su tamaño extremadamente fino le permite rellenar vacíos microscópicos en la matriz de concreto, densificando la matriz y reduciendo la porosidad (Hashim, Al-Mosawi, & Abdulsada, 2024).

También se ha reportado que partículas puzolánicas como el humo de sílice presentan alta capacidad de adsorción de agua debido a su gran área superficial, aspecto que debe controlarse para evitar efectos adversos en el manejo de la mezcla (Zhao et al., 2024).

### 3.3.1.1 La resistencia a la compresión

- **Tamaño de partícula**

Las partículas de humo de sílice son extremadamente finas, lo que les permite ajustar y rellenar los intersticios entre partículas de cemento y agregados finos, mejorando así la compactación y reduciendo la porosidad interna. Estudios modernos indican que, aunque la nano sílice (NS) puede tener efectos superiores en ciertos casos, el humo de sílice también logra mejoras sustanciales cuando se aplica en proporciones adecuadas (Boomibalan & Perumal, 2023).

- **Porcentajes de adición**

En investigaciones recientes se ha observado que proporciones típicas entre 5% y 15% del peso del cemento son efectivas para mejorar resistencia y durabilidad; en muchos casos valores aproximados al 10% se consideran óptimos para lograr un buen compromiso entre mejora mecánica y trabajabilidad (Badalyan et al., 2024; Khan et al., 2023). Sin embargo, por encima de ese rango puede presentarse retracción, aglomeración o disminución de la resistencia al incrementarse la cantidad de humo de sílice (Lekhya & Kumar, 2024).

- **Edades de curado**

Los efectos del humo de sílice sobre la resistencia tienden a intensificarse en edades medias a tardías ( $\geq 28$  días). En muchos de los estudios recientes, el incremento más notable en resistencia se ve entre 28 y 90 días, una vez que la reacción puzolánica ha tenido tiempo de desarrollarse (Boomibalan & Perumal, 2023).

En suma, el humo de sílice es hoy una de las adiciones más estudiadas para mejorar la densificación, la durabilidad frente a cloruros, y la resistencia mecánica en concretos de alto desempeño.

### 3.4 Condiciones climáticas y costeras de Lima

El concreto expuesto a zonas costeras, como las presentes en la ciudad de Lima, se ve sometido a condiciones de elevada humedad relativa (superior al 80% en gran parte del año), presencia de sales marinas y variaciones cíclicas de humedad y secado. Estos factores generan procesos de deterioro acelerado que comprometen la durabilidad del material.

Los mecanismos principales son:

- Ingreso de cloruros: iones de cloruro presentes en el ambiente marino penetran la matriz del concreto y favorecen la corrosión de las armaduras. Estudios recientes señalan que la concentración crítica de cloruros para iniciar la corrosión puede oscilar en torno al 0,3–0,5% del peso del cemento, dependiendo de la mezcla y las condiciones de exposición (Yamamoto et al., 2024).
- Ataque de sulfatos: en zonas costeras, suelos y aguas pueden contener sulfatos solubles ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ) que reaccionan con productos de hidratación del cemento (especialmente  $\text{C}_3\text{A}$ ), produciendo etringita y yesos secundarios. Al cristalizar dentro de la matriz, estos compuestos generan tensiones internas, fisuración, pérdida de resistencia y eventual deterioro del concreto (Rincón et al., 2024).
- Ciclos de humedad-secado: frecuentes en la costa limeña debido a la neblina y garúa. Estos ciclos producen movimientos volumétricos que incrementan la micro fisuración y facilitan la penetración de agentes agresivos (Flores et al., 2022).
- Carbonatación: la alta humedad relativa puede acelerar la reacción con  $\text{CO}_2$ , bajando el pH del concreto y reduciendo su capacidad inactiva frente a la corrosión de las armaduras (Villarreal et al., 2025).

La incorporación de humo de sílice mitiga estos procesos al densificar la matriz del concreto y reducir su permeabilidad. Sin embargo, el uso de RCD puede incrementar la absorción de agua la porosidad, por lo que la combinación óptima de ambos materiales resulta crucial para mejorar la durabilidad en condiciones costeras.

### 3.5 Evaluación preliminar de sostenibilidad ambiental

La evaluación preliminar de sostenibilidad ambiental en proyectos de construcción permite identificar los efectos asociados al uso de recursos, la generación de residuos y las oportunidades de aprovechamiento de materiales, con el fin de reducir la presión sobre los ecosistemas (Kylili & Fokaidis, 2021).

En el caso del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en adoquines, los principales beneficios ambientales se relacionan con la eficiencia en el uso de materiales y la valorización de residuos. Entre los aportes más relevantes destacan:

- Reducción en la extracción de agregados naturales, al sustituir parcialmente el agregado grueso convencional por material reciclado.
- Disminución del volumen de residuos destinados a botaderos o vertederos, promoviendo la economía circular.
- Menor huella ambiental asociada al transporte y disposición final de los residuos, ya que se aprovechan los materiales locales reciclados (Silva & Naik, 2020).

Estos beneficios contribuyen a una construcción más sostenible, al disminuir la demanda de recursos vírgenes y fomentar la reutilización de los materiales dentro del ciclo productivo. En coherencia con ello, la norma ISO 14040 (2006) establece los principios para el análisis del ciclo de vida (LCA), metodología que permite evaluar los impactos ambientales a lo largo de todas las etapas del producto. Sin embargo, en el presente estudio se opta por realizar una evaluación preliminar de sostenibilidad ambiental, considerando indicadores simplificados de aprovechamiento de recursos y valorización de RCD, debido a la falta de datos de inventario requeridos para un ACV completo (Guinée et al., 2021).

En los últimos años, diversas investigaciones han destacado la relevancia de integrar criterios de sostenibilidad en el diseño y evaluación de materiales de construcción. Zhao et al. (2024) enfatizan que el aprovechamiento de residuos y la optimización de recursos reducen los impactos ambientales asociados al ciclo de vida del concreto. De igual modo, Gálvez-Martos et al. (2018) y De Brito et al. (2018) subrayan que la valorización de los RCD representa una estrategia clave dentro de las políticas de economía circular promovidas a nivel internacional.

### 3.6 Normativas técnicas aplicables

La fabricación, uso y control de calidad de adoquines de concreto, así como la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD), están regulados por una serie de normas técnicas, tanto a nivel nacional como internacional. Estas normativas establecen criterios técnicos, ambientales y de seguridad que permiten asegurar la durabilidad, funcionalidad y sostenibilidad de los pavimentos construidos con adoquines.

#### 3.6.1 Normas peruanas

- **NTP 399.611:2017 – Adoquines de concreto para pavimentos – Requisitos y métodos de ensayo**

Esta norma establece los requisitos físicos, mecánicos y dimensionales que deben cumplir los adoquines de concretos fabricados en el Perú. En el caso de los adoquines Tipo II, destinados a zonas de tránsito vehicular ligero y medio, la norma exige una resistencia mínima a la compresión de 30 MPa. Asimismo, se establece que la absorción de agua no debe superar el 6% en masa, además de contemplar tolerancias dimensionales, resistencia al desgaste y métodos de ensayo estandarizados que aseguren la durabilidad y desempeño del producto (INACAL, 2017).

- **NTP 334.009: Cementos – Especificaciones químicas y físicas**

Regula las características químicas, mecánicas y de finura del cemento Portland empleado en la fabricación de concreto, incluyendo el usado en adoquines. Es crucial que el cemento cumpla con esta norma para asegurar la resistencia y durabilidad del producto final (INACAL, 2014).

- **Decreto Supremo N.º 003-2013-VIVIENDA – Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de Construcción y Demolición**

Esta norma reglamenta el manejo de los residuos generados por obras de construcción y demolición. Establece lineamientos para su clasificación, almacenamiento, transporte, disposición final o aprovechamiento, promoviendo la valorización de materiales como concreto reciclado en elementos constructivos (Ministerio de Vivienda, 2013).

### 3.6.2 Normas internacionales

- **ASTM C936/C936M-22 – Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units**

Emitida por la American Society for Testing and Materials (ASTM), esta norma define los requisitos de calidad para adoquines de concretos entrelazados (interlocking), tales como resistencia a la compresión (mínimo 55 MPa), absorción máxima de 5%, y tolerancias dimensionales. Es ampliamente utilizada como referencia internacional (ASTM, 2022).

- **UNE-EN 1338:2004 – Adoquines de concreto. Requisitos y métodos de ensayo**

Norma española adaptada a la Unión Europea que regula los requisitos de calidad de los adoquines de concreto. Define ensayos de resistencia, desgaste, congelación y deslizamiento, asegurando la durabilidad en diversas condiciones climáticas (AENOR, 2004).

# CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

## 4.1 Tipo de estudio y diseño de investigación

### 4.1.1 Tipo de estudio

Esta investigación presenta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recopilación de datos numéricos que pueden ser medidos, categorizados y analizados estadísticamente para identificar patrones y relaciones. A través de este análisis, se busca evaluar el desempeño técnico y la sostenibilidad de los adoquines elaborados con residuos de construcción y demolición (RCD), garantizando su viabilidad y cumplimiento de los estándares de calidad establecidos para la construcción sostenible. Asimismo, busca transformar el conocimiento teórico en una aplicación práctica para resolver un problema real en el ámbito de la gestión sostenible de materiales de construcción, utilizando teorías científicas y normativas establecidas. Con este propósito, se pretende comprobar y validar las hipótesis planteadas mediante la reutilización de residuos de concreto en la fabricación de adoquines, analizando las modificaciones en sus propiedades mecánicas y físicas.

### 4.1.2 Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental, ya que implica la manipulación de variables independientes para evaluar su impacto en las variables dependientes. En este sentido, se llevarán a cabo pruebas para determinar la resistencia de los adoquines de tipo II fabricados con distintos porcentajes de reutilización de concreto. Según Barrueta Tello (2023), el enfoque experimental permite controlar y modificar las variables independientes con el fin de analizar sus efectos sobre las propiedades mecánicas y físicas de los adoquines, como la absorción de agua, densidad y resistencia a la compresión, generando evidencias objetivas a través de ensayos y mediciones. De esta manera, los resultados obtenidos en la presente investigación permitirán sustentar la viabilidad técnica y ambiental de la reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) en la elaboración de adoquines de concreto destinados al tránsito peatonal.

## **4.2 Población, muestra y muestreo**

### **4.2.1 Población**

La población de estudio está conformada por adoquines de concreto prefabricado, diseñados con distintos porcentajes de reemplazo de agregados naturales por RCD: 0%, 25%, 45% y 60%. En todos los casos se incorporó 10% de humo de sílice como adición mineral activa, estableciéndose una resistencia a la compresión de diseño de  $f'_c = 380 \text{ kg/cm}^2$ .

La decisión de emplear humo de sílice en todas las mezclas se fundamenta en su reconocida capacidad para mejorar las propiedades del concreto, al actuar como puzolana altamente reactiva que densifica la matriz de concreto, reduce la porosidad y favorece el desarrollo de resistencias mecánicas superiores (Zhao et al., 2024). Investigaciones recientes señalan que proporciones próximas al 10% constituyen un rango óptimo para alcanzar un equilibrio entre desempeño mecánico, durabilidad y trabajabilidad (Boomibalan & Perumal, 2023). En consecuencia, no se elaboraron mezclas sin humo de sílice, dado que el propósito de la investigación fue analizar la variación del comportamiento de los adoquines en función del porcentaje de RCD, manteniendo constante la condición de mejora mediante la incorporación del 10 % de humo de sílice, lo que garantizó un criterio homogéneo de comparación.

Adicionalmente, considerando que los adoquines corresponden a elementos destinados a pavimentos de alto tránsito (Tipo II), se establecieron dimensiones de 6 cm de espesor, 10 cm de ancho y 20 cm de largo, en concordancia con lo dispuesto en la Norma Técnica Peruana (INACAL, 2017).

### **4.2.2 Muestra**

La muestra experimental estuvo constituida por un total de 80 adoquines de concreto, fabricados en cuatro grupos según la proporción de sustitución de agregado natural por agregado reciclado (RCD): 0%, 25%, 45% y 60%. En todos los casos, se mantuvo constante la incorporación de 10% de humo de sílice en reemplazo parcial del cemento, con el propósito de mejorar la matriz de concreto y garantizar un comportamiento homogéneo en las mezclas.

Para cada condición de mezcla se elaboraron 20 adoquines, de los cuales se seleccionaron 3 especímenes para cada ensayo mecánico y de durabilidad, siguiendo las recomendaciones de normas internacionales y estudios recientes que establecen un mínimo de tres especímenes para asegurar la validez estadística de los resultados (ASTM C39, 2020; RILEM TC 249, 2021).

La elección de 80 unidades resultó adecuada, dado que permitió cubrir la totalidad de los ensayos programados (compresión, flexión, ciclos de humedad-secado y ataque por sulfatos), garantizando representatividad y confiabilidad de los resultados experimentales. Además, la distribución de los especímenes contempló un margen suficiente para compensar posibles descartes o defectos de fabricación, aspecto recomendado en investigaciones actuales sobre prefabricados de concreto con materiales reciclados (Thomas & Gupta, 2022).

Es relevante destacar que no se consideró una mezcla control sin humo de sílice, ya que el objetivo central de la investigación fue analizar exclusivamente el efecto de la sustitución de agregado natural por RCD bajo un marco constante de adición puzolánica. La presencia uniforme del 10% de humo de sílice en todas las mezclas permitió reducir la variabilidad asociada a la reacción puzolánica, aislando el efecto del RCD como variable de estudio. Estudios recientes coinciden en que la inclusión del humo de sílice mejora significativamente la resistencia y durabilidad del concreto reciclado, justificando su empleo uniforme como condición de base (Choudhary & Kumar, 2021; Siddique et al., 2020).

#### **4.2.3 Muestreo**

Es de tipo no probabilístico, porque permitirá elegir de manera deliberada a la muestra que se va a examinar y a criterio del investigador (Ñaupás et al., 2018). Por tanto, el estudio es no probabilístico y se tomará en cuenta la NTP.

**Tabla 4.1***Cantidad de adoquines*

Ensayo	Edad (días)	Patrón (0%)	RCD 25%	RCD 45%	RCD 60%
Resistencia a la flexión	7	3	3	3	3
	14	3	3	3	3
	21	3	3	3	3
	28	3	3	3	3
	7	3	3	3	3
Resistencia a la compresión	14	3	3	3	3
	21	3	3	3	3
	28	3	3	3	3
Ciclos humedad-secado	28	3	3	3	3
Absorción por capilaridad	28	3	3	3	3
Abrasión	28	3	3	3	3
Durabilidad acelerada	28	2	2	2	2
Absorción por inmersión	28	3	3	3	3
Total por mezcla		20	20	20	21

Nota. Todas las mezclas incorporan 10% de humo de sílice respecto al peso del cemento. Los porcentajes indicados corresponden al nivel de sustitución de agregado natural por residuos de construcción y demolición (RCD). Elaboración propia.

**4.2.4 Materiales Empleados**

Para la elaboración de los adoquines de concreto con una resistencia de diseño de  $f'_c = 380$  kg/cm<sup>2</sup>, se utilizaron los siguientes materiales:

1. Agregados finos y gruesos: obtenidos de la tienda Sodimac, empleados como base granular en las mezclas de concreto.
2. Cemento: se utilizó Cemento Andino Tipo I, por ser un cemento Portland de uso general que cumple con los requisitos de la NTP 334.009, adecuado para elementos prefabricados de concreto.
3. Aditivos y materiales suplementarios:
  - Los Residuos de Construcción y Demolición recolectados de la empresa Cajas Ecológicas, procesados previamente para su incorporación como sustituto parcial de agregado grueso.
  - Humo de sílice: adquirido en Sodimac, empleado como adición puzolánica en un 10% de la mezcla, con el fin de mejorar la densificación del cemento

#### **4.2.4.1 Caracterización de los agregados**

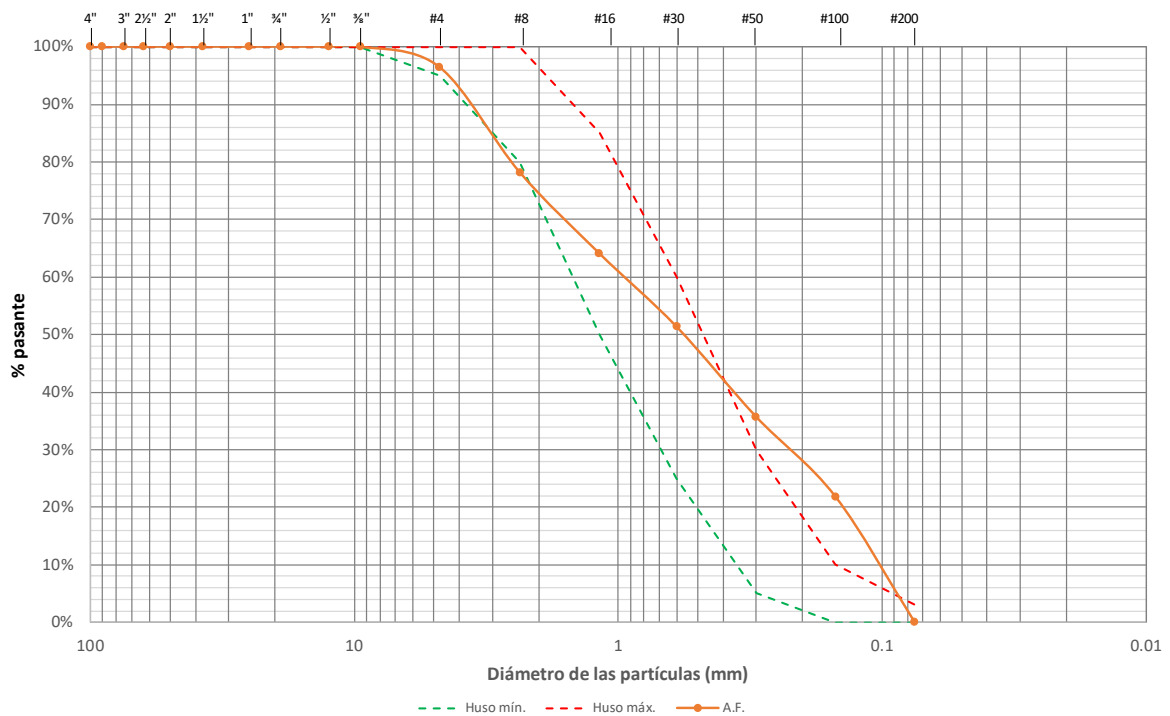
Se realizó la caracterización granulométrica de los agregados empleados en la investigación, comprendiendo la arena natural, la piedra triturada y el agregado reciclado proveniente de residuos de construcción y demolición. Este análisis tuvo como finalidad verificar que la distribución de tamaños de partículas de cada material se encuentre dentro de los rangos establecidos por la normativa técnica vigente, así como garantizar una adecuada trabajabilidad, compactación y desempeño mecánico de los adoquines de concreto.

La granulometría de los agregados se determinó mediante el ensayo de análisis por tamizado, conforme a los procedimientos establecidos en las Normas Técnicas Peruanas aplicables, obteniéndose las curvas granulométricas correspondientes. Dichas curvas permiten evaluar el grado de uniformidad y continuidad del material, aspectos fundamentales para lograr un adecuado empaquetamiento de partículas y una reducción de vacíos en la matriz del concreto.

En la figura 4.1 se presenta la curva granulométrica de la arena natural, en la figura 4.2 la correspondiente a la piedra triturada y en la figura 4.3 la del agregado reciclado, las cuales fueron comparadas con los límites granulométricos establecidos por la normativa, evidenciándose que los materiales empleados resultan aptos para su utilización en la fabricación de adoquines de concreto.

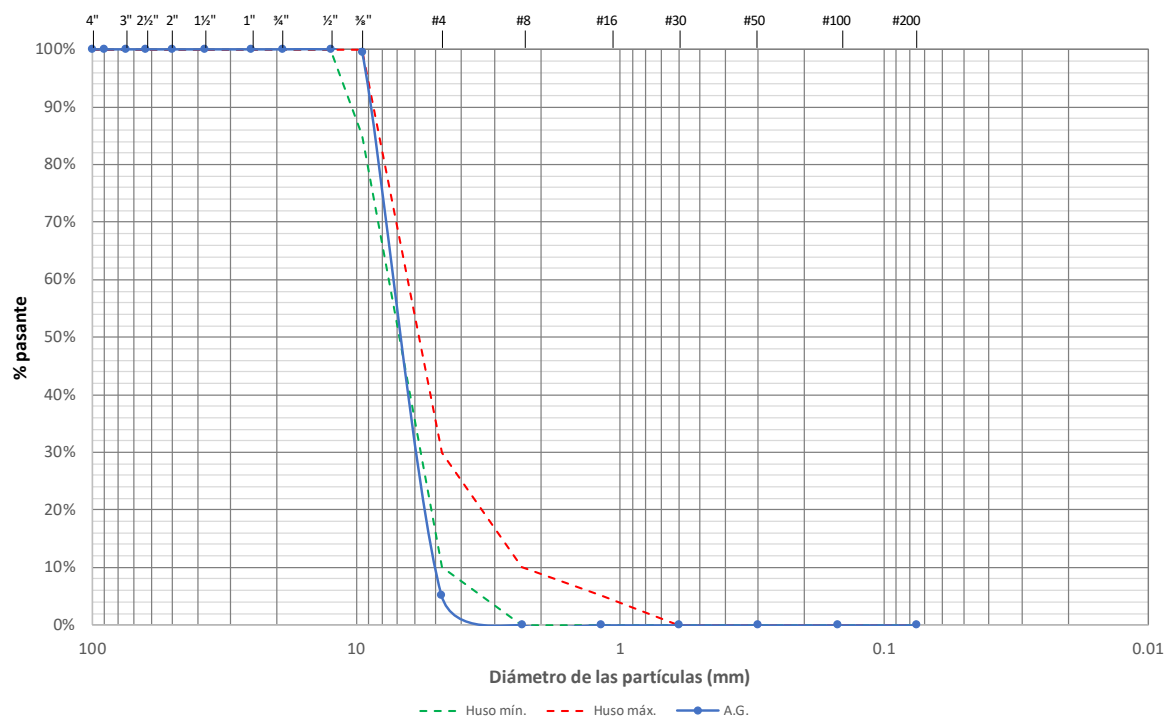
**Figura 4.1**

*Curva granulométrica de la arena y huso granulométrico según la NTP 400.037*



**Figura 4.2**

*Curva granulométrica de la piedra (confitillo) y huso granulométrico según la NTP 400.012*



Nota. Basado en el ensayo de tamizado según NTP 400.012/ASTM C33; se observa una gradación uniforme (aproximadamente huso #8) adecuada para su uso como agregado grueso en adoquines de concreto.

La figura 4.2 muestra la curva granulométrica del agregado grueso (confitillo), la cual se ajusta de manera general al huso granulométrico mínimo y máximo establecido por la NTP 400.012. La mayor parte del material se concentra en el rango correspondiente al tamaño nominal del agregado, evidenciando una gradación adecuada. Las ligeras desviaciones observadas en algunos tamices no afectan el comportamiento del agregado en el diseño de mezcla propuesto.



#### **4.2.5 Variables de estudio**

La presente investigación considera como variables independientes el porcentaje de reemplazo de agregado grueso por RCD y la incorporación de humo de sílice (10% respecto al peso del cemento). Las variables dependientes corresponden a los indicadores de desempeño físico-mecánico y de durabilidad (resistencia a la compresión, absorción, pérdida de masa por ciclos de humedad-secado, resistencia frente a sulfatos, etc.). Asimismo, se incluyeron indicadores ambientales (reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y disminución de extracción de áridos naturales) como parte de la evaluación preliminar de sostenibilidad.

#### **4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### **4.3.1 Técnicas**

Se utilizará la observación, ya que permite registrar de manera sistemática los hechos que ocurren durante los ensayos experimentales, facilitando la medición de las propiedades mecánicas y físicas de los adoquines (González et al., 2021). Este procedimiento se apoyará en listas de cotejo estandarizadas, lo que garantizará la confiabilidad y consistencia de los datos recolectados.

El diseño de la mezcla para los adoquines se realizará utilizando el Método ACI 211.1, el cual permitirá obtener una proporción óptima de los materiales empleados. Durante la ejecución de la investigación, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de estudios previos y de la normativa vigente, lo que garantizará la resolución de posibles dudas del investigador y contribuirá al éxito del proyecto.

Se considerarán las Normas Técnicas Peruanas aplicables, entre ellas:

- NTP 399.611:2017 – Adoquines de concreto para pavimentos – Requisitos y métodos de ensayo.
- NTP 334.009:2016 – Cemento Portland – Especificaciones.
- NTP 400.050:2017 – Residuos de construcción y demolición – Gestión y aprovechamiento.

### 4.3.2 Instrumentos

- Balanza digital de precisión: Para el pesaje de agregados, cemento y adiciones; asegura exactitud en la proporción de la mezcla.
- Tamices normalizados: Para determinar la granulometría de agregados finos y gruesos, siguiendo la NTP 400.050.
- Máquina de ensayo de compresión universal: Para medir la resistencia a la compresión de los adoquines según NTP 399.611:2017.
- Horno de secado: Para secar muestras antes de determinar humedad y absorción, siguiendo NTP 399.611:2017.
- Vasos de precipitados, balanzas auxiliares y cronómetros: Para ensayos complementarios de propiedades físicas.
- Mezcladora de concreto: Para obtener mezclas homogéneas de adoquines según ACI 211.1.
- Moldes para adoquines: Para fabricar adoquines con dimensiones estandarizadas según NTP 399.611:2017.

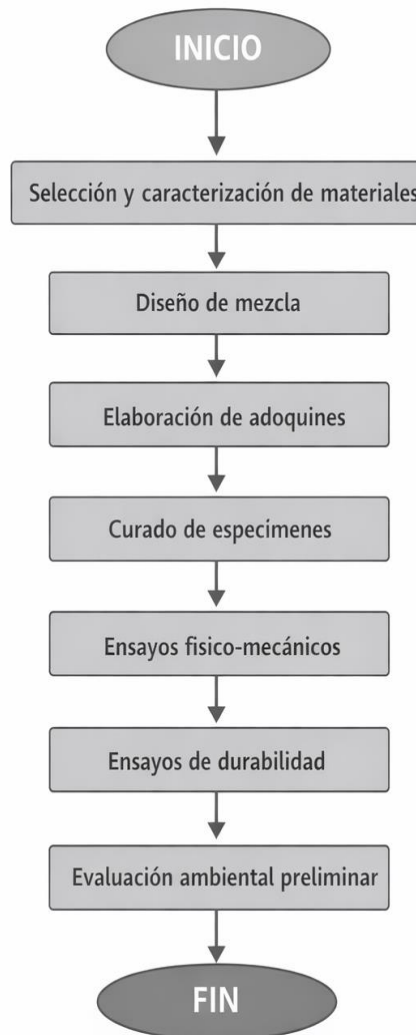
### 4.3.3 Procedimientos

1. Recolección de los RCD de la empresa Cajas Ecológicas.
2. Elaboración del diseño de mezcla con el método ACI
3. Traslado de la materia prima al Laboratorio de Materiales de la Universidad de Lima.
4. Análisis de granulometría por tamizado.
5. Elaboración de adoquines de 0%, sin agregado reciclado, pero con 10% de humo de sílice con respecto al cemento.
6. Elaboración de adoquines de 25%, 45%, 60% con agregado reciclado.
7. Determinación de las propiedades físicas del adoquín (dimensiones, color, peso, absorción de agua)
8. Determinación de las propiedades mecánicas del adoquín (resistencia a la compresión y flexión)
9. Evaluación del impacto ambiental y durabilidad.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que describe el procedimiento general seguido durante el desarrollo de la investigación, desde la recolección de datos hasta el análisis de resultados.

**Figura 4.4**

*Diagrama de flujo*



#### **4.3.4 Ensayos de agregados**

Se realizaron los ensayos granulométricos para el agregado fino y grueso, de acuerdo con la NTP 400.012 y NTP 400.037. A través de estos ensayos se determinaron parámetros fundamentales como el Tamaño Máximo Nominal (TMN) y el módulo de fineza, los cuales constituyen insumos esenciales para el proceso de diseño de mezcla.

Estos resultados permitieron establecer la proporción adecuada de agregados y garantizar que las mezclas cumplan con los requisitos de desempeño estipulados en la normativa.

### 4.3.5 Comparación de propiedades de agregados naturales y reciclados

Con el propósito de establecer una base técnica para el análisis de desempeño de los adoquines, se realizó la caracterización comparativa de los agregados naturales y los agregados reciclados de concreto (RCD) utilizados en la investigación. Esta caracterización incluyó la determinación de la granulometría, humedad, absorción y propiedades físicas de cada material, conforme a los procedimientos descritos en las Normas Técnicas Peruanas NTP 400.012 y NTP 400.037.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4, donde se observa que los agregados reciclados presentan mayor contenido de humedad y finos respecto a los agregados naturales, debido a la presencia de mortero adherido y una textura superficial más rugosa. Estas diferencias inciden directamente en la trabajabilidad y en la absorción de agua de las mezclas, aspectos relevantes para la posterior interpretación de los ensayos de durabilidad.

**Tabla 4.2**

*Comparación de propiedades físicas y granulométricas de los agregados naturales y reciclados*

Propiedad	Norma aplicada	Agregado natural (arena y confitillo)	Agregado reciclado (RCD – concreto)	Observaciones
Humedad (%)	NTP 400.037	Arena: 1.09 Piedra chancada: 0.38	5.71	El RCD presenta mayor retención de humedad por su alta porosidad y mortero adherido.
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM C127	2650	2400	Ligera disminución en RCD por su menor densidad y contenido de vacíos.
Absorción de agua (%)	NTP 400.037	1.2	4.5	Mayor capacidad de absorción del RCD.
Granulometría – Agregado fino (arena)	NTP 400.012	N°4: 3.6 % N°8: 18.3 % N°16: 14.1 % N°30: 12.8 % N°50: 15.6 % N°100: 13.9 % Fondo: 21.9 %	—	Dentro del rango óptimo para módulo de fineza ≈ 2.7.

(continúa)

(continuamos)

Propiedad	Norma aplicada	Agregado natural (arena y confitillo)	Agregado reciclado (RCD – concreto)	Observaciones
Granulometría – Agregado grueso (confitillo)	NTP 400.012	3/8": 0.4 % N4: 94.3 % Fondo: 5.2 %	—	Tamaño máximo nominal 3/8", distribución uniforme.
	NTP 400.012	—	3/8": 8.6 % N4: 62.8 % Fondo: 28.7 %	Mayor proporción de partículas finas y polvo de mortero.
Contenido de finos (%)	NTP 400.012	1.5	3.8	El RCD contiene restos de pasta de cemento y partículas menores.
Aspecto visual	Observación directa	Superficie lisa, color uniforme	Superficie rugosa, color heterogéneo	El RCD presenta mayor angularidad.

Desde el punto de vista técnico, el agregado reciclado mostró un incremento significativo en la humedad y absorción debido a la presencia de mortero adherido, lo cual reduce su densidad y modifica la relación agua/cemento efectivo durante la mezcla. Asimismo, la granulometría del RCD presentó una mayor proporción de finos, lo que puede afectar la trabajabilidad, pero también contribuir a una mejor compactación si se controla adecuadamente la relación A/C. Estas diferencias explican, en parte, los resultados obtenidos posteriormente en los ensayos de compresión, flexión y absorción, donde las mezclas con mayores porcentajes de RCD tienden a presentar incrementos en la absorción de agua y ligeras variaciones en la resistencia mecánica inicial, compensadas por la acción del humo de sílice que densifica la matriz del concreto.

#### 4.4 Método de análisis de datos

El análisis de los resultados se efectuó mediante un método comparativo, contrastando el comportamiento de los adoquines fabricados con y sin incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD). Este procedimiento permitió identificar las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas en función del porcentaje de reemplazo, aportando evidencia objetiva para las conclusiones.

#### 4.4.1 Diseño de mezcla

##### 4.4.1.1 Diseño de mezcla según el método ACI 211.1

El diseño de la mezcla se desarrolló tomando como referencia las directrices del ACI 211.1, estableciendo como resistencia a la compresión de diseño  $f'_c = 380 \text{ kg/cm}^2 (\approx 37.2 \text{ MPa})$ . Al no contar con una desviación estándar obtenida de al menos 30 resultados previos, se adoptó el criterio simplificado indicado por la versión actual del ACI 211.1 para la determinación de la resistencia promedio requerida, expresado mediante la relación:

$$f'_{cr} = 1.1 f'_c + 5.0 \text{ MPa}$$

Aplicando dicha expresión, se obtuvo una resistencia requerida  $f'_{cr} = 468 \text{ kg/cm}^2 (\approx 45.9 \text{ MPa})$ , valor que sirvió de base para la determinación de las proporciones de los materiales en cada mezcla.

De acuerdo con el método ACI 211.1, la relación agua/cemento se selecciona en función de la resistencia a compresión requerida para concretos convencionales, en este caso correspondería a un valor menor que 0.38; no obstante, en la presente investigación se adoptó una relación a/c de 0.55, considerando que los adoquines evaluados corresponden a elementos prefabricados no estructurales, fabricados con concreto de consistencia seca ( $slump \approx 0 \text{ mm}$ ) y con la incorporación de agregados reciclados de construcción y demolición (RCD), los cuales presentan mayor absorción y porosidad en comparación con agregados naturales.

Asimismo, la adición de humo de sílice en un 10 % del peso del cemento contribuye a la densificación de la matriz de concreto, mejorando la adherencia pasta-agregado y compensando parcialmente el efecto de una mayor relación a/c sobre la resistencia mecánica. En ese sentido, la relación a/c adoptada responde a criterios de trabajabilidad, compactación y comportamiento real del material, manteniendo como referencia el método ACI 211.1, pero ajustándolo a las condiciones específicas del estudio y a los requerimientos de la NTP 399.611:2017 para adoquines de concreto.

El procedimiento incluyó:

- Determinación de la resistencia requerida mediante la expresión indicada por el ACI 211.1 para casos sin desviación estándar.
- Selección del *slump*, fijado en 0 pulgadas, en concordancia con la naturaleza de los adoquines prefabricados.
- Determinación del contenido de agua en función del tamaño máximo nominal del agregado y la consistencia requerida.
- Determinación de la relación agua/cemento (a/c), adoptada en 0.55, conforme a las recomendaciones del método ACI 211.1.
- Cálculo del contenido de cemento y de los volúmenes absolutos de cada material (cemento, agua, aire y agregados).
- Corrección por humedad de los agregados, ajustando las proporciones a las condiciones reales de fabricación.
- Este proceso permitió definir la mezcla patrón por metro cúbico, la cual fue posteriormente ajustada para la elaboración de un aduquín individual.

#### **4.4.1.2 Dosificación final de los adoquines**

A partir del diseño realizado tomando como referencia el método ACI 211.1, se estableció la dosificación de materiales para la fabricación de los adoquines. En todos los casos se consideró:

- Una resistencia objetivo de 380 kg/cm<sup>2</sup>
- Una relación a/c = 0.55
- La incorporación de 10% de humo de sílice respecto al peso del cemento

La relación a/c adoptada responde tanto a las recomendaciones del método ACI 211.1 para concretos de consistencia seca como a las condiciones prácticas de elaboración de las mezclas. La fabricación de los adoquines se realizó de manera manual, empleando carretilla y herramientas convencionales, sin el uso de mezcladora mecánica (trompo), lo que hizo necesario adoptar una relación a/c que permitiera una adecuada homogeneización de los materiales sin comprometer la resistencia especificada.

El humo de sílice se incorporó de manera uniforme en todas las mezclas, debido a su reconocida capacidad para mejorar la microestructura del concreto.

Investigaciones recientes (Boomibalan & Perumal, 2023; Zhao et al., 2024) demuestran que proporciones cercanas al 10% optimizan la resistencia mecánica, reducen la porosidad y aumentan la durabilidad frente a ambientes agresivos. Su uso en el presente estudio asegura un criterio homogéneo de comparación y contribuye a compensar la mayor absorción característica de los agregados reciclados.

Asimismo, el agregado grueso natural fue reemplazado por el RCD en los niveles de sustitución definidos en el diseño experimental, conforme al objetivo experimental de evaluar el efecto del nivel de sustitución. Estudios recientes (Farooq et al., 2023; Wijatmiko et al., 2024) indican que reemplazos intermedios mantienen resistencias adecuadas en elementos prefabricados, mientras que porcentajes superiores requieren la incorporación de adiciones puzolánicas, como el humo de sílice, para asegurar un desempeño mecánico y de durabilidad satisfactorio.

En la Tabla 4.3 se muestra la dosificación patrón por m<sup>3</sup> de mezcla en condiciones húmedas.

**Tabla 4.3**

*Dosificación de materiales por m<sup>3</sup> de mezcla*

Mezcla	0% de RCD	25% de RCD	45% de RCD	60% de RCD
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	540.79	540.79	540.79	540.79
Humo de sílice (kg/m <sup>3</sup> )	60.09	60.09	60.09	60.09
Agua (L/m <sup>3</sup> )	300.44	300.44	300.44	300.44
Arena gruesa (kg/m <sup>3</sup> )	759	759	759	759
Piedra/Confitillo (kg/m <sup>3</sup> )	1043.63	782.72	573.99	417.45
RCD (kg/m <sup>3</sup> )	0	260.91	469.63	626.18

De este modo, la dosificación final por m<sup>3</sup> constituye la base para la producción de los adoquines experimentales, asegurando condiciones homogéneas de comparación entre las diferentes proporciones de sustitución de RCD. Este diseño permitió estandarizar el proceso de fabricación y garantizar que las propiedades mecánicas y de durabilidad evaluadas respondan únicamente a la variación del agregado reciclado. En el siguiente apartado se detalla el procedimiento de elaboración de los adoquines, donde se aplicó la dosificación aquí establecida, siguiendo parámetros normativos y condiciones controladas de laboratorio.

#### **4.4.2 Elaboración de adoquines**

La elaboración de los adoquines se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Lima, siguiendo el diseño de mezcla previamente establecido. El procedimiento contempló las siguientes etapas

##### **4.4.2.1 Preparación de materiales**

Se utilizaron agregados finos y gruesos en condiciones secas, cemento Portland Tipo I, humo de sílice (10%) y agua potable. Los RCD fueron previamente triturados, tamizados y acondicionados para cumplir con los requisitos granulométricos normativos.

El RCD utilizado fue adquirido en la empresa Cajas Ecológicas, donde se comercializa material reciclado ya procesado mediante trituración y clasificación a un tamaño nominal de 3/8" (9.5 mm). Si bien no se contó con información detallada sobre la antigüedad del concreto de origen, el agregado fue acondicionado para cumplir con los requisitos granulométricos de la NTP 400.037. Investigaciones recientes (Kou & Poon, 2020; Farooq et al., 2023) han demostrado que la edad del concreto de procedencia no constituye un factor determinante en el desempeño mecánico de las mezclas recicladas, siempre que el material sea adecuadamente procesado y se incorporen adiciones minerales puzolánicas como el humo de sílice. Bajo estas condiciones, el presente estudio confirma la viabilidad técnica del uso de RCD como sustituto parcial del agregado grueso natural en la fabricación de adoquines de concreto.

##### **4.4.2.2 Mezclado**

El proceso de mezclado se realizó en una hormigonera eléctrica, incorporando inicialmente los agregados y el humo de sílice, seguidos por el cemento y finalmente el agua, hasta obtener una mezcla homogénea. Se fijó un *slump* de 0 pulgadas, condición adecuada para la fabricación de elementos prefabricados compactos como adoquines, los cuales requieren alta densificación y mínima trabajabilidad en estado fresco.

##### **4.4.2.3 Moldeado y compactación**

La mezcla se colocó en moldes metálicos de 10 × 20 × 6 cm, aplicando vibración mecánica y presión manual para eliminar vacíos y garantizar la uniformidad de los especímenes

## Figura 4.5

### *Moldeado y compactación de adoquines*



a) Adoquines inmediatamente después del desmolde



b) Mesa vibradora con los moldes para adoquines

- **Desencofrado y curado**

Tras alcanzar el tiempo de fraguado inicial, estimado en aproximadamente 20 minutos, los adoquines fueron retirados cuidadosamente de los moldes y mantenidos en un ambiente controlado durante 24 horas. Posteriormente, se procedió al curado en agua bajo condiciones de laboratorio, considerando períodos de evaluación a los 7, 14, 21 y 28 días, de acuerdo con lo establecido en la NTP 399.611:2018 para unidades de adoquines de concreto. Este procedimiento garantizó el desarrollo progresivo de las resistencias mecánicas y contribuyó a mejorar la durabilidad de los especímenes frente a posibles agentes externos.

- **Número de especímenes**

Se fabricaron 80 unidades en total, distribuidas en cuatro grupos de 20 adoquines correspondientes a cada nivel de reemplazo de RCD.

#### 4.4.3 Ensayos a los adoquines de concreto

En esta investigación se aplicaron diversos ensayos mecánicos, de durabilidad y de caracterización química a los adoquines fabricados, con el propósito de evaluar integralmente su desempeño.

Las pruebas realizadas se orientaron a determinar la resistencia estructural, el comportamiento frente a condiciones ambientales agresivas y las características microestructurales del material. A continuación, se describen los ensayos realizados conforme a las normas técnicas aplicables.

Cabe precisar que, si bien las normas técnicas empleadas como referencia para los ensayos de resistencia a compresión y flexión establecen dimensiones estandarizadas para las probetas de ensayo, tales como cilindros o prismas de concreto, en la presente investigación los ensayos se realizaron directamente sobre adoquines de concreto, cuyas dimensiones y geometría difieren de las probetas normalizadas.

Esta diferencia geométrica genera un efecto de tamaño en los resultados mecánicos, por lo que los valores de resistencia obtenidos tienden a ser mayores que aquellos determinados a partir de probetas normalizadas. En consecuencia, los resultados deben interpretarse bajo un enfoque comparativo entre las mezclas evaluadas, permitiendo analizar el efecto de la incorporación de agregados reciclados y humo de sílice, sin que ello implique una comparación directa con los valores normativos establecidos para elementos estructurales convencionales.

#### **4.4.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión**

De acuerdo con la NTP 399.611:2018, se establece el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la compresión en adoquines prefabricados.

Este ensayo resulta fundamental dado que la resistencia a la compresión constituye el parámetro principal para clasificar los adoquines de concreto y garantizar su desempeño en pavimentos sometidos a cargas vehiculares y peatonales.

El procedimiento inicia con la extracción del adoquín del ambiente de curado, permitiendo que repose a temperatura ambiente durante algunos minutos. A continuación, se procede a pesar los adoquines y luego a medir cuidadosamente las dimensiones del área que estará en contacto con la carga, utilizando el vernier para obtener lecturas precisas. Posteriormente, la muestra se coloca sobre la platina inferior de la prensa hidráulica, asegurando su correcta alineación y centrado respecto al eje de carga.

Una vez posicionada adecuadamente la muestra, se acciona la prensa hidráulica, la cual aplica carga de manera continua hasta que se produce la falla del adoquín.

**Figura 4.6**

*Ensayo de resistencia a la compresión*



a) adoquín sometido al ensayo de resistencia a la compresión



b) Adoquín de 0% RCD posterior al ensayo de resistencia a la compresión

### Cálculo

Para hallar la resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup> la norma nos presenta las siguientes fórmulas:

$$A_g = L \times W$$

Donde:

$A_g$  área bruta de la muestra (cm<sup>2</sup>)

$L$  longitud de la muestra (cm)

$W$  ancho de la muestra (cm)

$$R = \frac{P}{A_g}$$

Donde:

$R$  esfuerzo a compresión de la muestra (kg/cm<sup>2</sup>)

$A_g$  área bruta de la muestra (cm<sup>2</sup>)

$P$  carga (kg)

#### 4.4.3.2 Ensayo de resistencia a la flexión

La prueba de resistencia a la flexión se llevará a cabo siguiendo los lineamientos de la norma ITINTEC 339.124. Para este ensayo, se emplearán tres barras de acero de 20 cm de longitud cada una.

La resistencia a flexión constituye un indicador del comportamiento frente a esfuerzos de tracción indirecta, relevantes en la distribución de cargas sobre pavimentos adoquinados

El procedimiento inicia con la extracción del adoquín del ambiente de curado, permitiendo que repose a temperatura ambiente durante algunos minutos. A continuación, se procede a pesar los adoquines y luego a medir cuidadosamente las dimensiones del área que estará en contacto con la carga, utilizando el vernier para obtener lecturas precisas. Para la prueba, se posicionan dos barras de acero en paralelo, separadas a una distancia equivalente de 180mm. Una tercera barra se ubica de manera paralela y equidistante a los puntos de apoyo. Finalmente, se aplica una carga progresiva sobre la muestra hasta que se produzca su fractura con una velocidad aplicada de carga de 350 N/S.

**Figura 4.7**

*Ensayo de resistencia a la flexión*



a) adoquín sometido al ensayo de resistencia a la flexión



b) Adoquines tras el ensayo de resistencia a la flexión

## **Cálculo**

Para hallar la resistencia a la flexión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

Donde:

- R* resistencia a la flexión (módulo de rotura) obtenida en cada muestra
- P* carga máxima aplicada (N)
- L* distancia entre apoyos (mm)
- b* ancho promedio de la muestra en la sección de rotura (mm)
- d* espesor promedio de la muestra en la sección de rotura (mm)

### **4.4.3.3 Ensayo de ciclos de humedad-secado (durabilidad)**

Para evaluar la durabilidad de adoquines de concreto expuestos a condiciones ambientales alternantes, se aplica el ensayo de ciclos de humedad-secado, el cual permite determinar la pérdida de masa como indicador del deterioro progresivo del material. Este se fundamenta en lo establecido por la NTP 399.611:2018 con lineamientos de la ASTM C140, aplicables a unidades de concreto prefabricadas, lo que garantiza la comparabilidad internacional y el rigor técnico de los resultados, permitiendo evaluar la durabilidad frente a ciclos de humedad y secado.

El procedimiento experimental adoptado en este estudio consiste en la exposición de los adoquines a ocho ciclos alternos de secado y humedecimiento, iniciando a partir del día 14 de curado. Cada ciclo tiene una duración de 48 horas: 24 horas en ambiente seco y ventilado a temperatura constante ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ) y 24 horas de inmersión completa en agua potable a temperatura ambiente. Este procedimiento simula las condiciones típicas de zonas costeras, como Lima, donde la alternancia de humedad y secado reproduce los efectos de niebla, alta humedad relativa y exposición al agua, permitiendo evaluar la durabilidad de los adoquines frente a estas condiciones (Chen et al., 2024; Guo et al., 2021; Liang et al., 2023).

Antes de iniciar el ensayo, los adoquines deben limpiarse adecuadamente y secarse al aire hasta alcanzar masa constante. Una vez finalizados los ocho ciclos, las muestras se vuelven a secar bajo las mismas condiciones iniciales, y se determina su masa final seca. Esta pérdida de masa permite estimar el grado de deterioro superficial provocado por la exposición prolongada a cambios de humedad, siendo este un parámetro relevante en la evaluación de durabilidad de mezclas con adiciones recicladas.

Adicionalmente, para determinar el efecto de los ciclos en la resistencia mecánica de los adoquines, se realiza un ensayo de compresión simple inmediatamente después del último ciclo. Este ensayo permite analizar si la integridad estructural interna del material se ha visto comprometida como resultado del proceso de degradación inducido por los cambios cíclicos de humedad y secado. La resistencia obtenida se comparará con la de adoquines de la misma edad que no fueron sometidos a los ciclos, lo cual proporcionará una evaluación integral del desempeño duradero de las mezclas.

Este procedimiento se aplicará a adoquines tipo II con 14 días de curado. La comparación entre las diferentes dosificaciones permitirá identificar el efecto de la incorporación de estos residuos reciclados sobre la durabilidad del concreto, evaluando tanto la pérdida de masa como la posible reducción en la resistencia a compresión. Esta metodología se basa en criterios usados en investigaciones previas relacionadas con el comportamiento a largo plazo de materiales con adiciones alternativas, evaluado durante períodos equivalentes a 28 a 30 días mediante ensayos acelerados de ocho ciclos de humedad-secado, tales como los estudios de Martínez-Lage et al. (2016) y Silva et al. (2019). Este enfoque permite simular de manera confiable el efecto del tiempo sobre la durabilidad, considerando que cada ciclo reproduce condiciones de secado y humedecimiento típicas de ambientes costeros.

## Figura 4.8

Ensayo de ciclos de humedad-secado (durabilidad)



a) adoquín sometido al ensayo de humedad-secado

### Cálculo

Para cuantificar la pérdida de masa después de los ciclos

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \left( \frac{W_i - W_f}{W_i} \right) \times 100$$

Donde:

$W_i$  masa inicial seca del adoquín antes del primer ciclo (g)

$W_f$  masa final seca del adoquín después del octavo ciclo (g)

#### 4.4.3.4 Ensayo de abrasión manual

Para la evaluación del desgaste superficial de los adoquines de concreto, se empleará un ensayo de abrasión manual adaptado, tomando como referencia los lineamientos generales establecidos en la NTP 339.183:2004.

Esta norma, basada en los principios recogidos en la norma UNE-EN 1338:2004, establece las condiciones para determinar la resistencia al desgaste de adoquines destinados a pavimentos exteriores.

El ensayo será aplicado a adoquines fabricados con distintas proporciones de RCD. Las muestras serán evaluadas a los 28 días de curado, conforme a los tiempos usuales de caracterización de propiedades mecánicas del concreto endurecido. Dado que el procedimiento se ejecutará manualmente, se ha adaptado la metodología de la norma a las condiciones disponibles. Se utilizará una lija de grano medio #80, dispuesta sobre la cara de trabajo del adoquín (cara superior), la cual deberá estar limpia y libre de impurezas. Sobre esta superficie se realizará un movimiento oscilatorio horizontal continuo, de forma manual, manteniendo un recorrido controlado para garantizar la uniformidad del desgaste. Para asegurar una presión constante durante el ensayo, se colocará una masa de aproximadamente 5 kg sobre el adoquín, directamente encima de la lija, simulando la carga vertical especificada en métodos normativos mecánicos.

El ensayo consistirá en la ejecución de 50 ciclos de ida y vuelta sobre la superficie de cada adoquín. Una vez completado el número total de ciclos, se limpia la superficie con un paño seco y se procede a determinar la pérdida de masa con una balanza de precisión.

## Figura 4.9

### Ensayo de abrasión manual



a) Adoquín durante el ensayo de abrasión manual. Vista 1



b) Adoquín durante el ensayo de abrasión manual. Vista 2

### Cálculo

$$V = \frac{P}{\rho}$$

Donde:

$V$  pérdida de volumen en milímetros cúbicos ( $\text{mm}^3$ )

$P$  pérdida de masa en gramos (g)

$\rho$  densidad del material en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

#### 4.4.3.5 Ensayo de absorción de agua por capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad fue realizado conforme a lo establecido en la 339.232:2010, la cual se basa en los lineamientos internacionales de la norma ASTM C1585-04.

Este método permite determinar la velocidad con la que el agua es absorbida por acción capilar a través de los poros conectados de una muestra de concreto endurecido (en este caso, adoquines). Este parámetro es útil para evaluar la calidad de la microestructura del concreto, especialmente en presencia de materiales reciclados que pueden alterar su porosidad.

Para la realización del ensayo, los adoquines fueron curados hasta la edad correspondiente (7, 14, 21 y 28 días), luego secados al aire hasta alcanzar masa constante y pesados en seco ( $W_0$ ). Cada muestra fue colocada en posición vertical, con una de sus bases (200 mm × 100 mm) en contacto con una lámina de agua de 5 mm de altura, según lo establecido en la norma; además, sus superficies laterales. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en recipientes con agua destilada y se realizaron mediciones de masa en intervalos de tiempo predeterminados (10, 30, 60, 120 minutos y 24 horas), secando previamente la base húmeda en cada registro para evitar errores por agua superficial

**Figura 4.10**

*Ensayo de absorción de agua por capilaridad*



a) Adoquín durante el ensayo absorción de agua por capilaridad. Vista 1



b) Adoquín durante el ensayo absorción de agua por capilaridad. Vista 2

**Cálculo**

$$A_t = \frac{W_t - W_0}{A}$$

Donde:

$A_t$  absorción acumulada al tiempo t (g/cm<sup>2</sup>)

$W_t$  masa de la muestra al tiempo t (g)

$W_0$  masa de la muestra seca (g)

A área expuesta al agua (cm<sup>2</sup>)

#### 4.4.3.6 Ensayo de absorción de agua por inmersión

El presente ensayo se realizó con el objetivo de determinar la absorción total de agua de los adoquines. Este parámetro permite evaluar indirectamente la porosidad del concreto, lo cual influye significativamente en su durabilidad frente a agentes externos.

El procedimiento seguido se basó en la NTP 399.613:2020, la cual establece los pasos necesarios para evaluar la absorción por inmersión de unidades prefabricadas de concreto, como adoquines vibro comprimidos. Esta norma es técnica y metodológicamente equivalente a la norma ASTM C140/C140M.

Según dicha normativa, las muestras deben ser inicialmente secadas en un horno a una temperatura de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar masa constante, la cual se define como la condición en que la diferencia entre dos pesadas consecutivas, separadas por un intervalo de al menos dos horas de secado adicional, sea menor o igual al 0.1% respecto al peso más reciente.

Una vez secas y enfriadas a temperatura ambiente, las muestras se pesan y se registra esta como su masa seca ( $M_s$ ). Posteriormente, se sumergen completamente en agua limpia a temperatura ambiente durante un período de  $24 \pm 1$  h, garantizando que el agua cubra por completo las unidades.

Transcurrido el tiempo de inmersión, se retiran los especímenes del agua, se secan superficialmente con un paño húmedo sin retirar agua del interior, y se pesan inmediatamente para obtener su masa saturada ( $M_h$ ). Este procedimiento permite estimar la capacidad de absorción de agua de los adoquines y, de manera indirecta, simula la exposición de las unidades a condiciones costeras, como la alta humedad relativa y la frecuente niebla característica de Lima, que afectan la penetración de agua y la durabilidad del concreto (Bai et al., 2023; Zheng et al., 2024).

**Figura 4.11**

*Ensayo de absorción de agua por inmersión*



a) Proceso de secado de adoquines en horno a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$



b) Adoquines en proceso de enfriamiento a temperatura ambiente

### **Cálculo**

$$\text{Absorción (\%)} = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100$$

Donde:

$M_h$  masa de la muestra saturada (g)

$M_s$  masa de la muestra seca (g)

#### **4.4.3.7 Ensayo acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados**

El presente ensayo se realizó con el objetivo de evaluar la resistencia y estabilidad de los adoquines frente a ambientes agresivos simulados mediante soluciones de sulfatos. Este tipo de ensayo permite estimar el comportamiento del material en condiciones de exposición química severa, las cuales aceleran los procesos de degradación y proporcionan una referencia anticipada de su durabilidad en servicio.

El procedimiento seguido corresponde a una adaptación del método acelerado empleado en la norma ASTM C1012/C1012M, el cual fue ajustado para unidades prefabricadas de concreto como los adoquines vibro comprimidos. En este caso, en lugar de evaluar cambios dimensionales, se monitorearon variaciones de masa y resistencia a compresión como indicadores de deterioro.

Para el ensayo con sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), los especímenes se mantuvieron en inmersión continua completando un total de 10 ciclos de exposición. De manera paralela, para el ensayo con sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), los adoquines estuvieron en solución, completando 7 ciclos de exposición. Durante cada ciclo, se registraron variaciones de peso y observaciones visuales de los especímenes, además de la resistencia mecánica al final del período.

Este procedimiento permitió observar cómo cada tipo de sulfato afecta de manera distinta al concreto: el sulfato de aluminio ocasionó principalmente cambios en la superficie y una ligera expansión, sin que se presenten pérdidas importantes de masa; en cambio, el sulfato de magnesio provocó pequeños desprendimientos y una disminución más evidente en la resistencia, lo que confirma que actúa de forma más agresiva sobre los compuestos del cemento.

Este enfoque experimental simula parcialmente las condiciones ambientales de Lima, caracterizadas por alta humedad relativa y la frecuente presencia de niebla costera, factores que pueden influir en la penetración de agua y la durabilidad del concreto. En cuanto a la ausencia de un ensayo de ataque por cloruros, se justifica por la naturaleza del ambiente costero de Lima, donde la niebla salina y la alta humedad relativa predominan, factores que favorecen el ataque por sulfatos sobre el ataque por cloruros en el concreto. Estudios han demostrado que la exposición a sulfatos puede ser más perjudicial para la durabilidad del concreto en ambientes costeros debido a la formación de productos expansivos que deterioran la estructura del material. (Zhang et al., 2024).

**Figura 4.12**

*Ensayo acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados*



a) Adoquines sometidos al ataque químico con sulfato de aluminio



b) Adoquines sometidos al ataque químico con sulfato de magnesio

### **Cálculo**

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \left( \frac{M_f - M_i}{M_f} \right) \times 100$$

Donde:

$M_f$  peso final (g)

$M_i$  peso inicial (g)

### **4.5 Evaluación ambiental preliminar de los adoquines**

En coherencia con los beneficios ambientales descritos en el marco teórico (Sección 3.5), se realizó una evaluación preliminar de sostenibilidad ambiental de los adoquines de concreto elaborados con RCD y humo de sílice, comparados con una mezcla convencional. Este enfoque permite identificar y cuantificar parcialmente los efectos positivos del aprovechamiento de RCD, la reducción en la extracción de áridos naturales y la disminución de residuos destinados a vertederos, sin requerir un análisis de ciclo de vida completo debido a la falta de datos de inventario necesarios para un ACV exhaustivo (Guinée et al., 2021).

Adicionalmente, es importante señalar que los agregados reciclados provenientes de RCD también presentan impactos ambientales asociados a su procesamiento, principalmente vinculados al consumo energético durante las etapas de trituración, clasificación y transporte. No obstante, diversos estudios coinciden en que dichos impactos son considerablemente menores en comparación con los generados por la producción de agregados naturales, debido a la ausencia de actividades de extracción en canteras y a la reducción de procesos de trituración primaria (Scrivener et al., 2020; Guinée et al., 2021).

En este sentido, la reutilización de RCD contribuye no solo a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, sino también a la reducción del consumo de recursos naturales y del volumen de residuos destinados a vertederos, aspectos que refuerzan su aporte positivo desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental. Por ello, en la presente evaluación preliminar se prioriza la cuantificación del impacto evitado por la sustitución de agregados naturales, reconociendo que los impactos asociados al uso de RCD son relativamente bajos y no alteran la tendencia general de mejora ambiental observada.

Según la norma ISO 14040:2006, un ACV completo considera múltiples categorías de impacto ambiental, incluyendo cambio climático, agotamiento de recursos, acidificación, eutrofización, formación de ozono, agotamiento de la capa de ozono y consumo de energía primaria. En la presente investigación, se priorizó la categoría de cambio climático, expresada en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, por ser la más relevante para la comparación entre materiales y la que puede estimarse con datos disponibles (Scrivener et al., 2020).

Los principales indicadores empleados fueron:

- Reducción en la extracción de áridos naturales (arena y piedra chancada) al reemplazar parcialmente con RCD.
- Disminución de residuos enviados a botaderos por tonelada de RCD reutilizada.
- Ahorro estimado de emisiones de CO<sub>2</sub> vinculadas a la producción de agregados naturales.

Para la estimación del beneficio ambiental se adaptaron factores reportados por Scrivener et al. (2020) y el Ministerio del Ambiente – MINAM (2023), quienes indican que la producción de 1 tonelada de agregado natural genera en promedio 0.3 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Con base en la dosificación patrón (Tabla 4.2), se calculó el impacto asociado a la extracción de áridos naturales en un m<sup>3</sup> de mezcla mediante la siguiente expresión:

$$\text{Emisiones de CO}_2 \left( \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right) = (\text{masa de agregados naturales} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \div 1000) \times 0.3$$

Así, considerando un total de 1,802.6 kg/m<sup>3</sup> de áridos naturales (759.0 kg de arena y 1,043.6 kg de piedra chancada), el impacto corresponde a 0.54 t CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>3</sup> de mezcla convencional. La sustitución parcial de estos áridos por RCD permitió estimar reducciones progresivas en las emisiones, las cuales se presentan en el capítulo de Resultados.

Este procedimiento proporciona información preliminar sobre la sostenibilidad de los adoquines, respaldando la eficiencia en el uso de materiales, la valorización de residuos y la reducción de impactos ambientales, y sirve como referencia para futuras evaluaciones más completas de ciclo de vida.

# CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1 Resultados

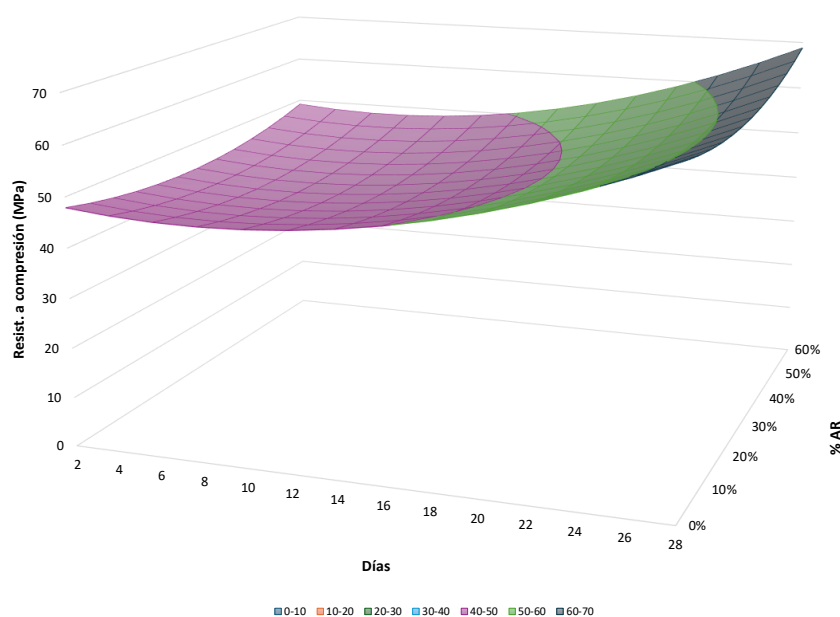
### 5.1.1 Ensayo de la resistencia a la compresión

Tal como se describió en el procedimiento experimental, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión sobre los adoquines correspondientes a la mezcla patrón y a las tres combinaciones con incorporación de RCD. Para cada edad de curado establecida (7, 14, 21 y 28 días), se ensayaron tres unidades por mezcla, utilizando el promedio como valor representativo. Adicionalmente, se calculó la desviación estándar, con el fin de reflejar la variabilidad natural de los resultados y otorgar mayor confiabilidad al análisis.

En la Figura 5.1 se presenta la evolución de la resistencia a compresión mediante una representación tridimensional, en la que se relacionan simultáneamente la edad de curado, el porcentaje de reemplazo de RCD y la resistencia alcanzada. Esta representación permite visualizar de manera integral la tendencia de incremento de la resistencia a medida que avanza el curado y se incrementa el contenido de RCD.

**Figura 5.1**

*Resistencia a compresión*



Nota. Representación tridimensional de la tendencia general de la resistencia a la compresión en función de la edad de curado y el porcentaje de RCD, elaborada a partir de los valores promedio experimentales

Los resultados del ensayo de compresión indican que el adoquín patrón alcanzó una resistencia promedio de 42.97 MPa a los 7 días, superando tempranamente el valor mínimo de 38 MPa exigido por la NTP 399.611:2017 para adoquines tipo II. Este comportamiento refleja un adecuado desarrollo inicial de la matriz a base de cemento, asociado a la relación a/c empleada, a la incorporación del 10% de humo de sílice y al control del proceso de compactación durante el moldeo.

A los 28 días de curado, la mezcla patrón alcanzó una resistencia promedio de 63.34 MPa, lo que representa un incremento del 66.7% respecto al valor normativo mínimo, evidenciando un adecuado proceso de hidratación y ganancia progresiva de resistencia.

En el caso de las mezclas con sustitución parcial de RCD, los resultados experimentales muestran una tendencia creciente de la resistencia a la compresión tanto con el aumento del porcentaje de reemplazo como con la edad de curado. A los 28 días, las resistencias promedio alcanzadas fueron de 61.66 MPa, 64.97 MPa y 72.72 MPa para los contenidos de 25%, 45% y 60% de RCD, respectivamente. Estos valores representan incrementos del 62.3%, 71% y 91.4% respecto al valor mínimo establecido por la normativa.

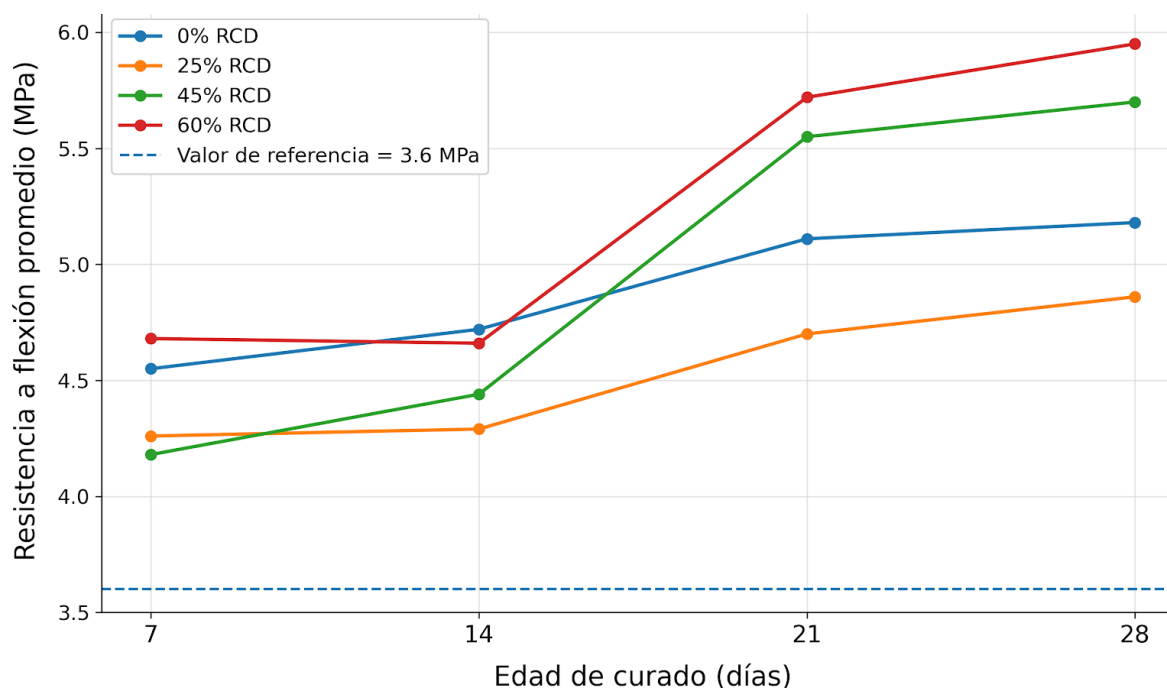
El mejor desempeño observado en las mezclas con mayores contenidos de RCD puede atribuirse a la mayor rugosidad superficial de los agregados reciclados y a su capacidad de absorción, lo que favorece la adherencia en la zona de transición interfacial y contribuye a una transferencia de esfuerzos más eficiente.

### **5.1.2 Ensayo de la resistencia a la flexión**

Como se indicó en la metodología experimental, se realizaron los ensayos de resistencia a la flexión tanto para el adoquín patrón como para los diseños con 25%, 45% y 60% de agregado reciclado (RCD). Para cada combinación se ensayaron tres muestras por edad, con el fin de obtener un promedio representativo y asegurar el cumplimiento de la resistencia establecida por la norma. Los resultados obtenidos han sido consolidados y representados gráficamente a continuación, permitiendo visualizar el comportamiento estructural de cada dosificación en función del tiempo de curado.

**Figura 5.2**

*Resistencia a flexión*



En la figura 5.2 se presenta la resistencia a flexión promedio de los adoquines elaborados con los distintos porcentajes de RCD, evaluados a las edades de curado establecidas. Asimismo, se incluye una línea horizontal discontinua que representa el valor de referencia de 3.6 MPa, incorporado con fines comparativos para evaluar el desempeño mecánico inicial de los adoquines ensayados.

Los resultados muestran que todas las mezclas superan el valor mínimo establecido por la norma desde los 7 días de curado, lo que evidencia un adecuado comportamiento mecánico inicial, incluso en los adoquines con mayores porcentajes de RCD. A medida que aumenta la edad de curado, la resistencia a flexión presenta una tendencia creciente en todos los casos, atribuida al progreso de la hidratación del cemento y a la mejora de la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados reciclados.

A los 21 y 28 días, los adoquines con 45% y 60% de RCD alcanzan los mayores valores de resistencia a flexión, superando al adoquín patrón, lo que confirma que la incorporación de RCD, en los porcentajes evaluados, no solo cumple con los requisitos normativos establecidos por la NTP 399.611, sino que también contribuye favorablemente al desempeño mecánico del adoquín.

### 5.1.3 Ensayo de ciclos de humedad-secado

El ensayo de durabilidad mediante ciclos de humedad-secado de los adoquines permitió evaluar su resistencia al desgaste superficial y su comportamiento estructural posterior. Para cada porcentaje de reemplazo se ensayaron tres especímenes, los cuales fueron sometidos a ocho ciclos sucesivos de humedad y secado. Cada ciclo consistió en 24 horas de exposición al ambiente (fase de secado) seguidas de 24 horas de inmersión en agua (fase de humedecimiento), completando un total de 16 días de ensayo.

**Tabla 5.1**

*Datos de ensayo de ciclos de humedad-secado*

RCD	Promedio Pérdida de masa (%)	Promedio Ensayo de compresión (MPa)
0%	1.21	56.34
25%	1.24	56.89
45%	1.26	59.30
60%	1.22	61.17

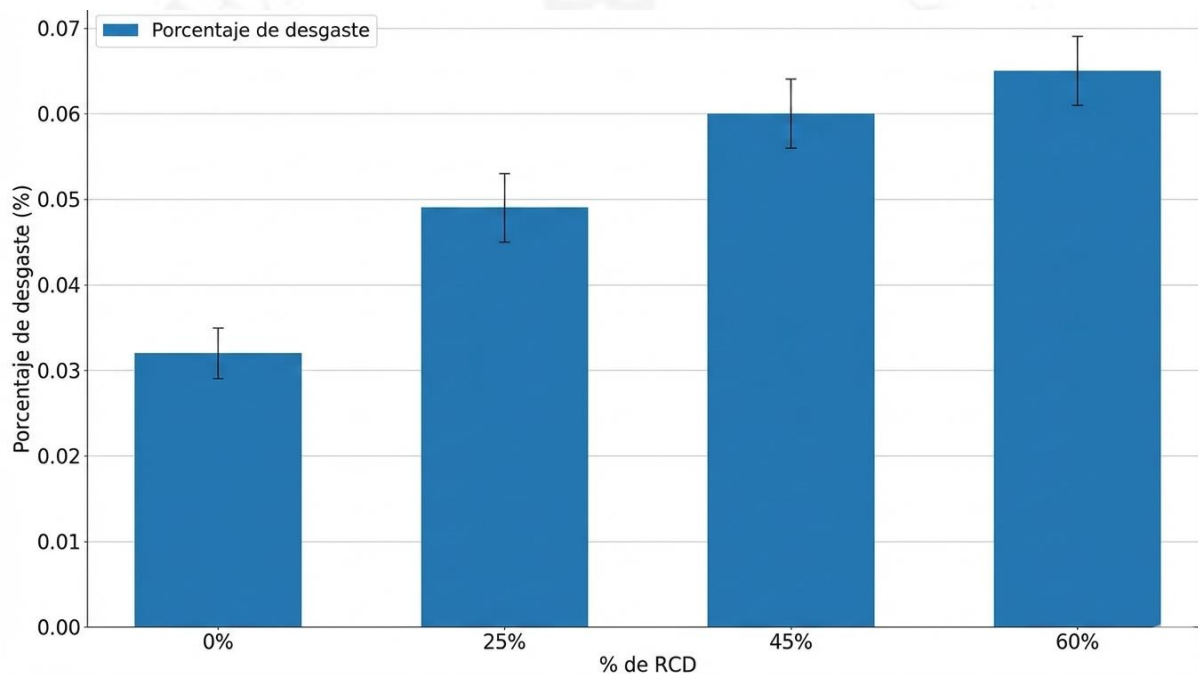
Estos valores de pérdida de masa están muy por debajo del umbral del 3%, generalmente aceptado como límite superior de pérdida admisible para elementos de concreto expuestos a intemperie (Martínez-Lage et al., 2016; ASTM C67 adaptada). Además, las diferencias entre mezclas fueron mínimas (variaciones menores al 0.1%), lo cual indica que el aumento progresivo del porcentaje de RCD no incrementó significativamente la degradación superficial del adoquín. Por tanto, desde el punto de vista de pérdida de masa, todos los diseños mostraron un comportamiento durable y comparable entre sí. Posteriormente, se realizó el ensayo de resistencia a compresión sobre las mismas muestras; los resultados indican que no solo se preservó la resistencia mecánica tras los 8 ciclos, sino que incluso se observó una tendencia creciente con el incremento del porcentaje de RCD. La mezcla con 60% de reemplazo presentó la mayor resistencia a compresión, superando en más de 4 MPa al adoquín patrón (0%), lo que sugiere que una adecuada selección y dosificación del RCD puede tener efectos positivos en la compactación y microestructura del concreto endurecido.

### 5.1.4 Ensayo de abrasión manual

El ensayo de abrasión se realizó tanto para el adoquín patrón como para las tres combinaciones con contenido de RCD, evaluando el promedio de tres muestras por cada porcentaje de reemplazo. El procedimiento se llevó a cabo conforme a lo establecido en la NTP 399.613:2018 – Adoquines de concreto. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la abrasión (método manual). Dado que dicha norma no establece un límite específico de porcentaje de desgaste para adoquines de uso peatonal, se decidió efectuar el ensayo a los 28 días de curado con el fin de comparar el comportamiento relativo entre las mezclas.

**Figura 5.3**

*Resistencia a la abrasión manual a 28 días*



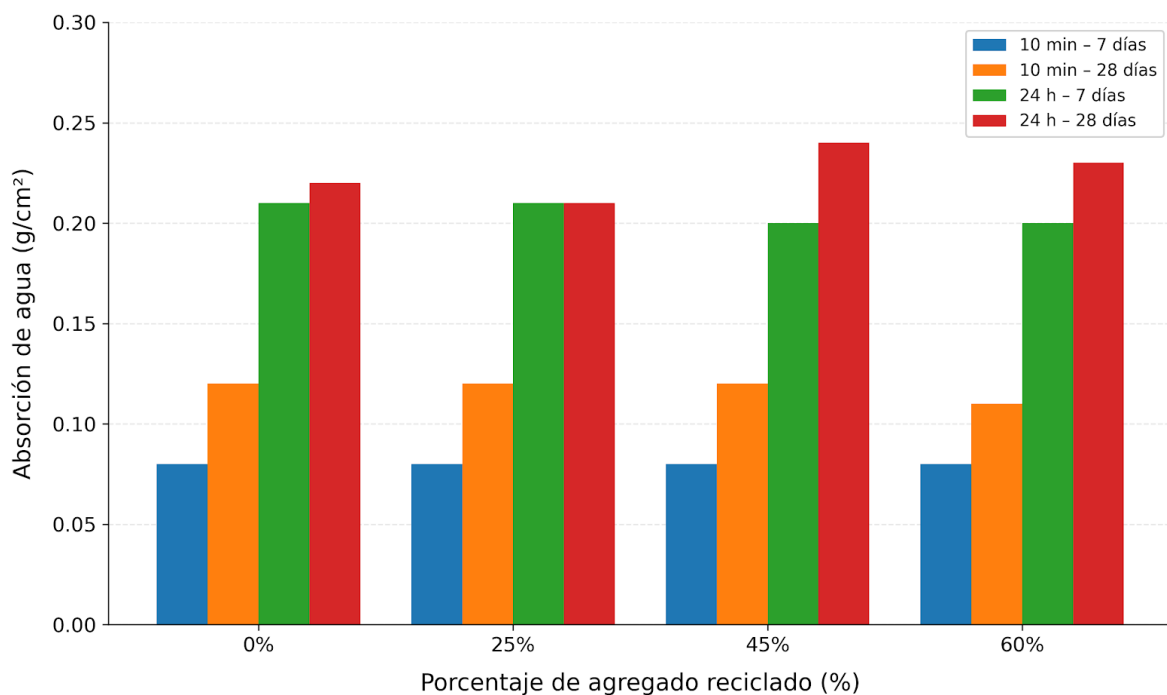
La figura 5.3, presenta el porcentaje de desgaste promedio obtenido en el ensayo de abrasión manual para los adoquines con diferentes porcentajes de RCD. Como se observa, los valores se mantuvieron muy bajos y estables en todos los casos, con un rango entre 0.05% y 0.06%, y una desviación estándar de  $\pm 0.0058\%$ , lo que evidencia una excelente uniformidad en la superficie de los especímenes. Estos resultados confirman que la incorporación de agregados reciclados no afectó la resistencia superficial de los adoquines.

### 5.1.5 Ensayo de absorción de agua por capilaridad

En esta etapa de la investigación se evaluó la absorción de agua por capilaridad de los adoquines. Con este propósito, se realizaron mediciones en especímenes a los 7, 14, 21 y 28 días de curado, registrando la masa absorbida en intervalos de 10, 30, 60, 120 minutos y 24 horas, conforme a la metodología descrita en la NTP 334.182:2016 (basada en la norma ASTM C1585). A continuación, se presentan las curvas de absorción acumulada ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) en función del tiempo, las cuales permiten analizar el comportamiento hídrico de cada mezcla. Las gráficas evidencian que todos los adoquines presentan un patrón de absorción típico: una fase inicial de rápida capilaridad seguida de una estabilización progresiva hasta las 24 horas.

**Figura 5.4**

*Absorción de agua por capilaridad*



La figura 5.4 muestra que los adoquines presentan un comportamiento típico de absorción de agua por capilaridad, caracterizado por una fase inicial de ingreso rápido de agua durante los primeros 10 minutos, seguida de una etapa de absorción más lenta a las 24 horas. A los 10 minutos, los valores de absorción se mantienen similares entre las diferentes mezclas, con rangos aproximados de  $0.08 \text{ g}/\text{cm}^2$  lo que indica un comportamiento homogéneo en la adsorción inicial.

En cambio, a las 24 horas se observa un ligero incremento en los valores de absorción en las mezclas con mayor contenido de RCD, particularmente en la mezcla con 60%, lo que sugiere una mayor porosidad capilar en comparación con la mezcla control. No obstante, los valores obtenidos se mantienen dentro de rangos reducidos, evidenciando un desempeño adecuado frente al ingreso de agua por capilaridad.

### 5.1.6 Ensayo de absorción total de agua por inmersión

Los resultados obtenidos en el ensayo de absorción total de agua por inmersión mostraron un comportamiento coherente respecto al efecto del porcentaje de reemplazo de agregado natural por residuos de construcción y demolición (RCD) y el avance del curado. Se observó una ligera variación creciente entre los 7 y 14 días, atribuida al desarrollo inicial de la red capilar en la microestructura del concreto; sin embargo, a partir de los 21 días los valores comenzaron a disminuir progresivamente, lo que indica una consolidación estructural del concreto. En general, la absorción aumentó con mayores porcentajes de RCD, alcanzando un máximo de 6.74% a los 14 días en la mezcla con 45% de reemplazo, mientras que la absorción mínima se registró en la mezcla con 60% de RCD a los 7 días (3.22%). A los 28 días, todas las combinaciones se estabilizaron en un rango entre 4.62% y 5.03%, demostrando un adecuado cierre de poros y una reducción en la capacidad de absorción. Cabe destacar que todas las muestras cumplieron con el límite establecido por la NTP 399.602:2020 para adoquines tipo II, que establece un máximo del 8% de absorción. Este resultado evidencia que las mezclas con incorporación de RCD en los porcentajes evaluados mantienen un comportamiento aceptable frente a la absorción de agua, lo que sugiere su potencial aplicación técnica en elementos de pavimentación de uso peatonal.

**Tabla 5.2**

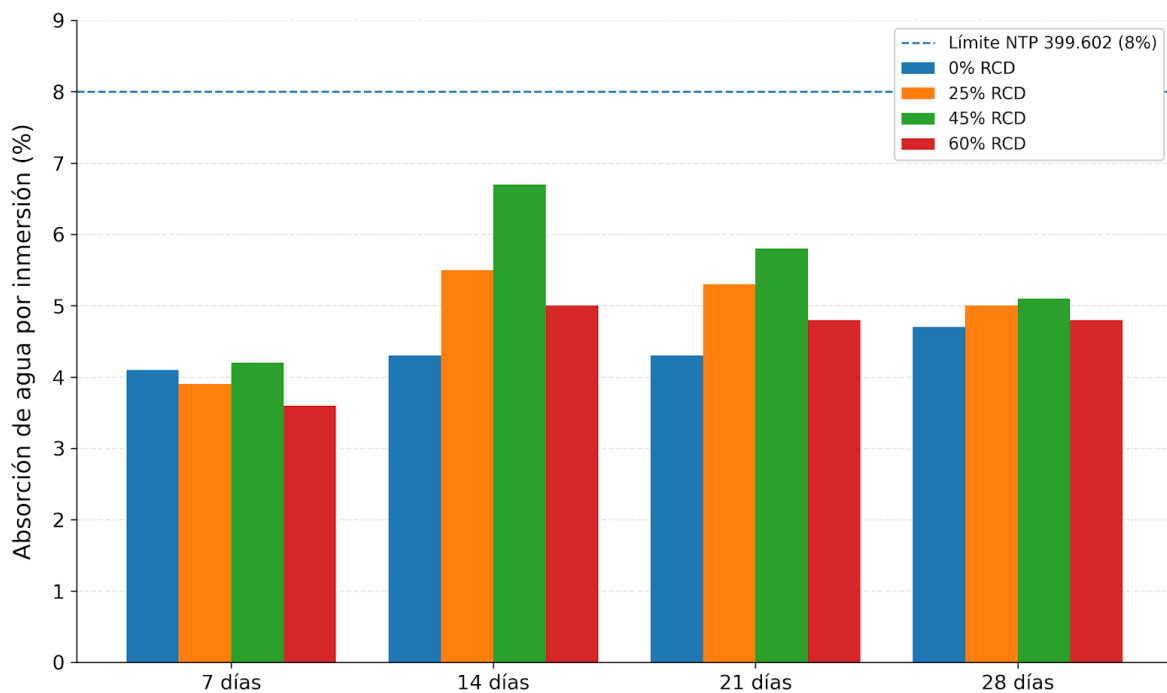
*Datos de ensayo de absorción total de agua por inmersión*

Días	Absorción 0% RCD	Absorción 25% RCD	Absorción 45% RCD	Absorción 60% RCD
7 días	4.06	3.94	3.69	3.22
14 días	6.25	6.21	6.74	5.01
21 días	5.31	5.55	6.04	5.99
28 días	4.63	5.03	4.62	4.74

A partir de los valores presentados en la Tabla 5.2, se elaboró la Figura 5.5 con el fin de visualizar de manera comparativa el comportamiento de la absorción total de agua por inmersión en función del tiempo de curado y del porcentaje de reemplazo de agregado natural por RCD. La representación gráfica permite identificar de forma clara las tendencias generales, así como los valores máximos y mínimos obtenidos para cada combinación evaluada, facilitando su comparación con el límite establecido por la normativa vigente.

**Figura 5.5**

*Ensayo de absorción total de agua por inmersión*



Los resultados muestran que la absorción aumentó ligeramente entre los 7 y 14 días, alcanzando un máximo de 6.74% en la mezcla con 45% de RCD, para luego disminuir progresivamente hacia los 28 días, donde todas las combinaciones se estabilizaron entre 4.62% y 5.03%. En todos los casos, los valores se mantuvieron por debajo del límite del 8% establecido por la NTP 399.602:2020 para adoquines tipo II, indicando que el empleo de RCD en las proporciones evaluadas mantiene niveles de absorción dentro de los rangos admisibles, sin evidenciar afectación apreciable en el desempeño del material.

### 5.1.7 Ensayo acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados

El ensayo acelerado de durabilidad permitió evaluar el desempeño de los adoquines (%) frente a ambientes agresivos simulados mediante la exposición a soluciones de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) al 5%. Durante el procedimiento se realizaron ciclos de inmersión con recambio de solución, evaluando tanto la variación de peso como la resistencia a compresión al finalizar los ciclos.

Los resultados mostraron que la variación de masa se mantuvo en rangos bajos y estables, con fluctuaciones mínimas atribuibles a la interacción química superficial y a la absorción capilar inicial. En el caso de la solución de sulfato de aluminio, los adoquines presentaron un cambio de color blanquecino y desprendimiento leve en las esquinas, pero sin pérdidas significativas de peso ni deterioros estructurales visibles. Por otro lado, los adoquines sometidos a sulfato de magnesio conservaron su color original, aunque se evidenció un ligero debilitamiento superficial reflejado en la presencia de partículas desprendidas en el agua de inmersión.

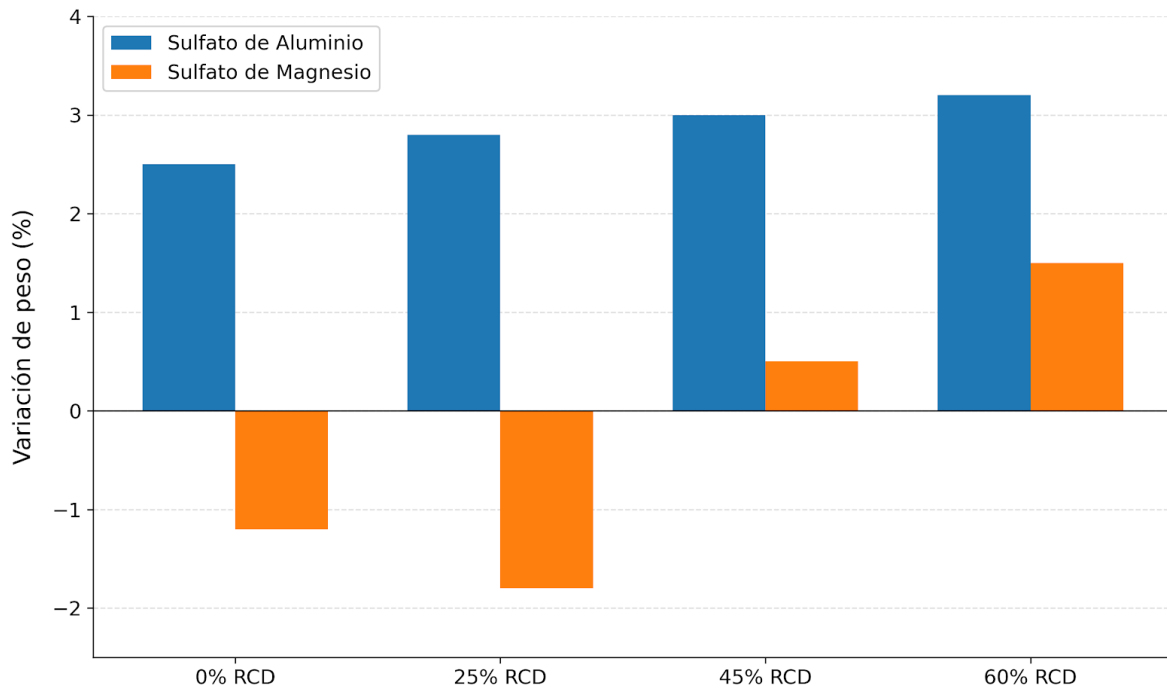
En cuanto a la resistencia a compresión, los adoquines mostraron una reducción moderada posterior a los ciclos de exposición; sin embargo, los valores finales permanecieron elevados, alcanzando en algunos casos más de 56 MPa, superando ampliamente los requisitos normativos mínimos establecidos para adoquines de tipo II. Esto demuestra que, pese a la agresividad de las soluciones, la integridad mecánica de los adoquines se mantuvo, evidenciando un adecuado comportamiento frente a ambientes con potencial ataque por sulfatos.

La relevancia de estos resultados radica en que los adoquines con reemplazo parcial de agregados naturales por RCD y la adición de humo de sílice no solo cumplen con las exigencias estructurales, sino que además presentan una alta durabilidad frente a agentes químicos.

Este comportamiento refuerza la viabilidad técnica de su uso en zonas expuestas a condiciones agresivas, como suelos sulfatados o entornos urbanos con presencia de contaminantes, al mismo tiempo que otorga un impacto ambiental positivo al promover la reutilización de residuos de construcción y demolición

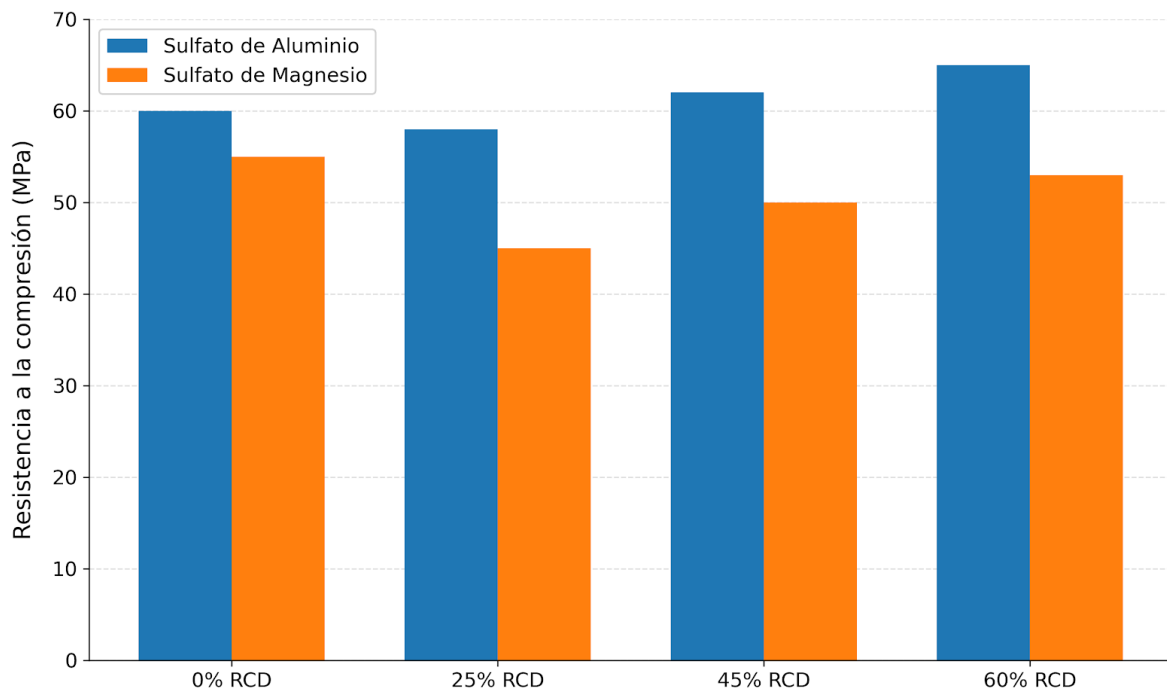
**Figura 5.6**

*Variación de peso vs 0%, 25%, 45% y 60% de RCD*



**Figura 5.7**

*Resistencia a la compresión vs 0%, 25%, 45% y 60% de RCD*



En la figura 5.6 se presenta la variación de peso de los adoquines expuestos a sulfato de aluminio y sulfato de magnesio. El primero ocasionó incrementos moderados asociados a procesos de expansión sin pérdida significativa de masa, mientras que el segundo produjo inicialmente reducciones de peso y posteriormente un incremento abrupto, evidenciando su carácter más agresivo. En la figura 5.7 se muestran los valores de resistencia a compresión tras la exposición. Se observa que, aunque el sulfato de aluminio mantuvo un desempeño estable con valores elevados incluso en altas proporciones de RCD, el sulfato de magnesio generó descensos más marcados, particularmente en el 25% de reemplazo. Sin embargo, en proporciones mayores (45%–60% de RCD), la incorporación de residuos y humo de sílice permitió recuperar parte de la resistencia perdida. Estos resultados confirman que el ataque por sulfato de magnesio es más severo que el de aluminio y que la adición combinada de RCD y humo de sílice mejora la durabilidad frente a ambientes agresivos.

#### **5.1.8 Evaluación de análisis preliminar ambiental**

La estimación preliminar de emisiones de CO<sub>2</sub> se realizó aplicando la ecuación definida en el apartado metodológico a la dosificación patrón (ver Tabla 4.2). Se consideraron los factores de emisión propuestos por Scrivener et al. (2020) y el Ministerio del Ambiente – MINAM (2023), expresados en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de material.

Adicionalmente, se incorporaron estimaciones de energía de producción y emisiones por transporte, a fin de contextualizar el impacto asociado a la sustitución de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (RCD). En este caso, el transporte del material reciclado se efectuó en vehículo particular desde la planta de Cajas Ecológicas (Villa El Salvador) hasta el laboratorio de la Universidad de Lima (Surco), con una distancia aproximada de 25 km.

La tabla 5.3 presenta la estimación de emisiones y energía asociada por metro cúbico de mezcla. Se observa una reducción progresiva de emisiones conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de árido natural por RCD. Las mezclas con 25%, 45% y 60% de sustitución mostraron disminuciones aproximadas de 14.4%, 25.9% y 34.7%, respectivamente, respecto a la mezcla patrón.

**Tabla 5.3***Estimación preliminar de emisiones y energía asociada por m<sup>3</sup> de mezcla*

Mezcla	Emisiones directas (t CO <sub>2</sub> eq./m <sup>3</sup> )	Energía de producción (MJ/m <sup>3</sup> )	Emisiones por transporte (t CO <sub>2</sub> eq./m <sup>3</sup> )*	Reducción total estimada (%)
0 % RCD	0.304	18.5	0.018	—
25 % RCD	0.260	16.8	0.017	14.4
45 % RCD	0.225	15.2	0.016	25.9
60 % RCD	0.198	13.7	0.015	34.7

Nota: Las emisiones y el consumo energético corresponden a una estimación preliminar por metro cúbico de mezcla, calculada a partir de la dosificación de mezclas (tabla 4.3). Las emisiones por transporte consideran distancias promedio referenciales.

Fuente: Elaboración propia con base en factores de emisión reportados por Scrivener et al. (2020), lineamientos del Ministerio del Ambiente – MINAM (2023) y bases de datos Ecoinvent v3.9.

Los resultados permiten inferir que, además de reducir las emisiones directas de CO<sub>2</sub>, la incorporación de RCD contribuye a disminuir el consumo energético, principalmente por la menor demanda de extracción y trituración. Según los valores referenciales de consumo energético y factores de emisión reportados por el MINAM (2023) y la base internacional Ecoinvent v3.9 (2023), los agregados reciclados presentan hasta un 30% menos de energía incorporada que los agregados naturales. Asimismo, el transporte de corta distancia—realizado dentro del área metropolitana de Lima— genera un aporte marginal a las emisiones totales, con una huella estimada de 0.015 a 0.018 t CO<sub>2</sub> eq./m<sup>3</sup>, por lo que el impacto ambiental principal está determinado por el tipo y origen de los agregados empleados.

### 5.1.9 Análisis de sensibilidad

Con el fin de verificar la robustez de la estimación, se realizó un análisis de sensibilidad considerando una variación de  $\pm 20\%$  en el factor de emisión de los agregados (rango 0.24 – 0.36 t CO<sub>2</sub>/t árido). Los resultados se muestran en la tabla 5.4, donde se aprecia que, incluso bajo escenarios conservadores, la tendencia de reducción de emisiones se mantiene para las mezclas con mayor contenido de RCD.

**Tabla 5.4***Rango de emisiones considerando incertidumbre del factor*

Mezcla	Emisiones mín. (t CO <sub>2</sub> -eq./m <sup>3</sup> )	Emisiones máx. (t CO <sub>2</sub> -eq./m <sup>3</sup> )
0 % RCD	0.243	0.365
60 % RCD	0.158	0.238

Los resultados del análisis de sensibilidad confirman que la sustitución de agregados naturales por RCD mantiene un beneficio ambiental potencial frente a las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de concreto. Este beneficio es más evidente a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, sin comprometer los parámetros mecánicos observados en los ensayos de compresión y flexión. No obstante, se precisa que este análisis es de carácter preliminar, ya que no contempla etapas como la producción de cemento, aditivos, ni fin de vida del producto. Para un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completo se recomienda incorporar dichas etapas conforme a la ISO 14040, abarcando otras categorías de impacto ambiental.

#### **5.1.10 Validación estadística del diseño experimental**

Con el fin de comprobar la significancia de los resultados obtenidos y validar el diseño experimental empleado, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor, considerando como variable independiente el porcentaje de reemplazo de agregado natural por RCD. Las variables dependientes correspondieron a las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad evaluadas: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, pérdida de masa por ciclos de humedad–secado, absorción capilar, absorción total y variación de peso frente al ataque de sulfatos con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y MgSO<sub>4</sub>.

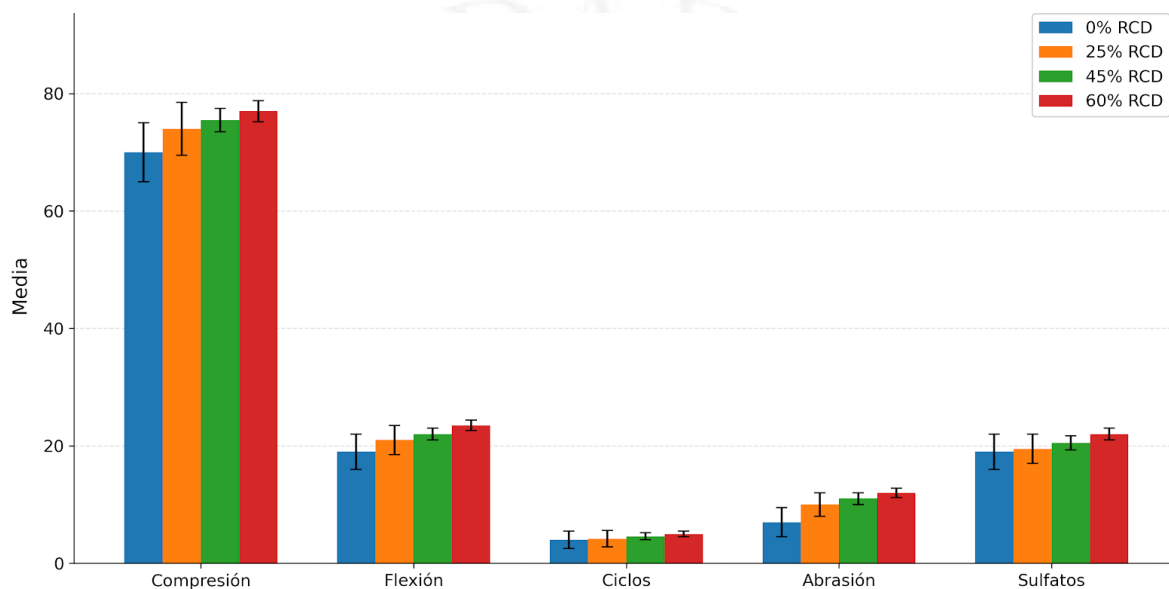
El ANOVA resulta apropiado para este estudio porque permite determinar si las diferencias observadas entre los promedios de los cuatro grupos son atribuibles al efecto del RCD o al azar, siguiendo la metodología propuesta por Montgomery (2020), Dean et al. (2020) y RILEM (2021). Las hipótesis planteadas fueron:

- H<sub>0</sub>: No existen diferencias significativas entre los grupos según el porcentaje de RCD.
- H<sub>1</sub>: Al menos un grupo difiere significativamente respecto a los demás

Se adoptó un nivel de significancia de 0.05, criterio recomendado para experimentos con materiales de construcción (RILEM, 2021). Los resultados obtenidos se consolidan en las Tablas F12–F22 (Anexo F), donde se aprecia que los valores de  $p$  en todas las variables fueron inferiores a 0.05. Esto confirma que el porcentaje de RCD genera diferencias estadísticamente significativas en cada una de las propiedades evaluadas.

**Figura 5.8**

*Resumen del ANOVA para las propiedades físico–mecánicas y de durabilidad*



Nota. Basado en la representación de los valores promedio obtenidos para cada porcentaje de RCD, mientras que las barras de error indican la desviación estándar asociada. Se observa una tendencia a la reducción de la dispersión en las mezclas con 45% y 60% de RCD, lo cual es consistente con los resultados del análisis de varianza (ANOVA), con  $p < 0.05$ .

La representación gráfica anterior permite visualizar de manera integrada el comportamiento promedio de las mezclas evaluadas y la variabilidad asociada a cada propiedad, de acuerdo con los resultados del análisis de varianza (ANOVA). En función de ello, se presenta a continuación una síntesis de los principales hallazgos estadísticos obtenidos para cada ensayo.

El análisis de varianza evidenció que el porcentaje de reemplazo de agregados naturales por RCD ejerce una influencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) sobre todas las propiedades evaluadas. En el caso de la resistencia a la compresión (Tabla F12) y la resistencia a la flexión (Tabla F13), se observaron diferencias significativas entre las mezclas, destacando los mayores valores promedio en los adoquines con 60 % de RCD.

Para el ensayo de ciclos de humedad–secado (Tablas F14 y F15), el ANOVA indicó diferencias significativas tanto en la pérdida de masa como en la resistencia posterior a los ciclos, lo que evidencia un comportamiento diferenciado de la durabilidad según el porcentaje de RCD incorporado. Resultados similares se obtuvieron en el ensayo de abrasión manual (Tabla F16), donde el contenido de RCD influyó significativamente en el desgaste superficial. Asimismo, los ensayos de absorción capilar y absorción total de agua (Tablas F17 y F18) mostraron variaciones estadísticamente significativas entre mezclas, asociadas al porcentaje de agregado reciclado. Finalmente, en el ensayo de ataque acelerado con sulfatos de aluminio y magnesio (Tablas F19 a F22), el análisis estadístico confirmó la influencia significativa del RCD en la variación de peso y la resistencia mecánica de los adoquines expuestos a medios agresivos.

En conjunto, los resultados del ANOVA confirman que el porcentaje de reemplazo con RCD constituye un factor determinante en el comportamiento mecánico y de durabilidad de los adoquines evaluados, lo cual sustenta estadísticamente los resultados experimentales presentados en este capítulo.

## **5.2 Discusión**

Las pruebas estadísticas aplicadas (Shapiro–Wilk, Levene y Tukey) confirmaron la validez de los resultados experimentales, evidenciando diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas con mayores porcentajes de RCD y las convencionales, lo que respalda la consistencia del diseño experimental y la fiabilidad de las conclusiones obtenidas.

A partir de esta validación, se procede a la interpretación de los resultados experimentales obtenidos, considerando su relación con el comportamiento técnico y ambiental de las mezclas analizadas.

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) como reemplazo parcial de los agregados naturales en la fabricación de adoquines de concreto permite alcanzar un desempeño técnico y ambiental favorable. Las mezclas con sustituciones del 25%, 45% y 60% cumplieron con los límites establecidos por la NTP 399.611:2017 para adoquines tipo II, superando ampliamente los valores mínimos de resistencia y mostrando un comportamiento homogéneo a lo largo del proceso de curado. Estos resultados confirman la viabilidad de emplear agregados reciclados en elementos prefabricados de concreto sin comprometer su funcionalidad estructural ni su durabilidad. El incremento de la resistencia a compresión observado a medida que aumenta el contenido de RCD puede atribuirse al efecto combinado de la adecuada relación agua/cemento, la inclusión del 10% de humo de sílice como adición mineral y la morfología angular de los agregados reciclados, que favorece la adherencia con la pasta cementante. Este comportamiento difiere parcialmente de lo reportado por Bravo et al. (2021) y Silva et al. (2019), quienes identificaron ligeras reducciones de resistencia en reemplazos superiores al 40%. La diferencia podría explicarse por la naturaleza del RCD empleado en esta investigación, constituido mayoritariamente por concreto estructural limpio, libre de materiales cerámicos o contaminantes, y por la estricta clasificación granulométrica aplicada antes del mezclado. Estas condiciones reducen la heterogeneidad del agregado reciclado y promueven una compactación más eficiente durante el moldeo, generando una matriz más densa y continua. En consecuencia, el rango de reemplazo óptimo se ubica entre 45% y 60%, donde se alcanza el mejor equilibrio entre resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

En cuanto a los ensayos de durabilidad, los resultados del ciclo humedad-secado y de abrasión manual demostraron una excelente estabilidad de los adoquines ante condiciones de exposición cíclica y desgaste superficial. Las muestras sometidas a ocho ciclos alternos no evidenciaron fisuras ni pérdida de masa significativa, lo que sugiere una estructura interna compacta y una interfaz pasta-agregado consolidada. Este comportamiento se relaciona con la acción puzolánica del humo de sílice, que refina la microestructura del concreto al reducir la cantidad de poros capilares.

En el caso del ensayo de abrasión, los valores de desgaste se mantuvieron entre 0.05% y 0.06%, con desviaciones estándar mínimas, resultados que superan los reportes de Gómez y Rodríguez (2022), quienes registraron valores de hasta 0.10% en concretos reciclados similares. Estas diferencias podrían explicarse por el control de humedad y curado implementado en esta investigación, que favoreció una hidratación más completa y una menor micro fisuración superficial.

Los ensayos de absorción por capilaridad y por inmersión mostraron que las mezclas con RCD mantuvieron un comportamiento estable y predecible a lo largo del curado. A los 28 días, todas las combinaciones registraron valores de absorción entre 4.62% y 5.03%, por debajo del límite del 8% establecido por la NTP 399.602:2020. La mezcla con 60% de RCD incluso presentó una absorción inicial más baja, atribuible a la reducción progresiva de la porosidad conectada y al efecto de sellado de la matriz del concreto. Estos resultados, en conjunto, demuestran una excelente impermeabilidad y resistencia al ingreso de agua, lo que se traduce en una mayor durabilidad frente a ambientes húmedos o ligeramente agresivos. Al compararse con estudios realizados en regiones tropicales o áridas, como los de Corinaldesi (2015) y Martínez et al. (2020), los valores obtenidos en Lima son menores, lo que se explica por las condiciones climáticas locales. El clima templado húmedo de Lima, con temperaturas moderadas (18–24°C) y alta humedad relativa (70–80%), favorece una hidratación más prolongada y homogénea del cemento, reduciendo la velocidad de secado y evitando la aparición de micro fisuras por retracción.

Al contrastar los resultados con estándares internacionales como la UNE-EN 1338:2021 y la ASTM C936/C936M-20, se verifica que los adoquines elaborados con RCD cumplen ampliamente con los requisitos de resistencia, absorción y desgaste superficial. Esto refuerza la consistencia del desempeño observado y demuestra que las condiciones de fabricación empleadas se alinean con los criterios de calidad exigidos para elementos de pavimentación de uso peatonal o de tráfico ligero. Además, la buena respuesta frente a los ciclos de humedad-secado indica una potencial resistencia frente a ambientes costeros o con presencia de sales, aunque se recomienda verificar su comportamiento frente a exposiciones prolongadas en condiciones más severas.

Desde una perspectiva ambiental, la evaluación preliminar de emisiones de CO<sub>2</sub> y energía asociada muestra que el uso de RCD representa una alternativa sostenible frente al empleo de agregados naturales. Según los factores de Scrivener et al. (2020), el MINAM (2023) y la base internacional *Ecoinvent v3.9* (2023), las emisiones totales disminuyeron entre 14.4% y 34.7% para los reemplazos del 25% al 60%. Además, el transporte del material reciclado desde la planta de Cajas Ecológicas (Villa El Salvador) hasta la Universidad de Lima (Surco) (una distancia aproximada de 25 km) generó un aporte marginal, estimado entre 0.015 y 0.018 t CO<sub>2</sub> eq./m<sup>3</sup>. Esto confirma que el mayor impacto ambiental se asocia a la producción y extracción de los agregados, más que a su transporte urbano. Por tanto, la incorporación de RCD no solo conserva las propiedades mecánicas del concreto, sino que también reduce su huella de carbono, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 12) al promover la economía circular y la gestión responsable de residuos en la construcción.

La comparación entre los ensayos acelerados de laboratorio y los procesos naturales de envejecimiento sugiere que los resultados deben interpretarse con cautela. Los ciclos de humedad secado o la abrasión manual reproducen condiciones de desgaste en periodos cortos, pero no reemplazan la exposición prolongada a la intemperie, radiación solar o agentes químicos específicos. Sin embargo, las tendencias observadas en esta investigación permiten anticipar un comportamiento durable bajo las condiciones ambientales de Lima, caracterizadas por baja amplitud térmica y escasa exposición a ciclos de congelamiento y deshielo. En regiones de clima continental o con mayor agresividad ambiental, sería necesario complementar el estudio con ensayos de ataque por sulfatos, carbonatación o ciclos de congelamiento y deshielo.

En conclusión, los resultados alcanzados responden satisfactoriamente a los objetivos planteados en la investigación, demostrando que el reemplazo parcial de agregados naturales por RCD incide positivamente en las propiedades mecánicas, la durabilidad y el desempeño ambiental de los adoquines de concreto. El rango de reemplazo óptimo, entre 45% y 60%, ofrece un equilibrio entre resistencia, absorción y sostenibilidad, consolidando una alternativa técnica viable para la industria peruana de prefabricados. Además, el uso de RCD en el contexto urbano de Lima podría contribuir a reducir los volúmenes de residuos de construcción, optimizar el uso de recursos naturales y mitigar las emisiones asociadas al ciclo de vida de los materiales.

## CONCLUSIONES

- La investigación permitió demostrar que la sustitución parcial de agregados naturales por residuos de construcción y demolición (RCD) en proporciones de 25%, 45% y 60% mantiene e incluso mejora las propiedades mecánicas de los adoquines de concreto. Todas las mezclas evaluadas superaron los valores mínimos establecidos por la NTP 399.611:2017 para adoquines tipo II, tanto en resistencia a compresión como en resistencia a flexión, evidenciando un adecuado comportamiento mecánico desde edades tempranas de curado. En particular, la mezcla con 60% de RCD alcanzó la mayor resistencia a compresión a los 28 días (72.72 MPa), mientras que las mezclas con 45% y 60% de RCD presentaron los mayores valores de resistencia a flexión a los 21 y 28 días, superando al adoquín patrón. Este comportamiento se atribuye a la adecuada relación agua/cemento, a la morfología angular del RCD y a la incorporación del 10% de humo de sílice, cuya acción puzolánica favorece la densificación de la matriz de concreto y la mejora de la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados.
- El análisis comparativo de las mezclas permitió identificar un rango óptimo de reemplazo entre 45% y 60%, en el cual se logra un equilibrio entre resistencia, homogeneidad estructural y trabajabilidad de la mezcla. En este intervalo, la matriz del concreto presenta una microestructura más compacta y una zona de transición interfacial reducida, lo que se traduce en un desempeño mecánico superior al de concretos elaborados exclusivamente con agregados naturales.
- Los ensayos de durabilidad confirmaron que los adoquines con RCD mantienen su integridad física y estructural frente a condiciones de exposición cíclica. Tras ocho ciclos de humedad-secado, las pérdidas de masa fueron bajas (1.21–1.26 %) y la resistencia a compresión se conservó por encima de 56 MPa. En el ensayo de abrasión, los porcentajes de desgaste se mantuvieron entre 0.05% y 0.06%, con desviaciones estándar menores a  $\pm 0.006\%$ , evidenciando una superficie densa y resistente.

En la absorción por inmersión, los valores a los 28 días variaron entre 4.62% y 5.03%, cumpliendo ampliamente con el límite del 8% establecido por la NTP 399.602:2020.

- El análisis ANOVA confirma que el porcentaje de reemplazo con RCD sí ejerce un efecto estadísticamente significativo en todas las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad analizadas. Los resultados demuestran que las mezclas con 45% y 60% de RCD presentan un desempeño superior y más estable, lo cual coincide con los valores experimentales obtenidos. Por tanto, el diseño experimental es válido y los resultados permiten afirmar que la incorporación de RCD influye de manera comprobable en el comportamiento de los adoquines tipo II.
- Los resultados frente a la exposición a sulfatos fueron igualmente favorables, particularmente en las mezclas con 45% y 60% de RCD, donde la incorporación del humo de sílice redujo la penetración de compuestos agresivos y mejoró la estabilidad química del material. Las condiciones climáticas de Lima Metropolitana (caracterizadas por temperaturas moderadas (18–24°C) y alta humedad relativa (70–80%)) favorecieron una hidratación más completa del cemento, reduciendo la retracción y las micro fisuras. En comparación con regiones de clima árido o tropical, los adoquines estudiados presentan menor absorción y mayor cohesión interna, confirmando su idoneidad para entornos costeros templados.
- Al contrastar los resultados con normas internacionales, se verificó que los adoquines con RCD cumplen con los requisitos de la NTP 399.611:2017, la NTP 399.602:2020, la UNE-EN 1338:2021 y la ASTM C936/C936M-20, tanto en resistencia, absorción como en resistencia al desgaste. Este cumplimiento evidencia la compatibilidad técnica del material reciclado con los estándares internacionales, consolidando su potencial para aplicaciones en pavimentos peatonales y de tráfico ligero bajo criterios de calidad y sostenibilidad.
- El análisis ambiental preliminar reveló que el reemplazo progresivo de agregados naturales por RCD reduce significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo energético asociado. Según los factores del MINAM (2023), Scrivener et al. (2020) y la base Ecoinvent v3.9 (2023), las emisiones disminuyeron entre 14.4 % y 34.7 % para los reemplazos del 25 % al 60 %.

El transporte del material reciclado (triturado) desde la planta de Cajas Ecológicas (Villa El Salvador) hasta la Universidad de Lima (Surco) aportó de manera marginal al total (0.015–0.018 t CO<sub>2</sub> eq./m<sup>3</sup>), evidenciando que la mayor reducción proviene del menor requerimiento de extracción y trituración de áridos naturales.

- La utilización de RCD en la fabricación de adoquines se presenta como una alternativa técnica viable y ambientalmente responsable para la gestión de residuos de construcción en Lima Metropolitana. Su adopción permitiría reducir la presión sobre las canteras, disminuir la disposición en botaderos informales y promover una economía circular en el sector construcción. Los adoquines producidos con agregados reciclados y humo de sílice demuestran que es posible alcanzar alto desempeño mecánico y durabilidad con una menor huella ambiental, fortaleciendo así el enfoque sostenible de la ingeniería civil contemporánea.
- En conclusión, los resultados obtenidos permitieron alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación. Se logró cumplir con el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, desde la caracterización de los materiales hasta la evaluación del desempeño físico-mecánico, la durabilidad y la sostenibilidad ambiental de los adoquines elaborados con agregados reciclados (RCD) y humo de sílice. En conjunto, estos resultados confirman que el estudio cumplió con su propósito general de determinar el porcentaje óptimo de reemplazo de RCD que garantiza un desempeño técnico y ambientalmente viable en el contexto de Lima Metropolitana.

## RECOMENDACIONES

- Durante la ejecución de los ensayos se constató que el control de humedad y la preparación de los agregados reciclados influyen notablemente en la homogeneidad de las mezclas. Se recomienda, por tanto, realizar un proceso de secado y estabilización de la humedad del RCD antes del pesado, con el fin de evitar variaciones en la relación agua/cemento y obtener resultados más representativos.
- En los ensayos de caracterización del RCD fue evidente la necesidad de contar con una granulometría más controlada, especialmente en el rango fino, ya que pequeñas variaciones pueden alterar la trabajabilidad del concreto. Para futuros estudios se sugiere ampliar el número de tamices empleados y evaluar la influencia de la fracción menor a 0.15 mm, con el fin de precisar mejor el efecto del material pulverulento en la mezcla.
- La determinación de la absorción y humedad superficial del RCD debería realizarse con mayor frecuencia durante la producción, dado que este material presenta una alta variabilidad en función de su procedencia. Implementar un registro sistemático de estos valores permitirá mejorar el ajuste de la dosificación y garantizar mayor repetitividad entre lotes.
- En el desarrollo de los ensayos de resistencia a compresión y flexión, se recomienda aumentar el número de probetas por cada condición de reemplazo, a fin de reducir la dispersión estadística y obtener una desviación estándar más representativa. Esta mejora fortalecería la confiabilidad de los resultados y permitiría establecer rangos de variabilidad más precisos para su comparación con otras investigaciones.
- Respecto a los ensayos de durabilidad, sería conveniente incorporar un control de temperatura y humedad ambiental más riguroso durante los ciclos de humedad-secado, para reproducir con mayor fidelidad las condiciones reales de exposición de Lima Metropolitana. Esta práctica permitiría establecer una correlación más directa entre los resultados de laboratorio y el comportamiento esperado en campo.

- Se recomienda complementar los ensayos acelerados con evaluaciones de exposición natural a largo plazo, a fin de analizar el efecto acumulativo de la radiación solar, la contaminación urbana y la niebla salina sobre los adoquines reciclados. Esto proporcionará una visión más completa del desempeño del material en condiciones reales de servicio.
- Durante la ejecución del ensayo de abrasión manual, se observó que la uniformidad en la aplicación de la carga y el movimiento puede influir en la medición del desgaste. Se sugiere estandarizar el procedimiento mediante una guía mecánica o plantilla de desplazamiento, para reducir la influencia del operador y aumentar la precisión de los resultados.
- En cuanto al análisis ambiental, se recomienda que futuros trabajos amplíen el alcance hacia un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completo, considerando las etapas de transporte, producción de cemento y disposición final del producto. Esto permitiría cuantificar de manera integral la huella ambiental y energética de los adoquines reciclados, fortaleciendo los argumentos de sostenibilidad del estudio.
- En futuras investigaciones sería valioso explorar la inclusión de adiciones suplementarias como cenizas volantes o escoria granulada, en combinación con el RCD, para evaluar sinergias que optimicen aún más la resistencia y durabilidad. Asimismo, se sugiere analizar la influencia de diferentes proporciones de humo de sílice sobre la microestructura del concreto.
- Finalmente, se recomienda fomentar la colaboración entre universidades, municipios y plantas de reciclaje para estandarizar la calidad del RCD disponible en Lima Metropolitana. El desarrollo de protocolos técnicos locales garantizaría la trazabilidad y confiabilidad del material, promoviendo su uso responsable en la fabricación de prefabricados y contribuyendo a una gestión sostenible de los residuos de construcción.

## REFERENCIAS

- AENOR. (2004). UNE-EN 1338:2004. *Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*. Asociación Española de Normalización y Certificación. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0031017>
- American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C1202-12: *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1202-12>
- Ashwini, S., & Sheetal, M. (2021). Recycled aggregate paving blocks for pedestrian applications: A sustainable approach. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 12(3), 45–54.
- ASTM International. (2004). ASTM C1585-04: *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. ASTM International. <https://www.astm.org/c1585-04.html>
- ASTM International. (2022). *ASTM C936/C936M-22. Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units*. ASTM International. [https://www.astm.org/c0936\\_c0936m-22.html](https://www.astm.org/c0936_c0936m-22.html)
- ASTM International. (2020). ASTM C39/C39M-20: *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International. [https://www.astm.org/c39\\_c39m-20.html](https://www.astm.org/c39_c39m-20.html)
- Bai, Y., Zhang, Y., & Zhang, L. (2023). The hygric properties of cement mortar with salt spray deposition. *Journal of Building Engineering*, 73, 106573. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106573>

- Badalyan, M. M., Muradyan, N. G., Shainova, R. S., Arzumanyan, A. A., Kalantaryan, M. A., Sukiasyan, R. R., Yeranosyan, M., Laroze, D., Vardanyan, Y. V., & Barseghyan, M. G. (2024). Effect of silica fume concentration and water–cement ratio on the compressive strength of cement-based mortars. *Buildings*, *14*(3), 757. <https://doi.org/10.3390/buildings14030757>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2020). *Gestión de residuos de construcción y demolición en proyectos viales*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Gestion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion-en-proyectos-viales.pdf>
- Barrueta Tello, J. D. (2023). *Adoquines de concreto tipo II utilizando concreto reciclado y su incidencia en la resistencia a la compresión y costos en las vías urbanas de Panao* (Tesis de pregrado). Universidad Daniel Alcides Carrión. Repositorio Institucional UDH. <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/5007>
- Boomibalan, S., & Perumal, R. (2023). Assessment of mechanical and durability performance of silica fume and metakaolin as cementitious materials in high-performance concrete. *Journal OF Building Engineering*.
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2021). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123689>
- Cárdenas, P., & Quispe, D. (2020). Análisis del comportamiento mecánico de adoquines con reemplazo parcial de agregados por RCD. *Revista Peruana de Ingeniería y Construcción*, *8*(2), 44–55.
- Castro, J., Tenza-Abril, A. J., & Soriano, L. (2021). Use of recycled aggregates in concrete blocks for sustainable urban pavements. *Journal of Cleaner Production*, *310*, 127518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127518>

- Contreras-Llanes, R., Martínez, J., & Rodríguez, P. (2023). Mechanical behavior of recycled aggregate concrete for paving applications. *Construction and Building Materials*, 374, 130894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130894>
- Contreras, M., Teixeira, E., & Silva, R. (2021). Environmental impacts of construction and demolition waste management: Current practices and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126870>
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616–1620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>
- Chen, C., Zhang, X., Liu, Y., & Wang, H. (2024). Prediction model for equivalent exposure time in indoor dry-wet cycles. *Construction and Building Materials*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824039205>
- Choudhary, R., & Kumar, B. (2021). Mechanical and durability performance of concrete with silica fume and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 280, 122519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122519>
- Dean, M., Voss, D., & Draguljić, D. (2020). *Design and analysis of experiments (2nd ed.)*. Springer.
- Deloitte. (2017). *Study on resource efficient use of mixed wastes, improving management of construction and demolition waste*. European Commission. <https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/deloitte.htm>
- De Brito, J., Agrela, F., & Vasco, J. P. (2018). Recycled aggregate concrete: Environmental assessment and performance. *Construction and Building Materials*, 172, 618–628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.134>
- Diario Uno. (2025, 12 de marzo). Lima: 38 % de residuos sólidos terminan en botaderos informales. *Diario Uno*.
- Ecoinvent Centre. (2023). *Ecoinvent Database (versión 3.9)* [Base de datos de inventario de ciclo de vida]. Zurich, Suiza: Ecoinvent Association. <https://www.ecoinvent.org>

- European Commission. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives*.  
<https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
- Farooq, M. U., Shahzad, S., Tahir, M., Sohail, M. G., & Hamid, R. (2023). Mechanical and durability performance of 100% recycled concrete pavers manufactured through compression casting technique. *Journal of Building Engineering*, 73, 106729.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106729>
- Flores, R., Medina, J., & Paredes, L. (2022). Efecto de los ciclos de humedad-secado en la durabilidad del concreto en la costa central del Perú. *Revista de Ingeniería Civil*, 29(1), 45–56.
- Galarza, J. (2020). Impactos ambientales del vertido de RCD en zonas costeras del Perú. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 12(2), 45–53.
- Gálvez-Martos, J. L., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>
- González, J. L., Pérez, M., & Ramírez, T. (2021). *Técnicas e instrumentos de investigación científica*. Editorial Académica Española.
- Gómez, R., & Rodríguez, J. (2022). Durabilidad y comportamiento mecánico de concretos con agregados reciclados en condiciones tropicales. *Revista Ingeniería y Construcción*, 37(2), 85–98. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732022000200085>
- Gómez, S., Silva, R., & Castañeda, L. (2020). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del concreto con reemplazo parcial de agregados reciclados. *Revista de la Construcción*, 19(1), 64–75. <https://doi.org/10.7764/RDLC.19.1.64>
- Guinée, J., Cucurachi, S., & Suh, S. (2021). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 420–432.
- Gutiérrez, L. (2021). *Efecto del humo de sílice en adoquines con agregados reciclados*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI.

- Guo, J.J., Zhang, Y., Li, H., & Wang, Z. (2021). Effect of Dry–Wet Cycle Periods on Properties of Concrete. MDPI. *Applied Sciences*, 11(2), 888. [https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/888?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/888?utm_source=chatgpt.com)
- Hameed, R., Imran, M., Hassan, M. I., Mehmood, I., & Iqbal, M. (2023). Mechanical performance of 100% recycled aggregate concrete bricks. *Revista de la Construcción*, 22(3), 5443. <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.3.5443>
- Hashim, A. A., Al-Mosawi, A. I., & Abdulsada, A. H. (2024). Investigating the effects of silica fume on the microstructure and mechanical properties of high-performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e02352. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02352>
- Helsing, M., Zhou, Y., & Chen, T. (2024). Performance of recycled aggregates in pedestrian concrete pavers. *Journal of Cleaner Production*, 445, 141239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141239>
- Huamán, C., & Ríos, J. (2019). Evaluación de adoquines de concreto con incorporación de residuos de construcción y demolición. *Revista Ingeniería Civil*, 26(1), 15–24.
- INACAL. (2014). NTP 334.009: *Cemento Portland ordinario – Especificaciones*. <https://www.gob.pe/inacal>
- Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2017). NTP 399.611: *Adoquines de concreto para pavimentos–Requisitos y métodos de ensayo*. <https://es.scribd.com/document/466454252/NTP-399-611-2017>
- International Organization for Standardization – ISO. (2015). *ISO 14001:2015 – Environmental management systems: Requirements with guidance for use*. <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- International Organization for Standardization (ISO). (2025). *ISO 18985:2025 – Recycled aggregates for concrete*. ISO.
- International Organization for Standardization – ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.

- Journal of Engineering Advancements. (2025). Low-carbon concrete with silica fume and recycled aggregates: A pathway to sustainable construction. *Journal of Engineering Advancements*, 6(1), 44–56. <https://doi.org/10.1016/jea.2025.01.006>
- Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2021). Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103195. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103195>
- Khan, M. I., Abbas, Y. M., Fares, G., & Alqahtani, F. K. (2023). Flowability and strength characteristics of binary cementitious systems containing silica fume, fly ash, metakaolin, and glass cullet powder. *Materials*, 16(19), 6436. <https://doi.org/10.3390/ma16196436>
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76.
- Kumar, P., & Sharma, R. (2022). Strength and durability assessment of paving blocks with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 352, 129012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129012>
- Liang, S., et al. (2023). Experimental Study on Strength and Dry–Wet Cycle Characteristics of South China coastal soft soil solidified by cement collaborating sand particles. *Applied Sciences*, 11(2), 888.
- Lei, H., Zhang, Y., & Li, J. (2022). Environmental and mechanical performance of recycled aggregate concrete incorporating supplementary cementitious materials. *Sustainability*, 14(21), 14448. <https://doi.org/10.3390/su142114448>
- Lekhya, A., & Kumar, N. S. (2024). A study on the effective utilization of ultrafine fly ash and silica fume content in high-performance concrete through an experimental approach. *Heliyon*, 10(22), e39678. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39678>
- López, A., & Sánchez, R. (2022). Impacto ambiental del uso de residuos de construcción en prefabricados de concreto. *Revista de Construcción y Medio Ambiente*, 12(3), 77–88.
- Martínez-Lage, I., Vázquez-Herrero, C., & Vázquez-Herrero, M. T. (2016). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 118, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.010>

- Martínez, P., Rojas, J., & López, C. (2020). Influencia del clima en la absorción y durabilidad de concretos reciclados en zonas áridas. *Revista ALCONPAT*, 10(3), 344–358. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.485>
- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347–357. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)
- Mendoza, R., & Torres, A. (2022). Evaluación del concreto reciclado expuesto a condiciones salinas en Lima Metropolitana. *Revista Ingeniería Civil del Perú*, 39(2), 45–58.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2020, 14 de octubre). *Resolución Ministerial N.º 257-2020-VIVIENDA: Disponen la publicación del proyecto de Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Gestión y Manejo de Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición*. Gobierno del Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2021, 26 de julio). *Decreto Supremo N.º 014-2021-VIVIENDA: Código Técnico de Construcción Sostenible*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/2021>
- MINAM. (2023). *Plan Nacional para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.minam.gob.pe>
- Ministerio del Ambiente – MINAM. (2023). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero para el Perú*. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/minam>
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Municipalidad de Lima. (2023). *Reporte sobre el cierre del relleno sanitario El Zapallal*. Gerencia de Gestión Ambiental.
- Nadim, T., Rahman, A., & Uddin, M. (2024). Influence of silica fume on recycled aggregate concrete: Durability and strength aspects. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e02576. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02576>
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

- OECD, (2021). *Economic surveys: Latin America*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/economy/surveys/>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/agenda-2030/>
- Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). (2023). *Diagnóstico sobre la gestión de RCD en el Perú*. PUCP.
- Pu, Y., Chen, L., & Zhao, X. (2023). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete: Carbon footprint and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, 409, 137324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137324>
- Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Ortega-López, V., & Juárez, C. (2020). Analysis of the influence of recycled concrete aggregates on the mechanical and durability properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 230, 116853. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116853>
- RILEM TC 249. (2021). Durability testing of concrete with recycled aggregates: Methodologies and recommendations. *Materials and Structures*, 54(3), 1–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01735-7>
- Rincón, J. M., Bastidas-Arteaga, E., & Sánchez, J. L. (2024). Modeling sulfate attack on concrete structures exposed to marine environments: A durability perspective. *Cement and Concrete Composites*, 144, 105088. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105088>
- Salazar, V. (2020). Efecto de la niebla salina en la penetración de cloruros en concretos expuestos en Lima Metropolitana. *Revista Científica de la UNI*, 18(1), 56–67.
- Sánchez, L. (2022). Análisis comparativo de adoquines de concreto con agregados reciclados frente a agregados convencionales. *Revista de Materiales y Construcción Sostenible*, 4(1), 25–37.

- Scrivener, K., John, V., & Gartner, E. (2020). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, *114*, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- SENAMHI. (2022). *Condiciones climáticas en la costa central del Perú*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Siddique, R., Cachim, P., & Choudhary, R. (2020). Influence of silica fume on recycled aggregate concrete: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, *152*, 104538. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104538>
- Silva, R. V., & Naik, T. R. (2020). Sustainable use of recycled concrete aggregates in structural applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *162*, 105047. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2019). Fresh-state performance of cementitious renderings incorporating recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, *226*, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.241>
- Sumit, K., & Ransinchung, G. D. (2021). Combined effect of fly ash, slag, and recycled aggregates on the durability of concrete paving blocks exposed to saline conditions. *Journal of Building Engineering*, *39*, 102244. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102244>
- Talledo, M. (2018). Influencia de la humedad relativa en la durabilidad de concretos en la costa central del Perú. *Revista de Ingeniería Civil*, *24*(2), 31–42.
- Thomas, C., & Gupta, R. (2022). Performance of concrete paving blocks with recycled aggregates: Mechanical properties and durability. *Journal of Cleaner Production*, *365*, 132827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132827>
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., & de Juan, M. S. (2018). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *40*, 1054–1065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>
- Vásquez, P., & Delgado, R. (2021). Durabilidad del concreto frente a ambientes marinos en la costa central del Perú. *Revista de la Construcción*, *20*(3), 145–156.

- Villarreal, A., Ortega, J. M., & Valdez, P. (2025). Accelerated carbonation in reinforced concrete under high humidity: Implications for durability in coastal cities. *Journal of Building Engineering*, 91, 109050. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.109050>
- Wang, Y., Zhang, L., & Chen, H. (2021). Durability of recycled aggregate concrete paving blocks in marine environments: Effect of silica fume. *Construction and Building Materials*, 272, 121899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121899>
- Wijatmiko, W., Putra, I., & Santoso, B. (2024). Silica fume modification in high-volume recycled aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*, 74, 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.12.456>
- Wu, H., Yu, A. T. W., & Shen, L. (2017). Investigating the determinants of construction waste generation in Hong Kong. *Waste Management*, 61, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.026>
- Yamamoto, T., Li, Y., & Noguchi, T. (2024). Critical chloride threshold for corrosion initiation in reinforced concrete: Influence of cement type and curing conditions. *Cement and Concrete Research*, 178, 107071. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107071>
- Zhao, Y., Zhang, X., Zhang, Y., & Chen, H. (2024). Mechanical properties and environmental impact of recycled concrete with mineral admixtures: A life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 438, 141117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141117>
- Zhang, C., Wang, X., & Zhang, L. (2024). Mechanism and performance control methods of sulfate attack in concrete. *Journal of Building Materials*, 27(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jobm.2024.01.001>
- Zheng, Z., Zhang, L., & Zhang, Y. (2024). Experimental study on capillary water absorption performance of coral sand concrete in high-salt environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(6), 04024057. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17766>



## **ANEXOS**

## ANEXO A: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Desechos de Concreto	Según Medina et al (2015) Los desechos de concreto son los residuos generados a partir de la demolición, remodelación y construcción de estructuras de hormigón, los cuales pueden incluir fragmentos endurecidos, polvo de cemento y mezclas sobrantes. Estos residuos representan una fracción significativa de los escombros de construcción y demolición, con un alto potencial de reutilización en nuevos materiales de construcción.	Los residuos de concreto, al incorporarse en la producción de nuevos adoquines, se utilizarán en cuatro proporciones diferentes: 0%, 25%, 45% y 60%.	Clasificación de los desechos de concreto	Reaprovechables/ No reaprovechables/ Tamaño de las partículas según tamizado (Granulometría)	Razón
			Porcentaje de Mezcla	0% de RCD/ 25% de RCD / 45% de RCD/ 60% de RCD	Razón
Propiedades físicas y mecánicas de adoquines	Según Revistas ITM (s.f.), las propiedades físicas y mecánicas de los adoquines de concreto son características fundamentales que determinan su rendimiento y durabilidad en aplicaciones de pavimentación. Las propiedades físicas incluyen aspectos como la densidad, absorción de agua y porosidad, mientras que las propiedades mecánicas abarcan la resistencia a la compresión, flexión y abrasión. Estas propiedades se evalúan mediante ensayos normalizados para garantizar que los adoquines cumplan con los estándares de calidad y sean adecuados para soportar las cargas y condiciones ambientales a las que estarán expuestos.	Los residuos de concreto, al incorporarse en la producción de nuevos adoquines, se utilizarán en cuatro proporciones diferentes: 0%, 25%, 45% y 60%.	Propiedades Físicas	Densidad del adoquín/ Absorción de agua (%) / Porosidad (%)	Razón
			Propiedades Mecánicas	Resistencia a la compresión (MPa) / Resistencia a la flexión (MPa)/ Resistencia a la abrasión	Razón



# ANEXO C: CONSTANCIA DE COMPRA DE SULFATOS



OREGON CHEM GROUP S.A.C.  
 CAL.DANTE NRO. 236 URB. CERCADO  
 SURQUILLO, LIMA - LIMA. Tel: +51 934786151  
 facturacionperu@oregonchem.com www.oregonchem.com

**RUC 20604539383**  
**BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA**  
**B001-7378**

**DATOS DEL CLIENTE**

**DNI** : 70125260  
**NOMBRE** : RIVERO SOLANO, LIDIA SUSANA  
**DIRECCIÓN FACT.** : LT.1-B EXFDO CRUCETA URB.LA CRUCETA  
**TELÉFONO** : 999316563

**FECHA EMISIÓN** : 07/08/2025  
**FECHA VENC.** : 07/08/2025  
**CONDICIÓN PAGO** : CONTADO  
**MEDIO DE PAGO** : Yape  
**MONEDA** : PEN

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	V.UNITARIO	P.UNITARIO	TOTAL
ORGN00000237	SULFATO DE MAGNESIO HEPTAHDRATADO USP / FG (SAL EPSOM) (BOLSA X 1 KG)	KGM	2.00	16.10	19.0000	S/ 38.00
					Op. Gravado	S/ 32.20
					Op. Gratuita	S/ 0.00
					Op. Exonerado	S/ 0.00
					Op. Inafecta	S/ 0.00
					IGV	S/ 5.80
					<b>IMPORTE TOTAL</b>	<b>S/ 38.00</b>

Importe en letras: **TREINTA Y OCHO CON 0/100 SOLES**

**Fecha de Entrega:** 07/08/2025

**OBSERVACIONES:**

Orden de Venta #39171

Hash:

/+OUsnExd5iCc8NhwHAYSpluqjE=

**CUENTAS DE BANCO:**

BCP - corriente soles - PEN  
 Nº: 193-2604883-0-48 - CCI: 00219300260488304818  
 BCP - corriente dólares - USD  
 Nº: 193-2602538-1-71 - CCI: 00219300260253817111  
 INTERBANK - Cuenta Corriente Soles - PEN  
 Nº: 200-3004053727 - CCI: 003-200-003004053727-33  
 INTERBANK - Cuenta Corriente Dolares - USD  
 Nº: 057-3001707247 - CCI: 003-057-003001707247-78  
 BANCO DE LA NACION - DETRACCION  
 Nº: 00-074-193714



/+OUsnExd5iCc8NhwHAYSpluqjE=

- Página 1 de 1 -

Representación impresa de la Boleta de Venta Electrónica consulte en [www.simple.pe/cpe](http://www.simple.pe/cpe)



## ANEXO E: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### 1. Ensayos de Agregados

Se recopilan datos que se van a obtener de la prueba de agregados que haremos antes de comenzar a hacer los adoquines.

#### 1.1 Ensayo de Granulometría del agregado fino y grueso

Esta prueba debe llevarse a cabo siguiendo los criterios y métodos establecidos en la NTP 400.012 y la NTP 400.037 ya que son normas cruciales para realizar este ensayo.

*Agregado Fino*

**Tabla E1**

*Requisitos granulométricos Agregado Fino*

Tamiz	Porcentaje que pasa
9.5 mm (3/8 pulg)	100
4.75 mm (No. 4)	95 a 100
2.36 mm (No. 8)	80 a 100
1.18 mm (No. 16)	50 a 85
600 µm (No. 30)	25 a 60
300 µm (No. 50)	05 a 30
150 µm (No. 100)	0 a 10

#### Cálculo

Para realizar la curva granulométrica debemos realizar los cálculos con los pesos que se ha retenido en cada tamiz usando las siguientes fórmulas:

$$\% \text{Retenido parcial} = (P_{\text{retenido en tamiz}} / P_{\text{seco del horno}}) / 100$$

$$\% \text{Retenido acumulado} = \%R. \text{ parcial} + \%R. \text{ acumulado anterior}$$

$$\% \text{Pasa} = 100 - \%R. \text{ acumulado}$$

$$MF = \frac{\sum \% \text{Ret. acumulado (3/8" + N}^\circ 4 + N^\circ 8 + N^\circ 16 + N^\circ 50 + N^\circ 100)}{100} = 2.52$$

**Tabla E2***Granulometría del agregado fino*

AGREGADO FINO					
ARENA					
Peso Inicial		500 g			
Tamiz		Retenido (g)	Retenido (%)	Acumulado Retenido (%)	Pasante (%)
N°	mm				
N°4	4.75	17.80	3.56	3.56	96.44
N°8	2.36	91.40	18.25	21.81	78.19
N°16	1.18	70.40	14.06	35.87	64.13
N°30	0.60	64.00	12.78	48.65	51.35
N°50	0.30	78.20	15.62	64.27	35.73
N°100	0.15	69.50	13.88	78.15	21.85
Fondo		109.40	21.85	100.00	0.00
		500.70	100.00		

*Agregado Grueso*

En este estudio, se llevará a cabo la curva granulométrica del agregado conocido como confitillo, siguiendo las especificaciones establecidas. A partir de este análisis, se determinarán tanto su tamaño máximo como su tamaño máximo nominal.

Para la realización del ensayo, se emplearán diversos instrumentos y equipos, entre ellos una brocha, un cucharón, taras, una balanza eléctrica, un horno con temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , y una serie de tamices con aberturas de 1/2", 3/8", 1/4", N°4, N°8 y N°16.

**Tabla E3***Granulometría del agregado grueso (confitillo)*

AGREGADO GRUESO					
PIEDRA CHANCADA (CONFITILLO)					
Peso Inicial		2000 g			
Tamiz		Retenido (g)	Retenido (%)	Acumulado Retenido (%)	Pasante (%)
N°	mm				
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2 "	63.50	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00

(continúa)

(continuación)

Tamiz		Retenido (g)	Retenido (%)	Acumulado Retenido (%)	Pasante (%)
N°	mm				
1 1/2 "	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	8.80	0.44	0.44	99.56
N°4	4.75	1886.70	94.34	94.78	5.22
Fondo		104.60	5.23	100.01	-0.01
		2000.10	100.01		

**Tabla E4**

*Granulometría del agregado grueso-RCD*

AGREGADO GRUESO					
RCD					
Peso Inicial		2000 g			
Tamiz		Retenido (g)	Retenido (%)	Acumulado Retenido (%)	Pasante (%)
N°	mm				
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 1/2 "	63.50	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2 "	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.05	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	172.00	8.60	8.60	91.40
N°4	4.75	1255.50	62.78	71.38	28.63
Fondo		574.90	28.75	100.12	-0.12
		2002.40	100.12		

## Propiedades físicas

- **%Humedad**

$$\% \text{Humedad} = \frac{W_{\text{húmedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} \times 100$$

<u>Arena</u>		
$W_{\text{húmedo}}$	500	g
$W_{\text{seco}}$	494.6	g
%humedad	1.09	%

<u>Piedra chancada (confitillo)</u>		
$W_{\text{humedo}}$	1000	g
$W_{\text{seco}}$	996.20	g
%humedad	0.38	%

<u>RCD</u>		
$W_{\text{humedo}}$	1000	g
$W_{\text{seco}}$	946	g
%humedad	5.71	%

- **Peso unitario suelto**

<u>Datos del recipiente</u>		
Peso	2591	g
Volumen	0.00283	m <sup>3</sup>

<u>Material</u>	<u>Peso</u>	
Arena	5569	g
Piedra	4182	g
RCD	3684	g

$$PU_{\text{suelto}} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

<u>Material</u>	<u>PU<sub>suelto</sub></u>	
Arena	1968	kg/m <sup>3</sup>
Piedra	1478	kg/m <sup>3</sup>
RCD	1302	kg/m <sup>3</sup>

- **Peso unitario compactado**

Material	Peso
Arena	6172 g
Piedra	4581 g
RCD	4056 g

$$PU_{\text{compactado}} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

Material	PU <sub>compactado</sub>
Arena	2181.27 kg/m <sup>3</sup>
Piedra	1618.73 kg/m <sup>3</sup>
RCD	1433.92 km/m <sup>3</sup>

## 2. Método de análisis de datos

Se utilizará un método comparativo, en el cual, tras obtener los resultados de los ensayos para los adoquines con y sin desechos de concreto, se analizará la relación entre las variables. Los resultados se presentarán de manera objetiva y, finalmente, se elaborarán las conclusiones del estudio.

**Tabla E5**

*Requisitos granulométricos Agregado Grueso*

HUSO	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados													
		100 mm (4")	90 mm (3-1/2")	75 mm (3")	63 mm (2-1/2")	50 mm (2")	37.5 mm (1-1/2")	25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (N° 4)	2.36 mm (N° 8)	1.18 mm (N° 16)	0.3 mm (N° 50)
1	90mm a 37.5mm (3-1/2" a 1-1/2")	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5						
2	63mm a 37.5mm (2-1/2" a 1-1/2")			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5						
3	50mm a 25mm (2" a 1")				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5					
357	50mm a 4.75mm (2" a N°4)				100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5			
4	37.5mm a 19mm (1-1/2" a 3/4")					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5				
467	37.5mm a 4.75mm (1-1/2" a N°4)					100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5			
5	25.0mm a 12.5mm (1" a 1/2")						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5				
56	25.0mm a 9.5mm (1" a 3/8")						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5			
57	25.0mm a 4.75mm (1" a N°4)						100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5		
6	19.0mm a 9.5mm (3/4" a 3/8")							100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5			
67	19.0mm a 4.75mm (3/4" a N°4)							100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5		
7	12.5mm a 4.75mm (1/2" a N°4)								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5		
8	9.5mm a 2.36mm (3/8" a N°8)									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	9.5mm a 1.18mm (3/8" a N°16)									100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	4.75mm a 1.18mm (N°4 a N°16)										100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

NOTA: Se permitirá el uso de agregados que no cumplan con las gradaciones especificadas, siempre y cuando existan estudios calificados a satisfacción de las partes que aseguren que el material producirá hormigón (concreto) de la calidad requerida.

## **Cálculo**

Para realizar la curva granulométrica debemos realizar los cálculos con los pesos que se ha retenido en cada tamiz usando las siguientes fórmulas:

$$\% \text{Retenido parcial} = (P_{\text{retenido en tamiz}} / P_{\text{seco del horno}}) / 100$$

$$\% \text{Retenido acumulado} = \%R_{\text{parcial}} + \%R_{\text{acumulado anterior}}$$

$$\% \text{Pasa} = 100 - \%R_{\text{acumulado}}$$

$$MF = \frac{\sum \%R_{\text{acumulado}} (1/2'' + 3/8'' + 1/4'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16)}{100} = 5.59$$

### **3. Diseño de mezcla**

El diseño de mezcla presentado a continuación corresponde a adoquines de concreto con incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) y humo de sílice. El objetivo del diseño es obtener mezclas con resistencia mecánica y durabilidad adecuada para pavimentos, siguiendo las recomendaciones del ACI 211.1 para selección de proporciones de concreto. Se evaluaron cuatro mezclas con 0%, 25%, 45% y 60% de RCD, manteniendo constante el cemento, humo de sílice, agua y agregado fino, y ajustando el agregado grueso según el porcentaje de RCD.

#### **3.1 Diseño de mezcla del ACI 211.1**

El proceso de diseño de mezcla se fundamenta en las tablas de secuencia del ACI 211.1, adaptadas para la elaboración de adoquines de concreto con resistencia específica  $f'_c = 380 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando agregados finos y gruesos caracterizados previamente.

*Selección de la resistencia requerida*

Se establece la resistencia requerida de los adoquines:

$$f'_c = 380 \text{ kg/cm}^2$$

## Tabla E6

Resistencia requerida para diseño de mezcla.

Resistencia requerida ( $f'_{cr}$ )	
$f'_c$	$f'_{cr}$
< 210 kg/cm <sup>2</sup>	$f'_c + 70$
≤ 350 kg/cm <sup>2</sup>	$f'_c + 84$
>350 kg/cm <sup>2</sup>	$1.1 f'_c + 50$

De acuerdo con la tabla E6 del ACI 211.1, para resistencias mayores a 350 kg/cm<sup>2</sup>, la resistencia de diseño se determina como:

$$f'_{cr} = 1.1 \times 380 + 50 = 468 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### Selección del tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso

El TMN será seleccionado de acuerdo con la granulometría realizada al agregado grueso. Esto tenemos que realizar con la finalidad de conocer otros valores que serán necesarios para la elaboración del diseño.

### Selección del Slump

Se consultaron los valores de contenido de agua, revenimiento (*slump*) y relación a/c recomendados para adoquines. El revenimiento se controló entre 75 y 100 mm, rango recomendado para concreto moldeado y no para pavimentos. Esto asegura trabajabilidad suficiente para el moldeo de los adoquines sin comprometer la resistencia.

Tipo de concreto	Tamaño máximo agregado (mm)	Slump deseado (mm)	Contenido de agua (kg/m <sup>3</sup> )	Relación a/c recomendada
Pavimento adoquín	20	75–100	360-370	0.55

- a) Se utilizó un contenido de agua de 360.53 g y relación agua/cemento de 0.55 para garantizar trabajabilidad y resistencia.
- b) El revenimiento se controló entre 75 y 100 mm para facilitar el moldeo de los adoquines.
- c) La relación agua/cemento se ajusta para garantizar resistencia suficiente y durabilidad

*Selección del contenido de agua*

La determinación del contenido de agua se realiza considerando el TMN del agregado y el *slump* de la mezcla, para que así podamos obtener el tipo de consistencia que deseamos.

**Tabla E7**

*Cantidad de agua según el TMN*

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados*							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm**	75 mm**	150 mm**
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
<b>Concreto con aire incluido</b>								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje†								
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

El contenido de agua se selecciona considerando el TMN del agregado y el *slump* de la mezcla. Según la tabla E7 del ACI 211.1, para un TMN de 20 mm y un *slump* de 75-100 mm, se utilizó:

$$\text{Agua} = 360.53 \text{ g por kg de cemento}$$

Este valor asegura que la mezcla tenga la consistencia adecuada para el moldeo y un buen desempeño mecánico.

### *Contenido de aire atrapado*

Para determinar cuánto de aire queda atrapado en la mezcla, necesitamos conocer el TMN del agregado grueso. La cantidad de aire atrapado en el concreto varía según una serie de variables, incluidos los materiales constituyentes de la mezcla, la granulometría del agregado y el tamaño máximo de partícula de este.

### *Determinación de la relación agua/cemento por resistencia*

El ACI pone a disposición una tabla que nos permite obtener la relación a/c adecuada para el diseño del tipo de concreto deseado, considerando la presencia o ausencia de aire atrapado y su  $f'_c$  a los 28 días.

### **Tabla E8**

#### *Relación Agua (A)/Cemento (C)*

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38	0.31
400 (40)	0.43	0.34
350 (35)	0.48	0.40
300 (30)	0.55	0.46
250 (25)	0.62	0.53
200 (20)	0.70	0.61
150 (15)	0.80	0.72

La relación agua/cemento se mantuvo en 0.55, ajustada para garantizar la resistencia requerida y la durabilidad de los adoquines, basándonos con los criterios del ACI.

### *Determinación de agua y relación agua/cemento*

Se definió una relación a/c de 0.55, y el contenido de agua se calculó en 360.53 g para asegurar trabajabilidad adecuada de la mezcla.

### *Cálculo del contenido de cemento*

Para obtener la proporción de cemento tenemos que dividir el valor obtenido mediante tablas del contenido de agua y la relación a/c.

## Cálculo

El cemento necesario se determinó mediante la relación:

$$\text{Cemento} = \frac{\text{agua}}{a/c} = \frac{360.53}{0.55} = 648.95 \text{ g}$$

*Adición de humo de sílice*

Se incorporó humo de sílice equivalente al 10% del peso del cemento:

$$\text{Humo de sílice} = 0.10 \times 648.95 = 72.11 \text{ g}$$

*Determinar el volumen del agregado grueso*

El ACI también nos brinda una tabla que nos permite determinar el volumen del agregado grueso. Este valor se calcula considerando el TMN del agregado grueso y el módulo de fineza del agregado fino

### **Tabla E9**

*Peso del agregado grueso por unidad de volumen de concreto b/bo*

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (¾)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (½)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (¾)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1½)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

*Determinación de agregados*

- Agregado fino (arena seca): 910.8 g, constante para todas las mezclas.
- Agregado grueso (piedra + RCD): ajustado según porcentaje de RCD:
  - 0% RCD → toda piedra natural
  - 25% RCD → 75% piedra natural + 25% RCD
  - 45% RCD → 55% piedra natural + 45% RCD
  - 60% RCD → 40% piedra natural + 60% RCD

Estos valores fueron ajustados considerando densidad y absorción de los materiales medidos en laboratorio.

*Volúmenes absolutos de los materiales sin considerar el agregado fino*

Es la sumatoria de los elementos en  $m^3$  tanto del cemento, agua, aire y agregado grueso.

*Determinar el volumen del agregado fino*

Se realiza mediante la diferencia de la suma de los elementos mencionados en el paso anterior, es decir realizamos la diferencia de  $1m^3$  para finalmente obtener el peso del agregado fino.

*Condiciones secas de los materiales*

Se presenta los materiales a usarse en condiciones secas en  $kg/m^3$ .

*Corrección por humedad de los agregados*

En esta etapa, se permite realizar una corrección por humedad que aportan los agregados a la mezcla. Por lo tanto, se debe reducir el agua añadida a la mezcla considerando la diferencia entre la humedad total del agregado y su absorción.

*Presentación del diseño en condiciones húmedas*

En esta etapa, se lleva a cabo la proporción de los materiales corregido por humedad por  $kg/m^3$ , dividiendo esta cantidad entre la cantidad de cemento por  $kg/m^3$ .

### **3.2 Dosificación Final de los Adoquines**

A partir del procedimiento descrito, se obtuvo la dosificación de materiales necesaria para la fabricación de los adoquines. En todos los casos se consideró una resistencia a la compresión objetivo de  $380 kg/cm^2$  (37.2 MPa), una relación agua/cemento de 0.55 y un contenido fijo de humo de sílice del 10% respecto al peso del cemento.

El agregado grueso natural fue reemplazado por residuos de construcción y demolición (RCD) en proporciones de 0 %, 25 %, 45 % y 60 %. En la Tabla E10 se presentan las cantidades calculadas para la elaboración de un adoquín en condiciones húmedas.

**Tabla E10***Dosificación de materiales por adoquín*

Mezcla	0% de RCD	25% de RCD	45% de RCD	60% de RCD
Cemento (g)	648.95	648.95	648.95	648.95
Humo de Sílice (g)	72.11	72.11	72.11	72.11
Agua (l)	360.53	360.53	360.53	360.53
Arena gruesa (g)	910.80	910.80	910.80	910.80
Piedra/Confitillo (g)	1252.35	939.26	688.79	500.94
RCD (g)	0	313.09	563.56	751.41

La resistencia objetivo de 380 kg/cm<sup>2</sup> (37.2 MPa) se estableció considerando los requerimientos de la NTP 399.613 (2019) para adoquines de concreto tipo II, lo que asegura que las mezclas diseñadas cumplan con la normativa nacional vigente. Asimismo, la relación agua/cemento de 0.55 se definió siguiendo los lineamientos del ACI 211.1 (2016), garantizando un equilibrio entre trabajabilidad, resistencia mecánica y baja permeabilidad, condición indispensable para mejorar la durabilidad del concreto. El asentamiento reducido seleccionado es coherente con la necesidad de obtener mezclas rígidas, propias de elementos prefabricados que requieren alta estabilidad dimensional.

Es importante señalar que, si bien el método ACI 211.1 fue concebido para concretos convencionales, en esta investigación se adaptó para incluir materiales alternativos. En todos los casos, se incorporó humo de sílice en una dosificación fija del 10 % respecto al peso del cemento, debido a sus propiedades puzolánicas que mejoran la densificación de la matriz y reducen la porosidad. Por otro lado, el agregado grueso natural fue reemplazado parcialmente por el RCD en proporciones de 0%, 25%, 45% y 60%. Esta adaptación metodológica permitió mantener la coherencia con el diseño original y, al mismo tiempo, evaluar el desempeño técnico y ambiental de materiales reciclados.

Con las dosificaciones finales obtenidas y presentadas en la Tabla 11, se procedió a la fase experimental, que incluyó el mezclado de materiales en una mezcladora mecánica, el moldeado en especímenes de adoquines tipo II y su posterior curado en agua hasta las edades de ensayo (7, 14, 21 y 28 días). Los procedimientos de elaboración y control se describen en detalle en el apartado correspondiente a la metodología experimental.

## ANEXO F: ANALISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Con el fin de evaluar la influencia de los diferentes factores considerados en la investigación, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) a los resultados experimentales de cada ensayo realizado. El ANOVA es una herramienta estadística que permite determinar si existen diferencias significativas entre los grupos comparados, en función de la variabilidad de los datos obtenidos.

En este estudio, las variables dependientes corresponden a los resultados de cada ensayo (resistencia, absorción, abrasión, entre otros), mientras que las variables independientes se relacionan con los porcentajes de sustitución de agregados reciclados y la incorporación de humo de sílice. A través de esta metodología se busca identificar si los cambios en la composición de las mezclas producen un efecto estadísticamente significativo sobre el desempeño del concreto para adoquines.

Las tablas ANOVA presentadas a continuación muestran los valores de significancia (p-value), los grados de libertad (gl) y la suma de cuadrados, elementos que permiten validar o rechazar la hipótesis nula planteada: que no existen diferencias entre los tratamientos. En caso de obtenerse valores de significancia inferiores a 0.05, se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados.

**Tabla F11**

*Análisis de Varianza (ANOVA) de la resistencia a la compresión de los adoquines a 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	12872.29	3	4290.76	161.14	5.86E-10	3.49
Dentro de los grupos	319.53	12	26.63			
Total	13191.82	15				

El análisis de varianza muestra que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de adoquines con distintos porcentajes de RCD a los 28 días de curado ( $F=161.14 > F \text{ crítico} = 3.49$ ;  $p < 0.05$ ). Esto confirma que la incorporación de RCD influye de manera relevante en la resistencia a compresión.

En edades tempranas (7, 14 y 21 días) los valores de F también superaron a sus respectivos F críticos y los p-valores resultaron menores a 0.05, indicando que las diferencias entre grupos se mantienen significativas a lo largo del tiempo. Sin embargo, se observó que el efecto del RCD se intensifica en la edad de 28 días, alcanzando la mezcla con 60% RCD el mayor promedio de resistencia (72.72 MPa).

**Tabla F12**

*Análisis de Varianza (ANOVA) de la resistencia a la flexión de los adoquines a 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	40.955	3	13.652	761.60	5.72E-06	6.59
Dentro de los grupos	0.072	4	0.018			
Total	41.027	7				

El análisis de varianza muestra un valor de F calculado = 761.60, que es muy superior al F crítico = 6.59, además de un p-valor =  $5.72 \times 10^{-6} < 0.05$ . Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las resistencias a flexión de los adoquines con distintos porcentajes de RCD a los 28 días.

En términos prácticos, se confirma que la incorporación de RCD genera variaciones relevantes en la resistencia a flexión, siendo necesario identificar qué dosificaciones ofrecen el mejor desempeño mecánico.

**Tabla F13**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – ciclos de humedad-secado (% pérdida de masa) de los adoquines a 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2.511	3	0.837	5.168	0.016	3.490
Dentro de los grupos	1.944	12	0.162			
Total	4.455	15				

El análisis mostró diferencias significativas entre los grupos ( $F=5.17$ ;  $p = 0.016 < 0.05$ ), lo que indica que el porcentaje de RCD influye en la pérdida de masa después de los ciclos de humedad-secado. No obstante, las diferencias fueron moderadas (1.2–1.3 % en promedio), por lo que se concluye que el uso de RCD no compromete la durabilidad superficial del adoquín bajo este tipo de exposición.

**Tabla F14**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – ciclos de humedad-secado (resistencia a la compresión) de los adoquines a 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10136.078	3	3378.693	564.051	3.564E-13	3.490
Dentro de los grupos	71.881	12	5.990			
Total	10207.958	15				

El análisis reveló diferencias altamente significativas entre los grupos ( $F=564.05$ ;  $p < 0.001$ ). Se observó un incremento progresivo en la resistencia con el aumento del porcentaje de RCD, alcanzando hasta 61.17 MPa con 60 % de reemplazo. Esto demuestra que, aun sometidos a ciclos de humedad-secado, los adoquines con RCD mantienen o incluso mejoran su desempeño mecánico, reforzando su idoneidad para aplicaciones en entornos costeros con alta humedad relativa.

**Tabla F15**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – ensayo de abrasión manual de los adoquines a 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.2218	3	0.0739	4.361	0.0269	3.490
Dentro de los grupos	0.2035	12	0.0169			
Total	0.4253	15				

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de desgaste superficial de los adoquines con distintos porcentajes de RCD. El valor de F calculado (4.361) es mayor al F crítico (3.490) y el nivel de significancia obtenido ( $p = 0.0269 < 0.05$ ) confirma que el tipo de mezcla influye en el resultado del ensayo.

Esto significa que la resistencia a la abrasión de los adoquines depende del porcentaje de reemplazo de agregado reciclado utilizado. Aunque los valores de desgaste absoluto son bajos (0.05–0.06 %), la variación detectada sugiere que mezclas con mayores porcentajes de RCD tienden a presentar una ligera reducción en su resistencia al desgaste frente a las de referencia, lo que debe considerarse en aplicaciones de alto tránsito.

**Tabla F16**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – Absorción de Agua por Capilaridad de los adoquines a las 24 horas de los 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.03365	3	0.0112	0.6580	0.5933	3.490
Dentro de los grupos	0.20455	12	0.0170			
Total	0.2382	15				

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los adoquines con distintos porcentajes de RCD. El valor de F calculado (0.658) es menor que el F crítico (3.490) y la significancia obtenida ( $p = 0.593 > 0.05$ ) confirma que el porcentaje de reemplazo de agregado reciclado no tiene un efecto relevante en el resultado de este ensayo.

Esto indica que, bajo las condiciones evaluadas, los adoquines presentan un comportamiento homogéneo frente a esta propiedad, independientemente del nivel de sustitución de agregado natural por RCD.

**Tabla F17**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – Absorción Total de Agua por Inmersión de los adoquines a los 28 días*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	58.9459	3	19.6486	190.2288	2.21751E-10	3.4902
Dentro de los grupos	1.2394	12	0.1032			
Total	60.1854	15				

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que existen diferencias estadísticamente significativas en la absorción de agua por inmersión entre los distintos porcentajes de RCD evaluados. El valor de F calculado (190.22) es muy superior al F crítico (3.490), mientras que la significancia obtenida ( $p = 2.21E-10 < 0.05$ ) confirma que la sustitución de agregado natural por RCD influye de manera considerable en la absorción de agua.

Este resultado indica que la porosidad y la capacidad de retención hídrica de los adoquines se ven afectadas por el nivel de reemplazo de RCD, evidenciando que a mayor incorporación de material reciclado pueden presentarse cambios significativos en el comportamiento frente al agua.

**Tabla F18**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Aluminio a los 28 días (% variación de peso)*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.5456	3	0.1818	1.9414	0.1768	3.4902
Dentro de los grupos	1.1241	12	0.0936			
Total	1.6697	15				

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los distintos porcentajes de RCD (0%, 25%, 45%, 60%) respecto a la variación de peso de los adoquines expuestos a sulfato de aluminio. Esto significa que la inmersión en esta solución no produjo un efecto diferenciado en la pérdida o ganancia de masa según la dosificación. En términos prácticos, el ataque por sulfato de aluminio no generó deterioro volumétrico relevante en ninguno de los grupos.

**Tabla F19**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Aluminio a los 28 días (Ensayo de compresión)*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10493.8546	3	3497.9515	519.2953	5.83051E-13	3.4902
Dentro de los grupos	80.8315	12	6.7359			
Total	10574.6861	15				

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que existen diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de RCD en la resistencia a compresión después del ataque con sulfato de aluminio. Esto evidencia que el nivel de sustitución de agregado reciclado influye directamente en la capacidad resistente del material bajo este ambiente agresivo. Algunos porcentajes de RCD (como 45%) mostraron un mejor desempeño, mientras que otros (25% y 60%) redujeron la resistencia, lo cual indica que la reacción con el sulfato de aluminio afecta de manera distinta según la dosificación.

**Tabla F20**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Magnesio a los 28 días (% variación de peso)*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.9440	3	0.6480	0.3417	0.7956	3.4902
Dentro de los grupos	22.7548	12	1.8962			
Total	24.6988	15				

El análisis de varianza (ANOVA) reveló que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de RCD (0%, 25%, 45%, 60%) respecto a la variación de peso en presencia de sulfato de magnesio. Esto indica que, aunque hubo pequeñas pérdidas o incrementos de masa observados experimentalmente, estas variaciones no dependen de la proporción de RCD. En términos prácticos, el ataque del sulfato de magnesio no produjo un efecto diferenciado sobre la estabilidad volumétrica de los adoquines.

**Tabla F21**

*Análisis de Varianza (ANOVA) – acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados con Sulfato de Magnesio a los 28 días (Ensayo de compresión)*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8481.5364	3	2827.1788	66.5620	9.49224E-08	3.4902
Dentro de los grupos	509.6919	12	42.4743			
Total	8991.2283	15				

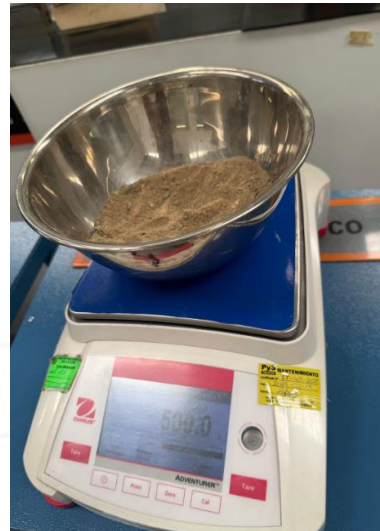
El análisis de varianza (ANOVA) reveló que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dosificaciones de RCD en la resistencia a compresión tras la exposición a sulfato de magnesio. Esto confirma que el nivel de sustitución de agregado reciclado influye en el desempeño mecánico bajo este ambiente agresivo. En particular, algunas mezclas (como 45%) lograron mantener mejor la resistencia, mientras que otras (como 25%) se vieron más afectadas, lo que demuestra que el sulfato de magnesio tiene un carácter más agresivo que el sulfato de aluminio sobre la matriz de concreto.



## ANEXO G: ENSAYOS PRELIMINARES



a) Agregado grueso-Confitillo



b) Agregado fino-Arena



c) Agregado grueso-RCD

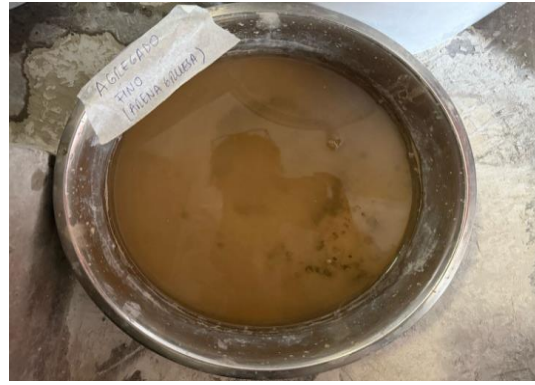


d) Agregado fino-Arena



e) Se lava el material hasta que el agua quede cristalina





f) Proceso de saturación

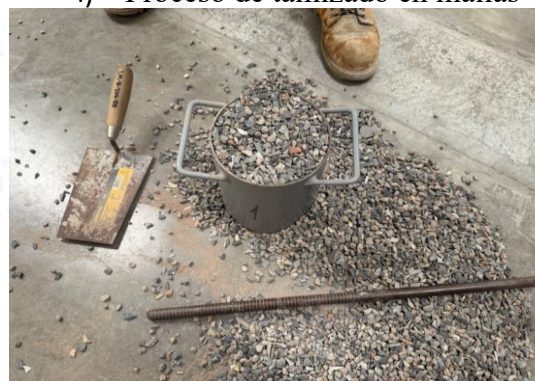


g) Retiro de muestras del horno



h) Enfriamiento del material

i) Proceso de tamizado en mallas



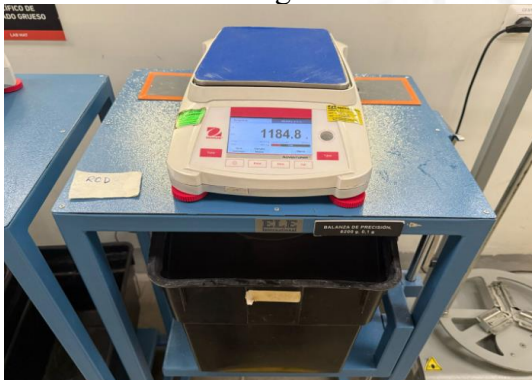
j) Proceso para calcular peso unitario suelto y compactado



k) Proceso de secado de agregado grueso



l) Peso del agregado piedra chancada húmedo sumergido en agua



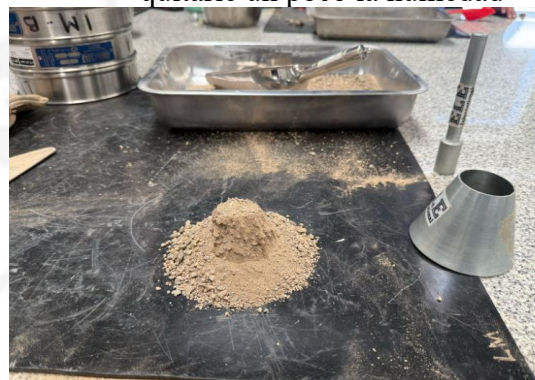
m) Peso del agregado RCD húmedo sumergido en agua



n) Secando la muestra en cocina para quitarle un poco la humedad

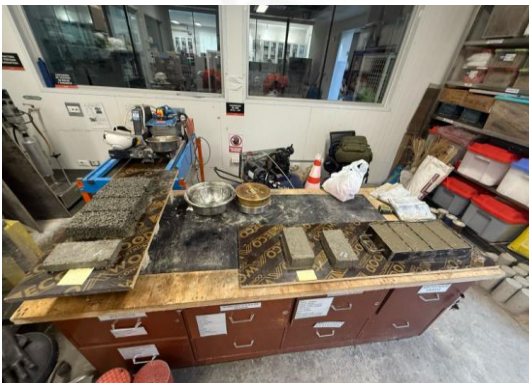
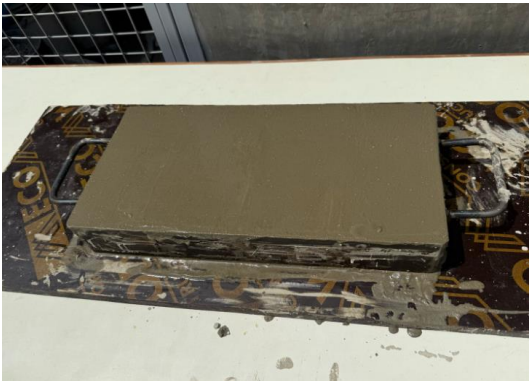


o) Ensayo de cono de arena para determinar la finura o la consistencia de la arena

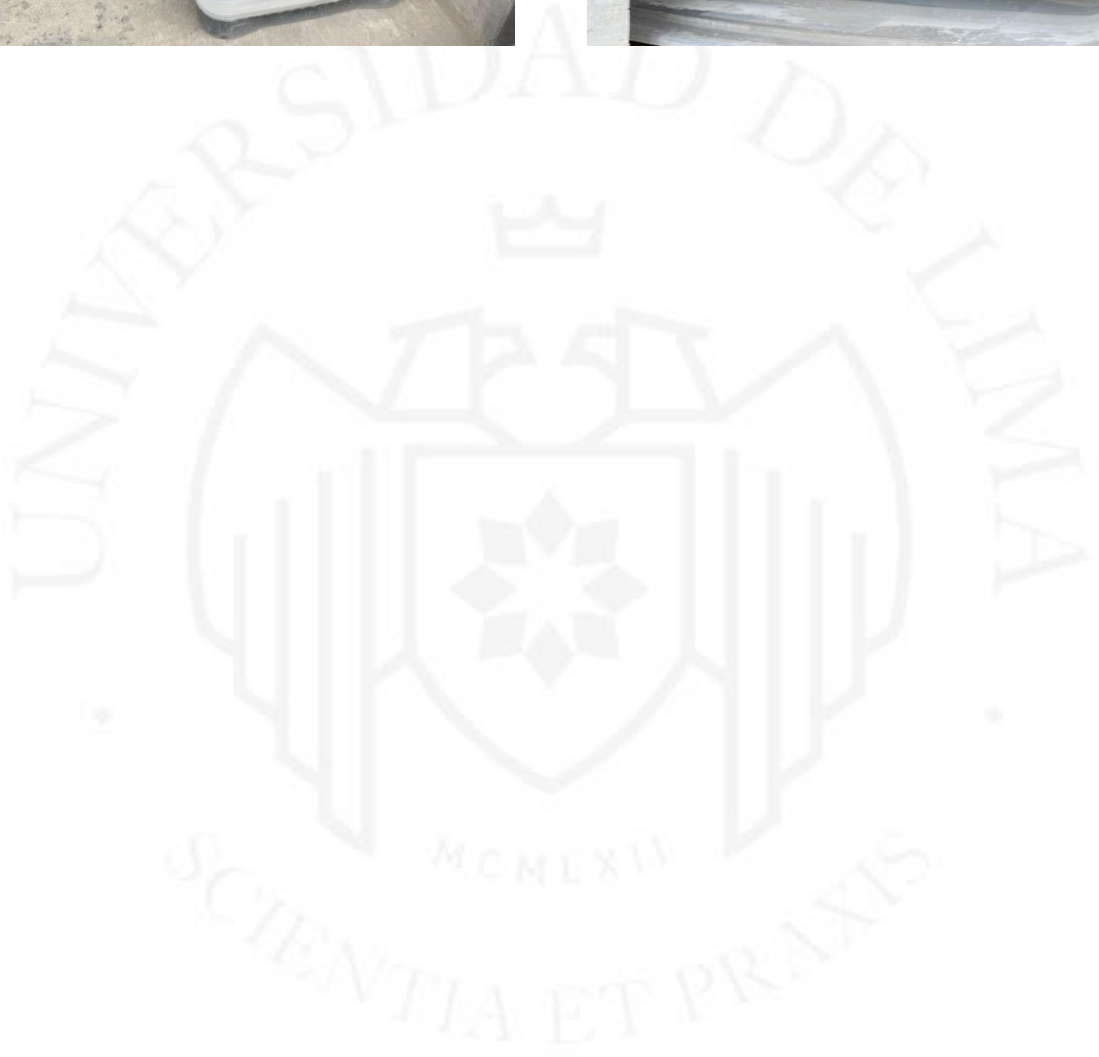


# ANEXO H: ELABORACIÓN Y CURADO DE ADOQUINES

## 1. Elaboración de adoquines

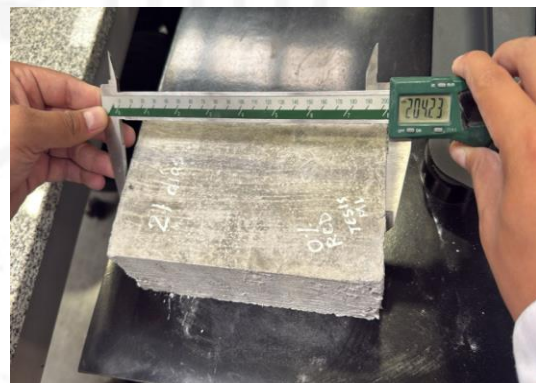


2. Proceso de curado



# ANEXO I: ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE LOS ADOQUINES

## 3. Ensayo de compresión





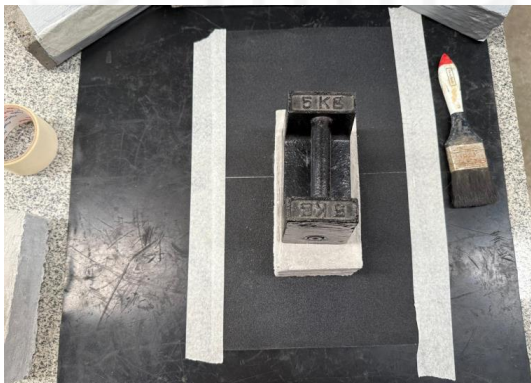
#### 4. Ensayo de flexión



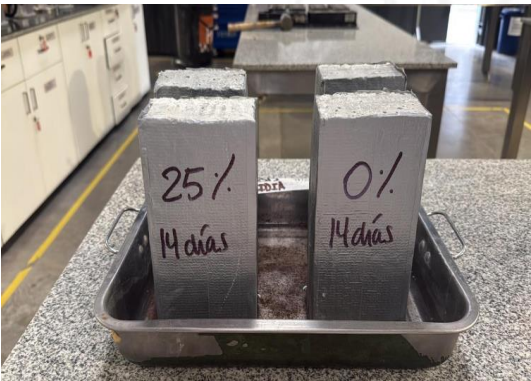
### 5. Ensayo de ciclos de humedad-secado (durabilidad)



### 6. Ensayo de abrasión manual



7. Ensayo de absorción de agua por capilaridad



## 8. Ensayo de absorción de agua por inmersión



## 9. Ensayo acelerado de durabilidad frente a ambientes agresivos simulados (sulfato de aluminio y sulfato de magnesio)

### 9.1 Sulfato de aluminio

Ciclos	Fecha	Inicio	Fin	Observaciones
1	Inmersión	02-Ago	2:05 a. m. - 6:05 p. m.	-
2	Secado	02-Ago	6:07 p. m. - 2:07 p. m.	No se observan cambios en los adoquines
3	Inmersión	03-Ago	2:11 a. m. - 6:11 p. m.	Ligero tono blanquecino
4	Secado	03-Ago	6:15 p. m. - 2:15 a. m.	Ligero tono blanquecino
5	Inmersión	04-Ago	2:24 a. m. - 6:24 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
6	Secado	04-Ago	6:35 p. m. - 2:35 a. m.	Cambio de color más pronunciado
7	Inmersión	05-Ago	2:36 a. m. - 6:36 p. m.	Cambio de color más pronunciado
8	Secado	05-Ago	6:42 p. m. - 2:42 a. m.	Cambio de color más pronunciado
9	Inmersión	06-Ago	2:48 a. m. - 6:48 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
10	Secado	06-Ago	6:55 p. m. - 2:55 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
11	Inmersión	07-Ago	3:00 a. m. - 7:00 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
12	Secado	07-Ago	7:02 p. m. - 3:02 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
13	Inmersión	08-Ago	3:05 a. m. - 7:05 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
14	Secado	08-Ago	7:06 p. m. - 3:06 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
15	Inmersión	09-Ago	3:09 a. m. - 7:09 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras

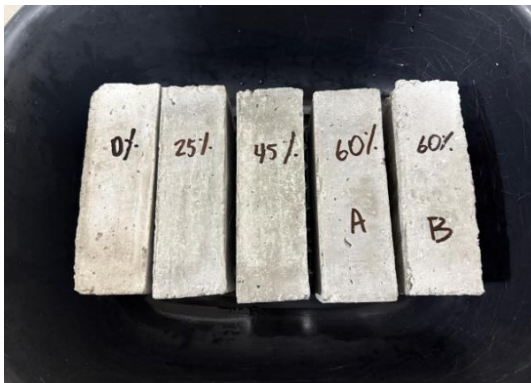
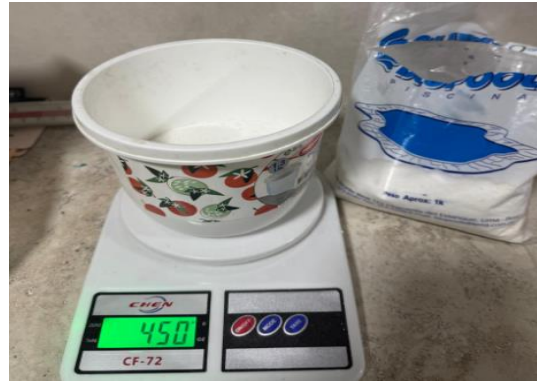
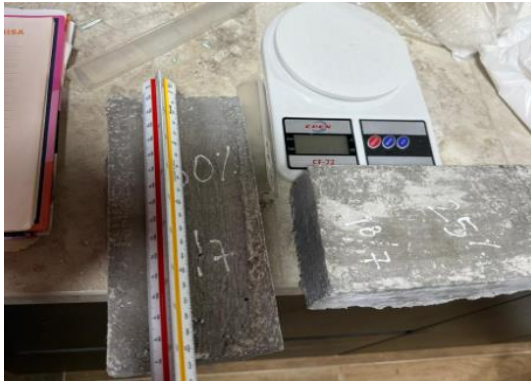
(continua)

(continuamos)

Ciclos	Fecha	Inicio	Fin	Observaciones	
16	Secado	09-Ago	7:10 p. m.	3:10 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
17	Inmersión	10-Ago	3:15 a. m.	7:15 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
18	Secado	10-Ago	7:17 p. m.	3:17 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
19	Inmersión	11-Ago	3:17 a. m.	7:17 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
20	Secado	11-Ago	7:17 p. m.	3:17 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
21	Inmersión	12-Ago	3:19 a. m.	7:19 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
22	Secado	12-Ago	7:19 p. m.	3:19 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
23	Inmersión	13-Ago	3:20 a. m.	7:20 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
24	Secado	13-Ago	7:21 p. m.	3:21 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
25	Inmersión	14-Ago	3:21 a. m.	7:21 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
26	Secado	14-Ago	7:21 p. m.	3:21 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
27	Inmersión	15-Ago	3:24 a. m.	7:24 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
28	Secado	15-Ago	7:27 p. m.	3:27 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
29	Inmersión	16-Ago	3:28 a. m.	7:28 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
30	Secado	16-Ago	7:28 p. m.	3:28 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
31	Inmersión	17-Ago	3:28 a. m.	7:28 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
32	Secado	17-Ago	7:28 p. m.	3:28 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
33	Inmersión	18-Ago	3:35 a. m.	7:35 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
34	Secado	18-Ago	7:36 p. m.	3:36 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
35	Inmersión	19-Ago	3:36 a. m.	7:36 p. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
36	Secado	19-Ago	7:36 p. m.	3:36 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
37	Inmersión	20-Ago	3:43 a. m.	7:43 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
38	Secado	20-Ago	7:43 p. m.	3:43 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras
39	Secado	21-Ago	-	-	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras

### Evidencia fotográfica



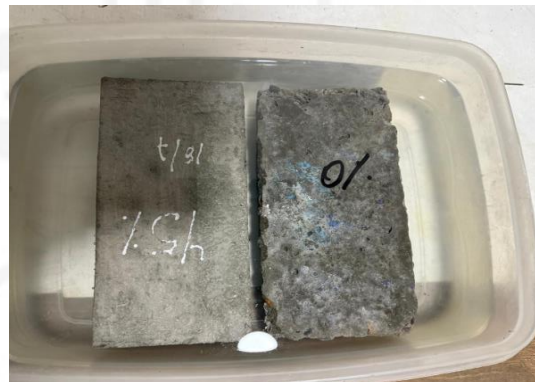




## 9.2 Sulfato de magnesio

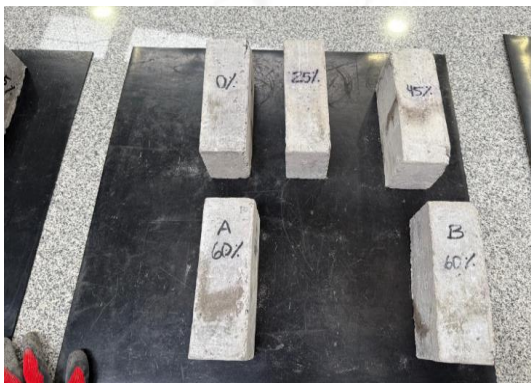
Ciclos	Fecha	Inicio	Fin	Observaciones	
1	Inmersión	08-Ago	2:05 a. m.	6:05 p. m.	-
2	Secado	08-Ago	6:07 p. m.	2:07 p. m.	No se observan cambios en los adoquines
3	Inmersión	09-Ago	2:11 a. m.	6:11 p. m.	No se observan cambios en los adoquines
4	Secado	09-Ago	6:15 p. m.	2:15 a. m.	No se observan cambios en los adoquines
5	Inmersión	10-Ago	2:24 a. m.	6:24 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
6	Secado	10-Ago	6:35 p. m.	2:35 a. m.	Se observa ligero desprendimiento de partes del adoquín
7	Inmersión	11-Ago	2:36 a. m.	6:36 p. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
8	Secado	11-Ago	6:42 p. m.	2:42 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
9	Inmersión	12-Ago	2:48 a. m.	6:48 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
10	Secado	12-Ago	6:55 p. m.	2:55 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
11	Inmersión	13-Ago	3:00 a. m.	7:00 p. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
12	Secado	13-Ago	7:02 p. m.	3:02 a. m.	Se observa ligeros daños en las paredes todos los adoquines
13	Inmersión	14-Ago	3:05 a. m.	7:05 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
14	Secado	14-Ago	7:06 p. m.	3:06 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín. Se observa un desgaste en las esquinas
15	Inmersión	15-Ago	3:09 a. m.	7:09 p. m.	No se observa cambio en el color del adoquín. Se observa un desgaste en las esquinas
16	Secado	15-Ago	7:09 p. m.	3:09 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín. Se observa un desgaste en las esquinas
17	Inmersión	16-Ago	3:14 a. m.	7:14 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
18	Secado	16-Ago	7:14 p. m.	3:14 a. m.	Se observa un desgaste en una de las caras del adoquín
19	Inmersión	17-Ago	3:14 a. m.	7:14 p. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
20	Secado	17-Ago	7:14 p. m.	3:14 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín / Se observa un desgaste en una de las caras del adoquín
21	Inmersión	18-Ago	3:18 a. m.	7:18 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
22	Secado	18-Ago	7:18 p. m.	3:18 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
23	Inmersión	19-Ago	3:18 a. m.	7:18 p. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
24	Secado	19-Ago	7:18 p. m.	3:18 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín
25	Inmersión	20-Ago	3:20 a. m.	7:20 p. m.	Se realizó cambio de agua con sulfato de aluminio
26	Secado	20-Ago	7:20 p. m.	3:20 a. m.	No se observa cambio en el color del adoquín / Se observa un desgaste en una de las caras del adoquín
27	Secado	21-Ago	-	-	No se observa cambio en el color del adoquín
28	Secado	15-Ago	7:27 p. m.	3:27 a. m.	Cambio de color más pronunciado / No presenta rajaduras

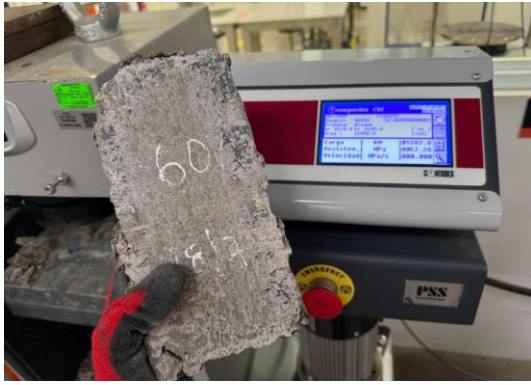
Evidencia fotográfica





**10. Ensayo de compresión luego de someter los adoquines al ataque de sulfato de aluminio (39 ciclos) y sulfato de magnesio (27 ciclos)**





# Lidia RIVERO SOLANO

## DESEMPEÑO FISICOMECAÁNICO, DURABILIDAD Y AMBIENTAL DE ADOQUINES TIPO II ELABORADOS CON AGREGADO RECI...

 Reportes Biblioteca

 Reportes Biblioteca

 Universidad de Lima

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3467355190

Fecha de entrega

28 ene 2026, 4:25 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

28 ene 2026, 4:30 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

tesis\_nuevo\_2026\_ultimo\_1.pdf

Tamaño del archivo

2.7 MB

86 páginas

21.183 palabras

118.157 caracteres




# 15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía

## Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## Fuentes principales

- 14% Fuentes de Internet
- 5% Publicaciones
- 8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet		
hdl.handle.net			3%
2	Internet		
repositorio.cientifica.edu.pe			1%
3	Trabajos del estudiante	Universidad Andina del Cusco	<1%
4	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo	<1%
5	Internet	tesis.usat.edu.pe	<1%
6	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
7	Internet	repositorio.unjbg.edu.pe	<1%
8	Internet	dspace.unitru.edu.pe	<1%
9	Internet	accedacris.ulpgc.es	<1%
10	Internet	www.coursehero.com	<1%
11	Internet	upc.aws.openrepository.com	<1%

12	Internet	helvia.uco.es	<1%
13	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD	<1%
14	Publicación	Vivián Andrea Ulloa Mayorga. "Durabilidad de hormigones armados, con árido re..."	<1%
15	Internet	repositorio.upla.edu.pe	<1%
16	Trabajos del estudiante	Universidad Tecnológica del Peru	<1%
17	Internet	repositorio.udh.edu.pe	<1%
18	Trabajos del estudiante	Universidad Privada del Norte	<1%
19	Internet	Pablo Lorca Aranda. "EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓXIDO CÁLCICO SOBRE MEZ..."	<1%
20	Trabajos del estudiante	Universidad Católica San Pablo	<1%
21	Trabajos del estudiante	Universidad Católica de Santa María	<1%
22	Internet	repositorio.urp.edu.pe	<1%
23	Trabajos del estudiante	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez	<1%
24	Internet	es.slideshare.net	<1%
25	Internet	repositorio.ucsm.edu.pe	<1%

26	Trabajos del estudiante	Universidad de Málaga	<1%
27	Internet	doctiktak.com	<1%
28	Trabajos del estudiante	Pontificia Universidad Catolica del Peru	<1%
29	Trabajos del estudiante	Universidad Continental	<1%
30	Trabajos del estudiante	Higher Education Commission Pakistan	<1%
31	Internet	eprints.uanl.mx	<1%
32	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	<1%
33	Trabajos del estudiante	Universidad Privada Antenor Orrego 2025	<1%
34	Internet	docplayer.es	<1%
35	Internet	es.scribd.com	<1%
36	Internet	www.researchgate.net	<1%
37	Internet	"Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la..."	<1%
38	Internet	repositorio.uandina.edu.pe	<1%
39	Internet	qdoc.tips	<1%

40	Trabajos del estudiante unasam	<1%
41	Trabajos del estudiante Universidad Politécnica del Perú	<1%
42	Internet materconstrucc.revistas.csic.es	<1%
43	Internet tesis.pucp.edu.pe	<1%
44	Trabajos del estudiante Unidades Tecnológicas de Santander	<1%
45	Internet core.ac.uk	<1%
46	Internet repositoriodemo.continental.edu.pe	<1%
47	Trabajos del estudiante uady	<1%
48	Trabajos del estudiante Universidad Tecnológica de los Andes	<1%
49	Internet www.monografias.com	<1%
50	Internet www.ptolomeo.unam.mx:8080	<1%
51	Trabajos del estudiante UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología (NO TOCAR)	<1%
52	Trabajos del estudiante Universidad Católica Boliviana "San Pablo"	<1%
53	Trabajos del estudiante Universidad Estadual Paulista	<1%

54	Internet	repositorio.unan.edu.ni	<1%
55	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional Agraria La Molina	<1%
56	Trabajos del estudiante	Universidad Rey Juan Carlos	<1%
57	Internet	futur.upc.edu	<1%
58	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Piura	<1%
59	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Trujillo	<1%
60	Trabajos del estudiante	Universidad de Costa Rica	<1%
61	Internet	repositorio.puce.edu.ec	<1%
62	Internet	www.offixfiscal.com.mx	<1%
63	Trabajos del estudiante	FUNIBER	<1%
64	Trabajos del estudiante	Universidad Anahuac México Sur	<1%
65	Trabajos del estudiante	University of Birmingham	<1%
66	Internet	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
67	Internet	riunet.upv.es	<1%

68	Internet	www.bculinary.com	<1%
69	Publicación	Gabriel Felmer, Simos Yannas. "Designing naturally-conditioned dwellings for wa..."	<1%
70	Publicación	Harrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (P..."	<1%
71	Internet	agrodominicano.blogspot.com	<1%
72	Internet	eprints.ucm.es	<1%
73	Internet	issuu.com	<1%
74	Internet	worldwidescience.org	<1%
75	Internet	www.redalyc.org	<1%
76	Trabajos del estudiante	Fundació Per A La Docencia Sant Llatzer	<1%
77	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Ingenieria	<1%
78	Internet	bvs.sld.cu	<1%
79	Internet	gredos.usal.es	<1%
80	Internet	pdffox.com	<1%
81	Internet	stories.undp.org	<1%

82	Internet	www.euskadi.net	<1%
83	Internet	www.isotools.us	<1%
84	Internet	www.residuosprofesional.com	<1%
85	Internet	www.slideshare.net	<1%
86	Internet	zagan.unizar.es	<1%