

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**



**Elaboración de adoquines ecoamigables mediante el reciclaje de plásticos  
farmacéuticos y residuos de curtiembres para la sostenibilidad del sector  
construcción en Arequipa – 2025**

Tesis presentada por las bachilleres:

**Burga Prado, Katherine Sophia**

**ORCID: 0009-0007-3571-9671**

**Lazo Jimenez, Daniela Alejandra**

**ORCID: 0009-0003-5968-4689**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor (a):

**Mg. Sonia Lazarte Arredondo**

**ORCID: 0000-0002-8696-6708**

**Arequipa – Perú**

**2025**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**TITULACIÓN CON TESIS**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 27 de agosto del 2025

**Dictamen: 014878-C-EPIA-2025**

Visto el borrador del expediente 014878, presentado por:

**2018203062 - LAZO JIMENEZ DANIELA ALEJANDRA**

**2019814062 - BURGA PRADO KATHERINE SOPHIA**

Titulado:

**ELABORACIÓN DE ADOQUINES ECOAMIGABLES MEDIANTE EL RECICLAJE DE PLÁSTICOS  
FARMACÉUTICOS Y RESIDUOS DE CURTIEMBRES PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL SECTOR  
CONSTRUCCIÓN EN AREQUIPA - 2025**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO AMBIENTAL**

**43297964 - CAMPOS OLAZAVAL LIZBETH MARIANELLA  
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA  
DICTAMINADOR**



**72384055 - MEDINA RAMOS ROBERT JOAQUIN  
DICTAMINADOR**



# Elaboración de adoquines ecoamigables mediante el reciclaje de plásticos farmacéuticos y residuos de curtiembres para la sostenibilidad del sector construcción en Arequipa – 2025

## INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	3%
	Trabajo del estudiante	
2	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a>	1%
	Fuente de Internet	
3	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a>	1%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	<1%
	Trabajo del estudiante	
5	<a href="http://dspace.unitru.edu.pe">dspace.unitru.edu.pe</a>	<1%
	Fuente de Internet	
6	<a href="http://repositorio.ucsm.edu.pe">repositorio.ucsm.edu.pe</a>	<1%
	Fuente de Internet	
7	Submitted to uncedu	<1%
	Trabajo del estudiante	

## DEDICATORIA

### ***Katherine Sophia Burga Prado***

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres Santos y Sirley por su amor incondicional, su esfuerzo constante y por ser mi principal fuente de motivación en cada paso de este camino. A mis hermanos Andre, Alexander y Aigner, por su compañía, paciencia y palabras de aliento en los momentos más difíciles. Dedico también un agradecimiento especial a mi abuelita, que desde el cielo me acompaña. Su amor y enseñanzas viven en mí y han sido una luz en este proceso.*

### ***Daniela Alejandra Lazo Jiménez***

*A Dios por darme la fuerza, la salud y la oportunidad de cumplir una meta más. A mis padres Julio y Virginia, por ser mi luz constante y mi refugio en los días oscuros, por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo siempre dan frutos, sin su sabiduría y sacrificio, este logro no habría sido posible, gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudé de mí misma, por sus palabras de aliento, sus silencios comprensivos y sus abrazos que lo curan todo. A mi hermana Claudia, quien siempre ha sido una fuente constante de inspiración y ejemplo para mí, por ser mi modelo a seguir en cada paso de mi camino. Tu dedicación y esfuerzo me han enseñado a ser mejor, a nunca rendirme y a luchar por lo que quiero. A mi hermano Diego y Abuelitos, siempre llevaré su amor y sabiduría conmigo, este éxito también es suyo.*

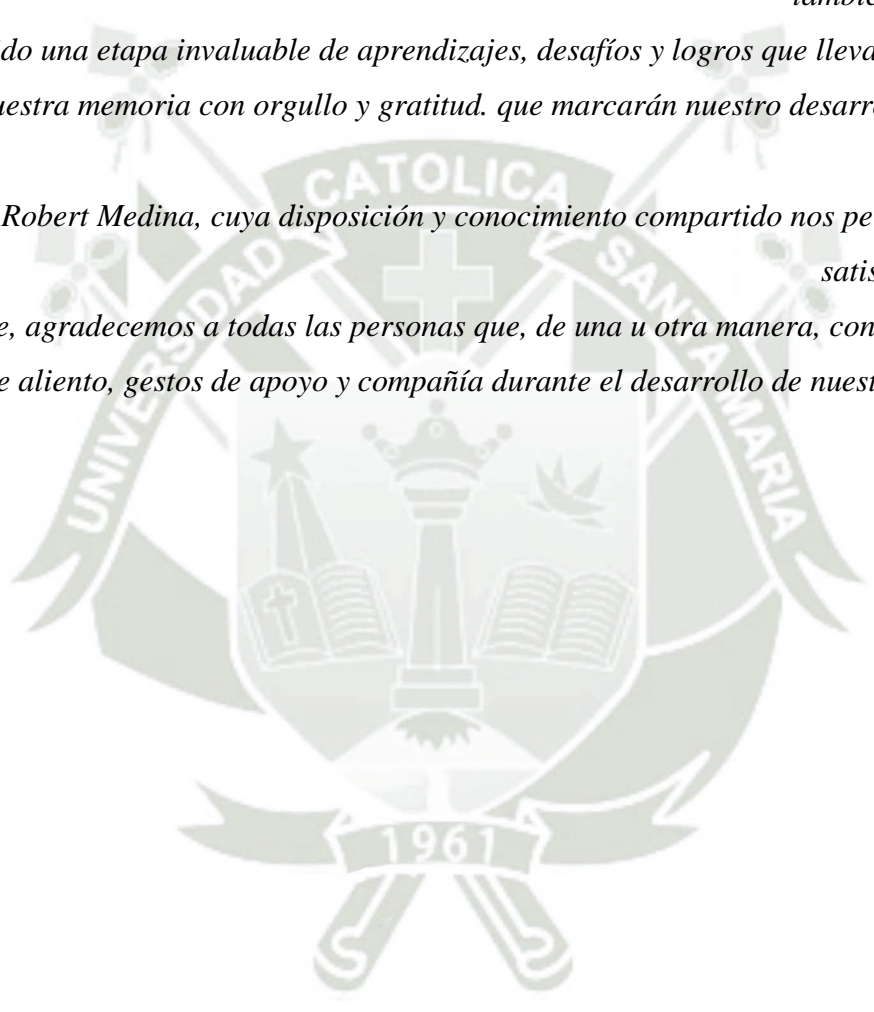
## **AGRADECIMIENTOS**

*Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María, que nos acogió durante estos años académicos.*

*A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, ofreciéndonos no solo conocimientos, sino también experiencias que han sido una etapa invaluable de aprendizajes, desafíos y logros que llevaremos siempre en nuestra memoria con orgullo y gratitud. que marcarán nuestro desarrollo personal y profesional.*

*Al Mg. Robert Medina, cuya disposición y conocimiento compartido nos permito culminar satisfactoriamente.*

*Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con palabras de aliento, gestos de apoyo y compañía durante el desarrollo de nuestro proyecto de tesis.*



## RESUMEN

Esta investigación detalla la elaboración de adoquines ecoamigables aprovechando plástico procedente de residuos farmacéuticos junto con residuos orgánicos de la industria de curtiembre empleados como adhesivo natural evaluándose para ello tres tamaños distintos de muestras mediante un total de 27 pruebas experimentales donde se variaron las proporciones de plástico reciclado colágeno extraído y arena gruesa utilizando específicamente las combinaciones 75%-25% 50%-50% y 25%-75%. Los resultados obtenidos demostraron consistentemente que los adoquines fabricados con la mayor proporción de plástico correspondiente al 75% alcanzaron los valores más altos de resistencia a la compresión llegando hasta 268.16 kg/cm<sup>2</sup> en el caso de los adoquines de tamaño pequeño mientras que aquellos con la menor proporción del 25% registraron una resistencia inferior situada en 232.97 kg/cm<sup>2</sup> y en lo referente a la densidad se observó que los adoquines con 75% de plástico mostraron una densidad máxima de 1530 kg/m<sup>3</sup> lo cual representa una reducción muy significativa si se compara con la densidad típica de los adoquines convencionales de cemento que es de 2250 kg/m<sup>3</sup> para el tamaño pequeño permitiendo este enfoque obtener un producto final notablemente más ligero pero aun así resistente característica que lo hace potencialmente adecuado para su uso en zonas sísmicas gracias a su menor peso y posible mayor durabilidad. Adicionalmente se constató que el colágeno extraído de los residuos de curtiembre funcionó mejorando la cohesión entre los distintos materiales componentes proporcionando una mayor adhesión interna mientras que la arena gruesa incorporada contribuyó a la resistencia mecánica general del adoquín ayudando a generar un material más robusto sin por ello sacrificar la ventaja de su ligereza comparativa.

**Palabras clave:** adoquines ecológicos, reciclaje de plástico, residuos de curtiembre.

## ABSTRACT

This research details the development of eco-friendly paving stones utilizing plastic derived from pharmaceutical waste alongside organic residues from the tannery industry employed as a natural adhesive evaluating for this purpose three different sample sizes through a total of 27 experimental tests where the proportions of recycled plastic extracted collagen and coarse sand were varied specifically using the combinations 75% -25% 50%-50% and 25%-75%. The results obtained consistently demonstrated that the pavers manufactured with the highest proportion of plastic corresponding to 75% achieved the highest compressive strength values reaching up to 268.16 kg/cm<sup>2</sup> in the case of the small-sized pavers while those with the lowest proportion of 25% registered a lower strength situated at 232.97 kg/cm<sup>2</sup> and regarding density it was observed that the pavers with 75% plastic showed a maximum density of 1530 kg/m<sup>3</sup> which represents a very significant reduction when compared to the typical density of conventional cement pavers which is 2250 kg/m<sup>3</sup> for the small size allowing this approach to yield a final product that is notably lighter yet still resistant a characteristic making it potentially suitable for use in seismic zones owing to its lower weight and possible greater durability. Additionally it was confirmed that the collagen extracted from the tannery waste functioned by improving the cohesion among the different component materials providing greater internal adhesion while the incorporated coarse sand contributed to the overall mechanical strength of the paver helping to generate a more robust material without thereby sacrificing the advantage of its comparative lightness.

**Keywords:** eco-friendly pavers, plastic recycling, tannery waste.

## ÍNDICE

*DEDICATORIA*

*AGRADECIMIENTOS*

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN ..... 1

CAPÍTULO I..... 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 3

1.1. Problemática de la investigación ..... 3

1.2. Justificación ..... 4

1.2.1. Justificación ambiental ..... 4

1.2.2. Justificación Normativa y responsabilidad ambiental ..... 5

1.2.3. Justificación social ..... 6

1.2.4. Justificación tecnológica ..... 7

1.2.5. Justificación económica ..... 8

1.3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS ..... 9

1.3.1. Objetivo General ..... 9

1.3.2. Objetivos Específicos ..... 9

2. HIPÓTESIS ..... 10

CAPÍTULO II ..... 11

3. FUNDAMENTO TEÓRICO ..... 11

3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 11

3.2. MARCO TEÓRICO ..... 15

3.2.1. Gestión y Tratamiento de Residuos ..... 15

3.2.2. Plásticos farmacéuticos ..... 16

3.2.3. Residuos de curtiembre ..... 20

3.2.4. Economía circular ..... 22

3.2.5. Valorización de residuo ..... 24

3.3. Construcción Sostenible ..... 27

3.3.1. Adoquines convencionales ..... 27

3.3.2. Adoquines ecoamigables ..... 28

3.3.3. Sostenibilidad en materiales de construcción ..... 29

3.3.4. Comparación de impacto ambiental ..... 29

3.4. Principios Científicos Aplicados ..... 30

3.4.1.	Fenómenos Físicos y Químicos.....	30
3.4.2.	Adherencia y cohesión en materiales compuestos .....	31
3.4.3.	Interacción mecánica entre partículas en una mezcla .....	32
3.4.4.	Fenómenos térmicos en el proceso de fusión de plásticos .....	34
3.4.5.	Reacciones químicas en la hidrólisis del colágeno .....	36
3.4.6.	Efectos de la temperatura y el pH .....	36
3.4.7.	Fundamento Bioquímico de la Obtención de Adhesivo de Colágeno a partir de Residuos Bovinos de Curtiembre.....	37
3.5.	Ensayos y Pruebas de Materiales.....	39
3.5.1.	Resistencia a la compresión .....	39
3.6.	Software y Métodos de Análisis.....	40
3.6.1.	Software .....	40
3.6.2.	Métodos de Evaluación y Diseño Experimental .....	42
3.7.	Impacto Ambiental y Normativas.....	45
3.7.1.	Normativas Técnicas y Ambientales.....	45
CAPÍTULO III .....		47
4.	METODOLOGÍA .....	47
4.1.	TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
4.1.1.	Tipo de investigación .....	47
4.1.2.	Nivel de investigación.....	47
4.2.	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS .....	49
4.2.1.	Materiales e Insumos.....	49
4.2.2.	Equipos.....	50
4.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	51
4.4.	MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	51
4.4.1.	Gestión y pretratamiento de residuos .....	51
4.4.2.	Síntesis del adhesivo a base de colágeno .....	52
4.4.3.	Diseño experimental y evaluación de propiedades .....	54
CAPÍTULO IV .....		56
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
5.1.	Diseño Experimental Implementado: .....	56
5.2.	Resultados de Propiedades Físicas y Mecánicas: .....	58
5.3.	Análisis Estadístico de la Resistencia a la Compresión .....	62
5.4.	Análisis para el Adoquín Pequeño.....	63
DISCUSIÓN.....		90

CONCLUSIONES .....	96
RECOMENDACIONES .....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101
ANEXOS.....	113



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Clasificación de Residuos Industriales</i> .....	16
<b>Tabla 2</b> <i>Composición de los residuos de curtiembre</i> .....	21
<b>Tabla 3</b> <i>Operacionalización de variables</i> .....	48
<b>Tabla 4</b> <i>Factores y niveles</i> .....	56
<b>Tabla 5</b> <i>Proporciones de las mezclas preparadas</i> .....	57
<b>Tabla 6</b> <i>Cantidad de los insumos en las mezclas preparadas</i> .....	58
<b>Tabla 7</b> <i>Datos del Blanco</i> .....	59
<b>Tabla 8</b> <i>Combinaciones del diseño experimental</i> .....	60
<b>Tabla 9</b> <i>Datos de resistencia</i> .....	62
<b>Tabla 10</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “ANOVA”</i> .....	64
<b>Tabla 11</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “ANOVA”</i> .....	65
<b>Tabla 12</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “Prueba Post Hoc”</i> ..	68
<b>Tabla 13</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “ANOVA”</i> .....	69
<b>Tabla 14</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “ANOVA”</i> .....	70
<b>Tabla 15</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “Prueba Post Hoc”</i> ..	73
<b>Tabla 16</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “ANOVA”</i> .....	74
<b>Tabla 17</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “ANOVA”</i> .....	75
<b>Tabla 18</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “Prueba Post Hoc”</i> ...	78
<b>Tabla 19</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “Prueba T-student”</i> ..	79
<b>Tabla 20</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “Prueba T-student”</i> ..	80
<b>Tabla 21</b> <i>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “Prueba T-student”</i> ...	81
<b>Tabla 22</b> <i>Comparación de Costos por Adoquín Pequeño (10 x 20 x 4 cm) en Arequipa (S/.) y análisis de composición.</i> .....	82
<b>Tabla 23</b> <i>Comparación Estimada del Balance de Energía por Adoquín Pequeño (10x20x4 cm)</i> .....	84
<b>Tabla 24</b> <i>Vinculación de los Resultados de la Investigación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)</i> .....	87
<b>Tabla 25</b> <i>Tabla Detallada de Resistencia a la Compresión por Combinación Experimental (kg/cm<sup>2</sup>)</i> .....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) del adoquín pequeño “Gráfica Descriptiva”.	66
<b>Figura 2</b> Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) del adoquín pequeño “Gráfica Q - Q”.	67
<b>Figura 3</b> Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) del adoquín mediano “Gráfica Descriptiva”.	71
<b>Figura 4</b> Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) del adoquín mediano “Gráfica Q - Q”.	72
<b>Figura 5</b> Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) del adoquín grande “Gráfica Descriptiva”.	76
<b>Figura 6</b> Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) del adoquín grande “Gráfica Q - Q”.	77
<b>Figura 7</b> Proceso de extracción de Colágeno	114
<b>Figura 8</b> Colágeno Extraído	114
<b>Figura 9</b> Proceso De Adoquines- Mezclado	114
<b>Figura 10</b> Vaciado de mezcla	115
<b>Figura 11</b> Pruebas en Laboratorio	115
<b>Figura 12</b> Pruebas en laboratorio	115
<b>Figura 13</b> Muestra de Adoquines	116
<b>Figura 14</b> Preparado de adoquines en moldes	116
<b>Figura 15</b> Llenado de mezcla en moldes	116
<b>Figura 16</b> Aireado de adoquines	117
<b>Figura 17</b> Desmolde de adoquines	117
<b>Figura 18</b> Aireado de adoquines en molde	117

## INTRODUCCIÓN

El mundo enfrenta un enorme desafío ambiental debido a la gran cantidad de residuos plásticos que generamos constantemente superando los 400 millones de toneladas cada año mientras muy poco de este material apenas un 9% logra ser reciclado y la mayor parte termina acumulándose en vertederos o contaminando nuestros ecosistemas un problema que se suma al fuerte impacto del sector de la construcción el cual contribuye notablemente a las emisiones de dióxido de carbono por el uso masivo de cemento situación que hace urgente buscar alternativas más amigables con el planeta. En esta búsqueda por soluciones más sostenibles la industria de la construcción ha comenzado a explorar el uso de materiales reciclados para fabricar elementos como los adoquines que usamos en calles y veredas ya que estudios previos sugieren que incorporar plásticos usados puede mejorar la resistencia de estos elementos y al mismo tiempo se investiga el uso de otros desechos como los restos orgánicos ricos en colágeno que deja la industria del cuero que podrían servir como un pegamento natural ayudando a unir los materiales sin usar productos sintéticos.

Considerando estos problemas y oportunidades este trabajo de investigación se propuso desarrollar una forma de reciclar conjuntamente dos tipos de residuos específicos que son los plásticos desechados por la industria farmacéutica como blísteres o envases de suero y los residuos orgánicos que provienen de las curtiembres transformando estos desechos en adoquines ecológicos aquí en Arequipa donde el plástico triturado serviría como componente principal y el colágeno extraído del residuo de curtiembre funcionaría como un adhesivo natural mezclado con arena común. La idea principal es no solo dar un nuevo uso a estos residuos que de otra forma contaminarían sino también crear un material de construcción útil que reduzca la necesidad de usar recursos nuevos y disminuya el impacto ambiental asociado a los adoquines tradicionales hechos con cemento.

Por ello llevamos a cabo un proceso que incluyó preparar cuidadosamente los plásticos y extraer el adhesivo de colágeno para luego fabricar diferentes tipos de adoquines variando las cantidades de plástico reciclado y el tamaño de las piezas siguiendo un plan experimental definido con el objetivo final de probar en laboratorio qué tan resistentes eran estos nuevos adoquines ecoamigables y si cumplían con las normas técnicas peruanas para así poder determinar si realmente son una opción viable y segura para usar en proyectos de infraestructura más sostenibles en nuestra región. Esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Promueve la innovación en la industria a través de un nuevo material de construcción hecho de residuos, contribuyendo a infraestructuras sostenibles (ODS 9). Mejora la sostenibilidad urbana al transformar residuos en adoquines, solucionando problemas de gestión de desechos y utilizando materiales ecológicos (ODS 11). Fomenta la economía circular al reutilizar desechos como recursos, promoviendo patrones de producción responsables (ODS 12). Finalmente, busca reducir la huella de carbono mediante adoquines ecoamigables, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (ODS 13).

## CAPÍTULO I

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Problemática de la investigación

La proliferación de residuos plásticos a escala planetaria representa actualmente uno de los desafíos ambientales más acuciantes característicos del siglo XXI, una circunstancia que se ve confirmada por la producción anual estimada que supera los 400 millones de toneladas de estos polímeros, de los cuales una proporción notablemente reducida, apenas el 9%, es reintegrada a ciclos productivos mediante el reciclaje, lo que conlleva a que la inmensa mayoría sea destinada a vertederos, se disperse en los ecosistemas acuáticos o sea eliminada a través de la incineración, procesos que intensifican de forma considerable la contaminación atmosférica y agravan las alteraciones climáticas globales (Gálvez et al., 2024). De manera concomitante, el sector de la edificación contribuye significativamente a la intensificación de la problemática climática mundial debido a las cuantiosas emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas al uso predominante de materiales tradicionales como el cemento, situación que ha impulsado la realización de numerosas iniciativas de investigación orientadas a examinar la viabilidad de incorporar detritus plásticos en compuestos para la construcción, concibiéndose esto como una estrategia prometedora tanto para reducir la dependencia de los aglomerantes cementicios como para aminorar la huella ecológica vinculada a los desechos de origen industrial (Cruz & Neciosup, 2022). En la búsqueda constante por disminuir sus repercusiones ambientales, la industria constructora ha explorado diligentemente metodologías alternativas, poniendo especial énfasis en la utilización de materiales recuperados para la manufactura de pavimentos y elementos adoquines, sobre todo porque investigaciones empíricas previas han establecido de manera convincente la capacidad que tiene el residuo plástico incorporado para potenciar atributos mecánicos críticos, incluyendo la

robustez estructural y la resistencia a la penetración del agua (Salazar, 2020); además, de forma paralela, se ha profundizado en el estudio de agentes aglutinantes sustitutivos, como los residuos derivados del procesamiento de pieles en curtiembres, los cuales exhiben un potencial considerable para promover la integridad cohesiva de los materiales sin necesidad de recurrir a polímeros sintéticos adicionales (Meza, 2018), aunque es imperativo reconocer que la materialización práctica de estas innovaciones a una escala significativa se enfrenta aún a obstáculos sustanciales relacionados con la escalabilidad productiva, la indispensable

## **1.2. Justificación**

### **1.2.1. Justificación ambiental**

La adopción estratégica de plásticos recuperados y residuos orgánicos provenientes de la industria del curtido para la manufactura de adoquines concebidos bajo principios ecológicamente racionales facilita la trascendental transmutación de lo que previamente constituían pasivos ambientales onerosos en recursos productivos valiosos, contribuyendo concurrentemente a la atenuación sustancial de la problemática global asociada a la ingente acumulación de desechos plásticos, estimada en cerca de 7000 millones de toneladas (Geyer et al., 2017), así como a la gestión más responsable de los aproximadamente 10 millones de toneladas anuales de subproductos con potencial tóxico inherentes al sector del procesamiento de pieles (ONUUDI, 2023); este enfoque integral coadyuva de manera significativa a la prevención de la liberación incontrolada de lixiviados con capacidad contaminante y a la consecuente salvaguarda de la integridad funcional de los ecosistemas naturales, al eludir la deposición y eventual degradación no regulada de dichos materiales en vertederos terrestres o su dispersión en sistemas hídricos vulnerables, y, de forma adicional, la sustitución deliberada de recursos vírgenes por estos insumos de origen reciclado induce una reducción estimada

en un 30% en la demanda extractiva de nuevas materias primas (Agencia Internacional de Energía, 2022), lo cual se refleja directamente en una menor presión sobre los reservorios naturales del planeta y en una disminución palpable de la impronta ecológica global imputable a las actividades constructivas, promoviendo decididamente de este modo la sostenibilidad ambiental a largo plazo mediante la efectiva integración de estrategias operativas específicamente diseñadas para contrarrestar activamente los procesos de degradación edáfica y la contaminación de los valiosos recursos hídricos.

### **1.2.2. Justificación Normativa y responsabilidad ambiental**

El presente proyecto demuestra una alineación congruente y robusta con los marcos regulatorios ambientales establecidos que activamente incentivan la valorización y el reciclaje de residuos generados por la actividad industrial, operando en plena consonancia con los principios fundamentales de la economía circular, cuyo objetivo último es la minimización del impacto ecológico derivado de los diversos sectores productivos (Ellen MacArthur Foundation, 2015), al tiempo que el proceso de fabricación propuesto para los adoquines ecoamigables se adhiere rigurosamente a estándares técnicos de reconocimiento internacional, tal como la norma ISO 14001 (ISO, 2015), la cual estipula los requisitos esenciales para la implementación y mantenimiento de sistemas de gestión ambiental eficientes y auditables, garantizando de esta forma niveles óptimos de calidad intrínseca y seguridad funcional en las infraestructuras urbanas donde estos elementos sean empleados; adicionalmente, el enfoque adoptado de responsabilidad ambiental se sustenta firmemente en un cuerpo creciente de evidencia académica que establece una correlación directa y positiva entre la utilización extensiva de materiales reciclados en la construcción y la consecución de objetivos clave como la mitigación efectiva de diversas formas de contaminación ambiental y la optimización sustancial en el aprovechamiento de los recursos materiales

y energéticos, factores ambos considerados cruciales e indispensables para la transición hacia un paradigma de construcción genuinamente sostenible y resiliente (Ghisellini et al., 2016).

### **1.2.3. Justificación social**

La implementación efectiva y escalada de la tecnología constructiva aquí propuesta actúa como un significativo catalizador socioeconómico, fomentando la creación de nuevas oportunidades de empleo digno dentro de sectores económicos en franca expansión, particularmente aquellos vinculados al reciclaje avanzado de materiales y a las prácticas de edificación sostenible, una dinámica de transformación laboral positiva cuya relevancia ha sido destacada por entidades como la Organización Internacional del Trabajo (ILO, 2018) en sus informes especializados sobre el potencial de los denominados empleos verdes; este impacto beneficioso en la esfera socioeconómica se manifiesta de manera tangible y observable en aquellas comunidades locales donde la gestión innovadora y eficiente de los flujos de residuos se ha logrado convertir no solo en una fuente sostenible de generación de ingresos para sus habitantes, sino también en un poderoso mecanismo para el fortalecimiento de la cohesión social y el empoderamiento colectivo a nivel local (Medina, 2010), constatándose paralelamente que la apreciable reducción de los niveles de contaminación ambiental, resultante directa del aprovechamiento productivo de desechos industriales que anteriormente representaban un problema de disposición, redundaba inequívocamente en una mejora sustantiva y perceptible de la calidad de vida general en los entornos urbanos intervenidos, una transición positiva que además se ve potenciada y respaldada por la articulación e implementación de políticas públicas de capacitación y sensibilización específicamente diseñadas para estimular y facilitar una participación ciudadana más

activa e informada en diversas iniciativas de índole ambiental (Sáez-de-Guinoa Vilaplana et al., 2021).

#### **1.2.4. Justificación tecnológica**

El desarrollo intrínseco y la optimización continua de los adoquines ecoamigables objeto de este proyecto implican de manera inherente la refinación meticulosa de los procesos de reciclaje aplicados a los materiales de partida y la integración inteligente y sinérgica de tecnologías consideradas de vanguardia en el campo de los materiales de construcción, lo cual incluye aspectos críticos como la síntesis controlada y eficiente de adhesivos aglomerantes de base ecológica con bajo impacto ambiental y la aplicación rigurosa de procedimientos de pretratamiento físico-químico especialmente diseñados para acondicionar adecuadamente ciertos tipos de plásticos complejos, como aquellos de origen farmacéutico post-consumo (Debele et al., 2023); la aplicación concertada y precisa de estas técnicas avanzadas de procesamiento y formulación asegura la obtención final y consistente de materiales compuestos cuyas propiedades mecánicas fundamentales, tales como resistencia a la compresión y flexión, así como su durabilidad proyectada frente a agentes ambientales y cargas de servicio, resulten no solo equiparables sino potencialmente superiores a las características exhibidas por los adoquines fabricados mediante tecnologías y materias primas convencionales, siendo este un aspecto absolutamente crucial para garantizar la factibilidad técnica y la aceptación en el mercado de su implementación en aplicaciones constructivas reales y exigentes; complementariamente, el componente de investigación asociado a esta iniciativa impulsa decididamente la utilización sistemática y metodológicamente robusta de enfoques experimentales avanzados y diseños factoriales estadísticamente potentes, empleados con el propósito específico de identificar y validar las proporciones de mezcla óptimas entre los diversos componentes reciclados que integran el adoquín,

asegurando de esta forma tanto la homogeneidad microestructural como la resistencia mecánica requerida y uniforme en el producto manufacturado final, configurando así un enfoque tecnológico integral que no solamente contribuye a fortalecer la posición competitiva del sector productivo relacionado, sino que también posiciona de manera distintiva y ejemplar al proyecto como un referente tangible de innovación aplicada dentro del dinámico y evolutivo ámbito de la construcción sostenible.

### **1.2.5. Justificación económica**

La estrategia de valorización de residuos industriales, específicamente plásticos y subproductos de curtiembre, mediante su transformación e incorporación en la fabricación seriada de adoquines para uso en pavimentación, se perfila claramente como una alternativa productiva dotada de una considerable y atractiva viabilidad económica intrínseca, dado que su adopción contribuye de manera directa y cuantificable a la significativa disminución de los costos operativos normalmente asociados tanto a la extracción y transporte de materias primas vírgenes como a las frecuentemente onerosas labores de remediación ambiental que se derivan de una gestión inadecuada o inexistente de los flujos de desechos industriales; esta aproximación estratégica fomenta inherentemente una utilización mucho más racional, eficiente y circular de los recursos materiales disponibles dentro del sistema económico, lo cual, según proyecciones y análisis sectoriales, se materializa en beneficios económicos tangibles y acumulativos que se proyectan tanto a mediano como a largo plazo para los actores involucrados (Agencia Internacional de Energía, 2022), y, de manera convergente, la implementación sistemática y generalizada de procesos optimizados de reciclaje y reutilización de materiales dentro de la extensa cadena de valor del sector de la construcción favorece de forma decisiva la consolidación progresiva de un modelo operativo fundamentado en los principios de la economía circular, el cual intrínsecamente optimiza el consumo

global de energía y coadyuva a reducir de manera apreciable la huella de carbono agregada del sector, presentándose en este contexto específico el estudio como una propuesta integral que logra conjugar de manera efectiva la rentabilidad económica con la imperativa sostenibilidad ambiental, demostrando ser capaz de generar ahorros operativos significativos para los usuarios finales al tiempo que actúa como un poderoso incentivo para la inversión en el desarrollo, adaptación y adopción generalizada de tecnologías ambientalmente más benignas y eficientes.

### **1.3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar un proceso de reciclaje de plásticos farmacéuticos y residuos de curtiembres para la fabricación de adoquines ecoamigables, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y la reducción de residuos en el sector constructivo.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Implementar un pretratamiento eficiente de los plásticos farmacéuticos mediante trituración controlada, asegurando su homogeneidad y compatibilidad con la mezcla de fabricación.
2. Formular un adhesivo a partir de residuos de curtiembre, mejorando la cohesión, estabilidad y resistencia mecánica de los adoquines reciclados.
3. Evaluar la influencia de distintas proporciones de materiales reciclados en la composición de los adoquines, cumpliendo con los estándares establecidos en las normas técnicas peruanas (NTP).
4. Aplicar un diseño experimental factorial para analizar y optimizar las propiedades físico-mecánicas de los adoquines, asegurando su desempeño estructural y durabilidad en aplicaciones constructivas.

5. Validar la resistencia y desempeño de los adoquines fabricados a través de pruebas de laboratorio, garantizando su aplicabilidad en proyectos de infraestructura sostenible.

## 2. HIPÓTESIS

Dado que la contaminación por residuos plásticos y subproductos tóxicos de la industria de curtiembres, representa un problema ambiental significativo en Arequipa, evidenciado por la generación de 150 toneladas/día de plásticos y grandes volúmenes de residuos ricos en colágeno desechados sin tratamiento adecuado, es probable que el desarrollo de un proceso de reciclaje que combine plásticos farmacéuticos con residuos de curtiembre permita fabricar adoquines ecoamigables con propiedades mecánicas y de durabilidad comparables o superiores a los adoquines convencionales, además de reducir significativamente la contaminación ambiental y contribuir a la sostenibilidad en el sector constructivo mediante el impulso de la economía circular.

## CAPÍTULO II

### 3. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La intensificada inquietud respecto a las repercusiones ambientales asociadas a los materiales de construcción convencionales ha estimulado notablemente la búsqueda y el desarrollo de opciones más respetuosas con el entorno, diseñadas específicamente para aminorar la carga ecológica general que implican los proyectos de infraestructura urbana; dentro de este contexto evolutivo, los elementos de pavimentación elaborados a partir de materiales recuperados o reciclados se han perfilado como una respuesta particularmente ingeniosa y sostenible, cuya factibilidad técnica ha sido respaldada por diversas investigaciones que demuestran la posibilidad de integrar eficazmente desechos plásticos, derivados de la actividad minera y otros insumos alternativos en su composición, persiguiendo el doble propósito de optimizar las características de resistencia y comportamiento mecánico de estos elementos y, simultáneamente, reducir la dependencia de la extracción de recursos naturales vírgenes.

##### **Antecedentes Internacionales**

Respondiendo a la necesidad de disminuir el impacto ambiental inherente a la industria de la construcción, una variedad de investigaciones a nivel internacional ha indagado sobre las posibilidades que ofrecen los materiales reciclados en la elaboración de adoquines, tal como lo ilustra un estudio de Dantas (2024) titulado Carbon reduction and planning of active travel projects, el cual puso de manifiesto que la utilización de materiales recuperados en la confección de adoquines permeables aporta de manera importante a la reducción de las emisiones de carbono, analizando en dicho trabajo diferentes mezclas de agregados reciclados y su consecuente influencia en la resistencia mecánica y la vida útil del producto final; por otro lado, Ojeda et al. (2024), en su

investigación Recycling PET straps in paving blocks: experimental testing and life cycle assessment, probaron exitosamente que el reemplazo de hasta un 5% de los agregados naturales por plástico PET reciclado en la composición de adoquines no solamente preserva las características estructurales esenciales de estos elementos, sino que también atenúa su impacto ambiental asociado; asimismo, Almeida y Fernández-Jiménez (2025), en su trabajo denominado Greener Concrete Paving Blocks with Hybrid Alkaline Cements and Recycled Aggregates, investigaron la aplicación de cementos con una proporción reducida de clínker junto con agregados reciclados, logrando como resultado adoquines que presentan un menor impacto ecológico general sin que ello signifique un detrimento de su capacidad de resistencia mecánica.

Ampliando este panorama, otro estudio pertinente corresponde al de Soliman et al. (2025), titulado Green building development utilising modified fired clay bricks and eggshell waste, donde se examinó la adición de residuos de cáscara de huevo en la producción de adoquines ecológicos, evidenciando mejoras en la resistencia del material y una disminución en el consumo de recursos naturales vírgenes; de manera complementaria, El Seidy (2024), en su publicación Exploring the viability of various waste materials as aggregates in low-carbon two-part alkali-activated cementitious composites, indagó sobre la integración de diversos residuos industriales en la matriz de adoquines mediante el uso de cementos de activación alcalina de bajo carbono, obteniendo como resultado un producto final caracterizado por menores emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas y una durabilidad incrementada; por su parte, Adhikari et al. (2025), a través de su investigación comparativa Eco-Friendly Paver Block: Comparative Study by Composition Review, contrastaron diferentes formulaciones de adoquines ecológicos y concluyeron que la inclusión de polímeros reciclados potencia de forma notable la capacidad de absorción de impactos del material; finalmente, Masduqi et al.

(2024), en su estudio Integrasi Botol Kaca Hancur Sebagai Agregat Dalam Pembuatan Paving Blok Ramah Lingkungan, analizaron la factibilidad de reemplazar los agregados tradicionales por vidrio triturado reciclado en la elaboración de adoquines, logrando constatar una mejora significativa en la resistencia a la compresión del producto resultante.

### **Antecedentes Nacionales**

Dentro del panorama investigativo peruano, se han desarrollado diversas iniciativas centradas en la creación de elementos de pavimentación ecoamigables como una estrategia para confrontar los persistentes desafíos ambientales que caracterizan al sector de la construcción, un esfuerzo ilustrado por el estudio de Polo (2024) en su trabajo Evaluación del plástico de polipropileno reciclado en adoquines de concreto tipo I, investigación que logró establecer cómo la incorporación de plásticos recuperados dentro de la mezcla de concreto para adoquines efectivamente potencia la resistencia mecánica del producto final sin llegar a comprometer su durabilidad o vida útil proyectada; de manera análoga, el trabajo de Marín Forero (2024), presentado en su Análisis de ciclo de vida comparativo como fundamento para la producción de un adoquín fabricado con agregados reciclados de RCD en Bogotá, aportó conclusiones significativas al determinar, mediante una evaluación comparativa del ciclo de vida, que la utilización de residuos derivados de actividades de construcción y demolición (RCD) en la manufactura de adoquines representa una opción factible no solo desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental sino también en términos de viabilidad económica; complementando estos hallazgos, la investigación de Armando (2024) titulada Efecto del polietileno de alta densidad para la mejora de resistencia en adoquines de concreto tipo I se enfocó en examinar las repercusiones específicas de añadir polietileno de alta densidad reciclado sobre las propiedades de resistencia de los

adoquines de concreto tipo I, consiguiendo demostrar mejoras sustanciales en la durabilidad de dichos elementos; adicionalmente, la investigación conducida por Vasquez Bustamante (2024), bajo el título Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas para adoquines de concreto de tránsito peatonal adicionando celulosa obtenida de cartón reciclado, evidenció de forma concluyente que la adición estratégica de celulosa recuperada a partir de cartón reciclado actúa positivamente para incrementar la resistencia a la compresión de los adoquines específicamente diseñados para soportar tránsito peatonal; y, finalmente, robusteciendo este cuerpo de conocimiento nacional, Correa et al. (2024), a través de su publicación Diseño de mezclas y elaboración de prototipos de bloques, adoquines de concreto con la utilización de materiales de residuos de construcción y demolición (RCD), no solo propusieron sino que también validaron experimentalmente un modelo de fabricación concreto para adoquines que integra eficazmente materiales procedentes de residuos de construcción y demolición, logrando a través de esta metodología una disminución cuantificable y verificable del impacto ambiental global asociado a la producción de estos componentes constructivos esenciales.

## 3.2. MARCO TEÓRICO

### 3.2.1. Gestión y Tratamiento de Residuos

#### 3.2.1.1. Residuo industrial

Un residuo industrial puede entenderse como aquel conjunto de subproductos generados fuera del sitio original durante procesos productivos o actividades industriales complejas que carecen de valorización directa, presentando una diversidad de propiedades fisicoquímicas y estados físicos (sólido, líquido o gaseoso), características variables que determinan fundamentalmente su clasificación según criterios de peligrosidad y exigen protocolos de manejo específicos; debido a que estos residuos a menudo poseen el potencial de generar efectos adversos como la bioacumulación en organismos, toxicidad para los ecosistemas o capacidad de inducir mutaciones genéticas, su gestión demanda la aplicación de enfoques especializados de manejo de residuos que incluyen tecnologías de contención primaria y secundaria, logísticas de retorno y recolección adaptadas, así como tratamientos aplicados en el lugar de generación o en instalaciones externas, todo ello siempre en conformidad con los principios rectores de la jerarquía en la gestión de residuos (que prioriza la prevención, seguida de la minimización y la valorización). La administración integral de estos materiales se aborda también mediante sistemas formalizados de gestión ambiental, como el estándar ISO 14001, los cuales se apoyan en normativas de cumplimiento legal obligatorio (a modo de ejemplo, la Directiva 2008/98/CE), mismas que establecen la aplicación de metodologías estandarizadas tales como la caracterización analítica detallada (por ejemplo, usando espectrometría de masas), la aplicación de tratamientos termoquímicos (como la pirólisis o gasificación), el uso de técnicas de bioremediación que emplean consorcios microbianos específicos, y el confinamiento seguro en depósitos de seguridad cuya estabilidad geotécnica ha sido verificada, siendo indispensable la realización de auditorías periódicas para confirmar la eficacia continua de todos estos procedimientos; el objetivo final de este

complejo entramado de gestión es la mitigación de los impactos externos negativos a través de la internalización de los costos ambientales asociados y la adopción generalizada de modelos de ecoeficiencia, un propósito cuya consecución efectiva, según Soliman y Moustafa (2020), depende crucialmente de la existencia de una completa trazabilidad documental a lo largo de todo el proceso y de una colaboración efectiva entre los distintos actores especializados que participan en la cadena de valor. Para una mejor comprensión de su procedencia, los residuos industriales pueden clasificarse según su origen y peligrosidad, como se detalla en la Tabla N° 1.

**Tabla 1**

*Clasificación de Residuos Industriales*

<b>Categoría</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Descripción</b>
<b>Según su origen</b>	Residuos de procesos industriales	Generados directamente durante las operaciones de producción, como recortes de metal, polvo de soldadura, etc.
	Residuos de mantenimiento	Producidos durante las actividades de mantenimiento de equipos, como aceites usados, filtros y piezas defectuosas.
	Residuos de limpieza	Resultantes de la limpieza de instalaciones y equipos, incluyendo disolventes y detergentes.
<b>Según su peligrosidad</b>	Residuos peligrosos	Aquellos con características perjudiciales para la salud humana o el medio ambiente, como toxicidad e inflamabilidad.

*Nota. Elaboración propia*

### **3.2.2. Plásticos farmacéuticos**

Según señalan Mawla et al. (2018), los plásticos de aplicación farmacéutica se caracterizan funcionalmente por ser polímeros de naturaleza sintética o semisintética, los cuales son seleccionados y empleados de manera específica en la fabricación de envases primarios destinados al contacto directo con medicamentos, así como en la producción de dispositivos

diseñados para la liberación controlada de fármacos y diversos componentes auxiliares. Sobre estos materiales recae la responsabilidad fundamental de asegurar la preservación de la estabilidad tanto química como microbiológica de los principios activos contenidos en su interior; dado que estos plásticos entran en contacto íntimo y prolongado con formulaciones farmacológicas complejas, que a menudo incluyen no solo el fármaco sino también excipientes variados y sustancias de origen biotecnológico, se encuentran por consiguiente sujetos al cumplimiento riguroso de normativas estandarizadas relativas a seguridad y calidad (tales como las especificadas en farmacopeas como la USP o estándares internacionales como ISO 10993). Estas regulaciones tienen como propósito esencial prevenir de manera efectiva la aparición de fenómenos indeseables como la migración de monómeros residuales desde el material hacia el producto, la adsorción perjudicial del fármaco sobre las superficies plásticas, o el desarrollo de cualquier otra interacción de índole fisicoquímica que pudiera resultar adversa para la integridad del medicamento o la seguridad del paciente.

### **Composición**

De acuerdo con Mawla et al. (2018), la composición específica de estos plásticos farmacéuticos se encuentra directamente determinada por la aplicación particular a la que están destinados dentro de la cadena de suministro del sector farmacéutico. Esta composición incorpora típicamente polímeros de base termoestable o termoplástica que exhiben alto rendimiento, junto con aditivos cuidadosamente seleccionados para conferir funcionalidades concretas (tales como estabilizantes frente a la radiación UV o plastificantes formulados para no migrar) y, en determinadas circunstancias, colorantes que cuentan con certificación para uso médico. Entre los polímeros más habitualmente empleados en estas aplicaciones se incluyen el Polietileno (PE) junto con sus variantes de alta y baja densidad (HDPE, LDPE), valorados por sus eficaces propiedades de barrera contra la penetración de humedad; el Polipropileno (PP), apreciado por su considerable resistencia térmica que lo hace compatible con procesos de esterilización como

el tratamiento en autoclave o la irradiación gamma; los Poliésteres como el PET y el PEN, frecuentemente utilizados en la fabricación de envases rígidos debido a su combinación de transparencia y baja permeabilidad a los gases; así como los Poliésteres fluorados tipo PCTFE y las poliamidas como la PA 6 y PA 66, siendo estos últimos a menudo seleccionados para la elaboración de dispositivos implantables en virtud de su indispensable biocompatibilidad con los tejidos biológicos.

**Tipos:**

a) **Polietileno (PE):** Un polímero termoplástico comúnmente clasificado en variantes como la de alta densidad (HDPE) y la de baja densidad (LDPE), se distingue por su notable rentabilidad económica y su significativa adaptabilidad a una diversidad de procesos de transformación industrial, tales como la extrusión y el moldeo por inyección, características que, al combinarse con su intrínseca baja permeabilidad a la humedad y su considerable resistencia química frente a electrolitos y solventes de naturaleza polar, lo convierten en un material especialmente idóneo para una amplia gama de aplicaciones en envases primarios farmacéuticos, incluyendo blísteres y frascos, así como para la fabricación de bolsas destinadas a la infusión intravenosa, siempre y cuando se asegure su conformidad con los estándares específicos detallados en la normativa USP relativos a los límites permitidos para la migración de oligómeros. (Mawla et al., 2018).

b) **Polipropileno (PP):** Es un material seleccionado para la manufactura de componentes críticos como jeringas de alta precisión, tapones diseñados para asegurar un cierre hermético y viales destinados a contener preparaciones parenterales, en virtud de ofrecer una combinación particularmente ventajosa de estabilidad dimensional conservada incluso durante la esterilización por autoclave a temperaturas que alcanzan los 121°C y una robusta resistencia frente a la acción de agentes oxidantes; estas características intrínsecas,

complementadas por su notablemente baja permeabilidad al oxígeno (inferior a  $0.5 \text{ cm}^3/\text{m}^2/\text{día}$ ), lo convierten en un elemento indispensable para el acondicionamiento seguro de formulaciones farmacéuticas especialmente susceptibles a la degradación por oxidación, como es el caso de péptidos con actividad terapéutica o vacunas que se presentan en forma liofilizada. (Mawla et al., 2018).

c) **Polietileno Tereftalato (PET):** El Polietileno Tereftalato (PET), un poliéster de estructura lineal que, particularmente en su forma cristalina conocida como CPET, demuestra una considerable resistencia a la tracción que excede los 70 MPa junto con un bajo índice de transmisión de vapor de agua (WVTR) inferior a  $1 \text{ g}/\text{m}^2/\text{día}$ , justifica en base a estos atributos técnicos su utilización extendida y predominante en la fabricación de frascos destinados a contener soluciones oftálmicas y colirios, así como en envases diseñados para comprimidos efervescentes, si bien su aplicación puede requerir la implementación de recubrimientos superficiales a base de sílice como medida para minimizar la potencial adsorción de principios activos que presenten afinidad por el agua (hidrofílicos). (Mawla et al., 2018).

d) **Polivinilcloruro (PVC):** El Polivinilcloruro (PVC), si bien exhibe una notable versatilidad en cuanto a sus métodos de procesamiento industrial (incluyendo termoformado y calandrado) que lo harían técnicamente adecuado para la producción de bolsas destinadas a contener hemoderivados o para la conformación de blísteres mediante termosellado, se enfrenta simultáneamente a significativas restricciones de índole regulatoria, originadas principalmente por la presencia en su composición de plastificantes pertenecientes a la familia de los ftalatos (siendo el DEHP un ejemplo representativo), los cuales poseen la capacidad demostrada de migrar hacia formulaciones de base lipídica; consecuentemente, su empleo en aplicaciones farmacéuticas resulta viable únicamente para usos de corta duración y está estrictamente condicionado a la certificación de que los niveles de

sustancias extraíbles o lixiviados se mantienen por debajo del umbral máximo del 0.1% establecido por organismos reguladores como la Agencia Europea de Medicamentos (EMA). (Mawla et al., 2018).

e) **Poliamidas (PA):** Las Poliamidas (PA), que constituyen una familia de polímeros de ingeniería de altas prestaciones incluyendo grados como PA 6, PA 66 y PA 12, son frecuentemente seleccionadas para el desarrollo de sistemas de liberación modificada de fármacos, tales como implantes subdérmicos o microesferas, gracias a su elevada temperatura de deflexión bajo carga que supera los 150°C y a su reducida tendencia a absorber humedad (higroscopicidad generalmente inferior al 3% en condiciones de humedad relativa estándar); la funcionalidad de estos avanzados sistemas de administración de medicamentos a menudo requiere la utilización de matrices poliméricas específicamente diseñadas, como podría ser un copolímero de PA 6/66, las cuales son cruciales para garantizar la obtención de perfiles de disolución farmacocinética que resulten predecibles y consistentes bajo las condiciones fisiológicas presentes en el organismo (Mawla et al., 2018).

### 3.2.3. Residuos de curtiembre

De acuerdo con Verma y Sharma (2022), los residuos generados por la industria de la curtiembre derivan fundamentalmente de las etapas consecutivas que conforman el procesamiento de cueros y pieles de origen animal, abarcando operaciones unitarias específicas tales como el descarne o deslamado para la eliminación del tejido subcutáneo, el proceso de curado que emplea sales halógenas como cloruro de sodio (NaCl) o sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), la etapa de recurtido donde se utilizan agentes de reticulación como sales de cromo trivalente o taninos sintéticos, y finalmente las operaciones de acabado superficial que incluyen el pulido y la pigmentación. Estos procesos intrínsecamente involucran el uso de reactivos químicos que presentan una elevada carga contaminante, contándose entre ellos sulfuros, sales de amonio y

diversos compuestos basados en cromo, lo cual resulta en la generación tanto de efluentes líquidos con una alta Demanda Química de Oxígeno (DQO), frecuentemente superior a 5000 mg/L, como de una variedad de subproductos sólidos que incluyen recortes de piel no aprovechables, lodos procedentes de los sistemas de depuración de aguas residuales y virutas de cromo, materiales todos que, debido a su composición y potencial impacto, requieren indispensablemente la aplicación de estrategias de manejo diferenciadas y especializadas conforme a su clasificación de peligrosidad. La composición de estos subproductos es compleja y varía según la etapa del proceso de curtido del que provienen, generando residuos en estado sólido, líquido y gaseoso. La Tabla N° 2 resume las características y origen de estos residuos.

**Tabla 2**

*Composición de los residuos de curtiembre*

<b>Tipo de Residuo</b>	<b>Origen</b>	<b>Composición</b>
<b>Residuos Sólidos</b>	Generados durante las etapas de deslamado, curado, recurtido y acabado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pieles no procesadas y recortes.</li> <li>- Restos de sales (sal común, cloruro de sodio) y ácidos (ácido fórmico, ácido sulfúrico).</li> <li>- Restos de productos de acabado como ceras y aceites.</li> </ul>
<b>Residuos Líquidos</b>	Generados por el lavado y tratamiento de las pieles durante varias etapas.	- Aguas residuales con compuestos químicos: sales, ácidos, y metales pesados como el cromo (cuando se usa el proceso de curado con cromo).
<b>Gases y Vapores</b>	Liberados durante el proceso de secado y curado.	- Gases volátiles: amoníaco, azufre y otros productos químicos derivados de los compuestos utilizados en el tratamiento de las pieles.

*Nota. Elaboración propia*

Los residuos de curtiembre, especialmente los que contienen cromo y otros metales pesados, presentan riesgos significativos para el medio ambiente y la salud humana. La disposición

inadecuada de estos residuos puede contaminar suelos, cuerpos de agua y afectar la biodiversidad. Por esta razón, su manejo y tratamiento adecuado son cruciales para mitigar dichos impactos.

### 3.2.4. Economía circular

Velenturf y Purnell (2021) conceptualizan la economía circular como un sistema de gestión de recursos que opera en ciclo cerrado, cuyo propósito fundamental es maximizar la utilidad sostenida de los materiales y productos a lo largo del tiempo mediante la implementación deliberada de estrategias inspiradas en el metabolismo industrial, tales como la reutilización estructurada y planificada, el reciclaje efectuado en circuito cerrado (abarcando tanto procesos de supra-reciclaje o upcycling como de infra-reciclaje o downcycling), y la facilitación de la reparación de bienes gracias a un ecodiseño de carácter modular. Este enfoque permite una reducción significativa de la entropía de los recursos gestionados dentro de la cadena de valor. Dicho modelo operativo, que se posiciona en contraposición directa al paradigma lineal predominante de "extraer-fabricar-desechar" (conocido como take-make-waste), funciona de acuerdo con principios clave como la búsqueda de la simbiosis industrial entre diferentes entidades y la promoción activa de la regeneración sistémica de los capitales naturales. Sin embargo, su implementación exitosa y a escala está condicionada de manera crucial por la integración efectiva tanto de tecnologías habilitadoras avanzadas (como el Internet de las Cosas aplicado a la trazabilidad de materiales o la biomimética incorporada en el diseño de procesos) como de marcos normativos propicios que fomenten una economía basada en el rendimiento y la funcionalidad (performance economy).

#### Principios de la Economía Circular

1. **Reducción:** Este principio se fundamenta en la minimización sistémica de inputs primarios y outputs residuales a lo largo del ciclo de vida del producto, el cual abarca desde la fase de

ecodiseño (optimización topológica, selección de materiales de baja huella) hasta su disposición final. (Velenturf & Purnell, 2021)

2. **Reutilización:** En este eje, se prioriza la extensión del ciclo de vida útil mediante la reutilización de componentes, los cuales pueden ser reintegrados en nuevos sistemas productivos sin requerir reprocesamiento energéticamente intensiva. Esto incluye prácticas tales como la remanufactura de módulos electrónicos, el refurbishment de bienes duraderos (maquinaria industrial, dispositivos médicos), y la implementación de plataformas de logística inversa, las cuales validan la calidad técnica de piezas bajo estándares ISO 14009. (Velenturf & Purnell, 2021)
3. **Reciclaje:** Los materiales no aptos para reutilización directa son sometidos a procesos de reciclaje de circuito cerrado, los cuales incluyen la separación automatizada de flujos técnicos (polímeros por código SPI, aleaciones metálicas por espectrometría XRF) y su transformación en materias primas secundarias. (Velenturf & Purnell, 2021)
4. **Recuperación:** Este principio se refiere a la recuperación de materiales o energía de productos al final de su vida útil. En algunos casos, los productos pueden ser desmantelados y sus materiales recuperados, o la energía contenida en ellos puede aprovecharse en procesos como la incineración para generación de electricidad. (Velenturf & Purnell, 2021)
5. **Rediseño y Ecoinnovación:** Enfoque proactivo el cual integra criterios de circularidad en la fase conceptual del producto, mediante metodologías tales como el diseño para el desensamblado (DfD), la selección de monomateriales y la incorporación de biomateriales compostables (PHA, PLA). (Velenturf & Purnell, 2021)

### **Teoría del Triple Resultado y Economía Doughnut**

La sostenibilidad en la construcción trasciende la mera reducción de emisiones; se fundamenta en modelos integradores como el Triple Resultado de Elkington (1998), que articula equilibrios entre rentabilidad económica, equidad social y regeneración ambiental. Este enfoque se amplía

con la Economía Doughnut de Raworth (2017), que establece límites planetarios (como el calentamiento global  $\leq 1.5^{\circ}\text{C}$ ) y umbrales sociales (acceso a vivienda digna, empleo verde). En este contexto, la construcción ecológica debe operar en el "espacio seguro" entre ambos límites. Como afirma Raworth (2017), "[l]os materiales reciclados en infraestructura no solo reducen la extracción de recursos, sino que generan empleo en economías locales, cumpliendo con el pilar social de la sostenibilidad" (p. 89). En proyectos como las Ciudades Esponja en China, Yu (2021) demuestra el rol de materiales permeables (adoquines ecoamigables) en la gestión hídrica urbana, permitiendo una infiltración de 30 litros/m<sup>2</sup>/hora y reduciendo inundaciones en un 45%. Estos avances son urgentes, considerando que, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2020), el sector construcción consume el 40% de los recursos naturales globales y emite 11.9 Gt de CO<sub>2</sub> anuales, el 37% del total mundial.

### 3.2.5. Valorización de residuo

Meghana y Shastri (2020) definen la valorización de residuos como el proceso mediante el cual los flujos residuales son sometidos a transformaciones fisicoquímicas o biotecnológicas, permitiendo su reconversión en recursos valorizables tales como materias primas secundarias, subproductos industriales o vectores energéticos. Este enfoque, que opera bajo principios de simbiosis industrial y metabolismo circular, es estratégico para modelos de economía de rendimiento (*performance economy*), ya que posibilita la reintegración de materiales en ciclos técnicos (polímeros, metales) o biológicos (nutrientes, biomasa), lo cual reduce la dependencia de recursos vírgenes y mitiga externalidades ambientales asociadas a la disposición en vertederos o incineración no controlada.

## Métodos de Valorización de Residuos

Velenturf y Purnell (2021) describen varios métodos clave para la valorización de residuos, los cuales se pueden agrupar en dos enfoques principales: la valorización material y la valorización energética.

### 3.2.5.1. Valorización Material

- **Reciclaje mecánico:** Consiste en la recolección y el procesamiento físico de los residuos para convertirlos en nuevos productos. En este caso, los plásticos farmacéuticos o los residuos de curtiembres podrían ser triturados, clasificados y fundidos para producir nuevos materiales como adoquines o componentes para la industria.
- **Reciclaje químico:** Proceso que implica la descomposición molecular controlada de materiales mediante reacciones tales como despolimerización catalítica, hidrogenólisis o pirólisis en lecho fluido, lo cual permite regenerar monómeros de alta pureza (>99%) o intermediarios petroquímicos (naftas ligeras). Este enfoque, el cual se aplica a plásticos de ingeniería de difícil procesamiento mecánico (policarbonatos, resinas epoxi), es crítico para residuos farmacéuticos multicapa (blísteres Al-PET) o cueros con reticulantes persistentes (taninos condensados), ya que posibilita la recuperación selectiva de cadenas poliméricas mediante solvólisis en medios ácidos ( $H_2SO_4$  concentrado) o enzimas lignocelulolíticas. Estos procesos, regulados bajo normas tales como ASTM D8331, requieren análisis de ciclo de vida (ACV) siempre y cuando se busque optimizar el balance energético neto.
- **Reutilización directa:** Estrategia que prioriza la reinserción de residuos en ciclos productivos sin transformación termomecánica o química, lo cual exige diseños modulares y protocolos de inspección no destructiva (ultrasonido, termografía).

### 3.2.5.2. Valorización Energética

- **Incineración con recuperación de energía (WtE):** Proceso que consiste en la oxidación controlada de residuos no valorizables (fracción rechazo) en hornos de parrilla móvil o lecho fluidizado, lo cual genera calor residual ( $>850^{\circ}\text{C}$ ) el cual es recuperado mediante ciclos Rankine para producir energía eléctrica (eficiencia  $\sim 25\%$ ) o vapor sobrecalentado para redes de calefacción urbana. Aunque este método puede generar emisiones gaseosas ( $\text{NO}_x$ , dioxinas), estas son mitigadas mediante sistemas de depuración multicapa tales como filtros de mangas con inyección de carbón activado, SCR (Selective Catalytic Reduction) y lavadores húmedos, siempre y cuando se opere bajo estándares de la Directiva UE 2010/75 sobre emisiones industriales. Este enfoque es útil para residuos de alto poder calorífico ( $\text{PCI} > 12 \text{ MJ/kg}$ ) tales como plásticos mezclados o textiles contaminados, los cuales carecen de viabilidad para reciclaje mecánico o químico.
- **Gasificación y pirólisis:** Procesos termoquímicos mediante los cuales los residuos son descompuestos en atmósferas deficitarias de  $\text{O}_2$  (gasificación:  $\text{O}_2 < 30\%$  estequiométrico; pirólisis: anóxica), lo cual produce syngas ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) en el primer caso, y bio-oil + char en el segundo. Estas tecnologías, las cuales operan en reactores de lecho fluidizado o de plasma térmico ( $T > 1200^{\circ}\text{C}$ ), permiten la obtención de vectores energéticos tales como metanol sintético o combustibles líquidos (vía Fischer-Tropsch), siempre y cuando se pretraten los residuos para reducir contenido de humedad ( $< 15\%$ ) y metales pesados. A diferencia de la incineración, estos procesos minimizan la formación de dioxinas debido a las condiciones reductoras, lo cual los hace idóneos para residuos biomédicos o electrónicos con halógenos.
- **Digestión anaeróbica:** Proceso bioquímico utilizado para la valorización de residuos orgánicos biodegradables (FORSU, lodos de EDAR, estiércol), el cual implica la

hidrólisis enzimática de carbohidratos, proteínas y lípidos por consorcios microbianos (acidógenos, metanógenos), lo cual genera biogás (55-70% CH<sub>4</sub>, 30-45% CO<sub>2</sub>) y digestato estabilizado. Este biogás, el cual puede ser upgradado a biometano (>95% CH<sub>4</sub>) mediante técnicas tales como scrubbing con aminas o separación por membranas, se emplea en motores de cogeneración o como combustible vehicular (NGV). La eficiencia del proceso depende de parámetros tales como relación C:N (25-30), carga orgánica (COD <50 g/L), y tiempo de retención hidráulica (TRH >20 días), siempre y cuando se evite la inhibición por amonio (>2000 mg/L) o sulfuros (>500 mg/L).

### **3.3. Construcción Sostenible**

#### **3.3.1. Adoquines convencionales**

Los adoquines convencionales, los cuales constituyen un elemento fundamental en la infraestructura urbana, se fabrican predominantemente a partir de concreto, material cuya producción se encuentra intrínsecamente vinculada a procesos que demandan elevadas temperaturas y un consumo masivo de cemento, es decir, prácticas industriales las cuales generan emisiones considerables de dióxido de carbono, teniendo en cuenta que la huella ecológica de este ciclo productivo resulta particularmente crítica en contextos de escalabilidad. Tal como lo subraya el Instituto Nacional de Calidad (INACAL, 2017), desde una perspectiva ingenieril, dichos materiales exhiben características técnicas notables, entre las cuales destacan una densidad elevada y una resistencia a la compresión sobresaliente, propiedades que, siempre y cuando se respeten los protocolos de fabricación, garantizan la capacidad de soportar cargas tanto peatonales como vehiculares, incluso en entornos sometidos a estrés mecánico recurrente. No obstante, la fabricación de concreto tradicional conlleva una serie de etapas —entre las cuales se incluyen el curado, el mezclado y el moldeado— las cuales, teniendo en cuenta su naturaleza intensiva en recursos y energía, plantean un dilema técnico-ambiental de

envergadura. Es decir, si bien estos procesos son esenciales para asegurar las propiedades mecánicas mencionadas, su implementación a gran escala no solo agrava la crisis climática, sino que también limita la viabilidad de modelos industriales alineados con los principios de la economía circular.

La producción de adoquines convencionales implica un alto costo ecológico. Monteiro et al. (2017) reportan que fabricar 1 tonelada de cemento Portland requiere 4.7 GJ de energía (equivalente a quemar 160 kg de carbón) y emite 900 kg de CO<sub>2</sub>. Además, su impermeabilidad genera escorrentías contaminadas con metales pesados (plomo, cobre), las cuales, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2022), incrementan en un 20% la toxicidad de cuerpos hídricos adyacentes. Aunque cumplen normas técnicas (resistencia  $\geq 35$  MPa), su ciclo de vida lineal contradice los principios de economía circular.

### 3.3.2. Adoquines ecoamigables

La fabricación de adoquines ecoamigables se orienta hacia la sustitución progresiva de componentes convencionales de origen tradicional (como agregados minerales o cemento Portland) por materiales reciclados, los cuales, teniendo en cuenta su procedencia no convencional, abarcan desde plásticos derivados de residuos farmacéuticos hasta subproductos de curtiembre, tal como lo sugiere Delgado (2018) en su análisis sobre innovación en materiales de construcción. Por su parte, Tejada Fernández y Loayza Palazuelos (2017) afirman que la integración estratégica de desechos industriales en matrices estructurales no solo persigue mitigar la explotación de recursos naturales vírgenes, sino que también aspira a redefinir los parámetros de eficiencia ambiental, siempre y cuando se garantice que las propiedades mecánicas de los adoquines resultantes —incluyendo resistencia a la abrasión y estabilidad dimensional— cumplan con los estándares técnicos exigidos por normativas internacionales.

### 3.3.3. Sostenibilidad en materiales de construcción

De acuerdo con Kylili y Fokaides (2017), la sostenibilidad en los materiales de construcción se fundamenta en la selección sistémica de componentes que minimizan el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida integral (ACV), el cual abarca desde la fase de extracción de materias primas (minería sostenible, silvicultura certificada) hasta su disposición final mediante estrategias de metabolismo industrial. Este enfoque, alineado con los principios de la economía circular y la ecoeficiencia, promueve el uso de recursos tales como materiales reciclados posconsumo (plásticos reforzados con fibra de vidrio), biomasa renovable (micelio fúngico, cáñamo técnico) y composites de bajo carbono, lo cual reduce las emisiones de GEI ( $CO_2eq$ ) en un 40-60% comparado con materiales convencionales.

Estos materiales, que optimizan la eficiencia energética de los edificios mediante propiedades como alta reflectancia solar (*cool roofs*) o aislamiento térmico dinámico (aerogeles), también son diseñados para evitar la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y partículas ultrafinas ( $PM_{10}$ ), lo cual contribuye al bienestar social al eliminar riesgos de toxicidad crónica (ej.: formaldehído en adhesivos). Además, su integración en modelos de construcción circular se basa en criterios de desmontaje selectivo y modularidad, que permiten su reutilización en ciclos técnicos sucesivos (ej.: acero estructural reacondicionado) o reciclaje en circuitos cerrados (hormigón triturado como árido reciclado).

### 3.3.4. Comparación de impacto ambiental

En su análisis comparativo, Braga, Silvestre y de Brito (2017) explican que el impacto ambiental de los materiales de construcción depende en gran medida de su ciclo de vida, desde la extracción de recursos hasta la disposición final del material. El concreto tradicional, aunque ampliamente utilizado debido a su durabilidad y resistencia, genera un impacto ambiental

considerable durante su producción. La fabricación de cemento, uno de los componentes principales del concreto, es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este proceso involucra la extracción de grandes cantidades de materia prima, como la caliza, y el uso de altas temperaturas en hornos que consumen grandes cantidades de energía, contribuyendo significativamente a la huella de carbono del concreto.

Por otro lado, los autores señalan que los materiales reciclados ofrecen una alternativa más sostenible al reducir la dependencia de recursos vírgenes. El uso de materiales reciclados, como plásticos reciclados, concreto reciclado o residuos industriales, disminuye la necesidad de extracción de recursos naturales, lo que reduce el impacto sobre los ecosistemas y la biodiversidad. Además, la fabricación de materiales reciclados generalmente requiere menos energía en comparación con la producción de concreto convencional, lo que se traduce en una menor huella de carbono.

### **3.4. Principios Científicos Aplicados**

#### **3.4.1. Fenómenos Físicos y Químicos**

##### **Fenómenos Físicos**

Son aquellos en los que las propiedades de las sustancias no se alteran en su composición, aunque sí pueden cambiar otras características como el estado, el volumen, la temperatura o la forma. En estos procesos, no se forman nuevas sustancias, por lo que el cambio es reversible.

##### **Fenómenos Químicos**

Involucran transformaciones en las que las sustancias originales se convierten en nuevas sustancias con propiedades diferentes. En estos procesos, se produce una modificación en la

estructura interna de las moléculas, lo que resulta en la formación de nuevas sustancias. Los fenómenos químicos son, por lo general, irreversibles sin una intervención externa significativa.

### 3.4.2. Adherencia y cohesión en materiales compuestos

Kun et al. (2021) definen la adherencia como la fuerza interfacial que actúa entre fases heterogéneas en un material compuesto (p. ej., matriz polimérica-refuerzo fibroso), lo cual garantiza la transferencia eficiente de tensiones mecánicas a través de la interfaz. Este fenómeno, que se rige por mecanismos como la adsorción química (enlaces covalentes/iónicos), el anclaje mecánico (interpenetración en superficies rugosas) y la difusión molecular (entrelazado de cadenas poliméricas), depende críticamente de factores tales como:

- **Rugosidad superficial ( $R_a > 1 \mu\text{m}$ ):** Cuantificada mediante perfilometría láser o AFM, la cual incrementa el área de contacto efectiva.
- **Compatibilidad química de la interfaz:** Optimizada mediante agentes de acoplamiento como silanos ( $\gamma$ -MPS) o titanatos, los cuales funcionalizan superficies para formar puentes covalentes.
- **Parámetros termodinámicos (energía superficial  $\gamma_s$ , ángulo de contacto  $\theta < 90^\circ$ ):** Los cuales determinan la humectabilidad de la matriz sobre el refuerzo.

### Cohesión en materiales compuestos

Kun et al. (2021) también definen la cohesión corresponde a las fuerzas intrínsecas las cuales mantienen la integridad estructural de una fase homogénea (matriz o refuerzo), lo cual se manifiesta en propiedades tales como tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) y módulo de elasticidad (E). En materiales compuestos, esta propiedad también es crítica para prevenir la nucleación de grietas o la propagación de discontinuidades bajo esfuerzos multiaxiales (tracción, flexión, torsión).

### Determinantes clave de la cohesión

- Densidad de entrecruzamiento en polímeros termoestables (epoxi, fenólicos), la cual se modula mediante el grado de curado ( $T_g > 150^\circ\text{C}$ ).
- Energía de cohesión en metales ( $E_{\text{cohesive}} \approx 1-10 \text{ eV/átomo}$ ), la cual depende de la estructura cristalina (BCC, FCC) y defectos (dislocaciones, vacantes).
- Interacciones secundarias en cerámicas (enlaces hidrógeno, fuerzas de van der Waals), las cuales contribuyen a la resistencia a compresión ( $> 500 \text{ MPa}$ ).

### Interacción adherencia-cohesión

La sinergia entre adherencia y cohesión es fundamental para el desempeño de materiales compuestos avanzados (ej.: CFRP, GFRP), ya que definen:

- Resistencia a la fractura interlaminar ( $G_{\text{IC}} > 300 \text{ J/m}^2$ ), medida mediante ensayos DCB (Double Cantilever Beam).
  - Estabilidad termo-oxidativa en ambientes agresivos (humedad, UV), la cual requiere matrices con baja permeabilidad y refuerzos inertes (fibra de vidrio E- CR).
  - Durabilidad bajo fatiga térmica ( $\Delta T > 100^\circ\text{C}$ ), siempre y cuando los coeficientes de expansión térmica (CTE) de matriz y refuerzo estén acoplados ( $\Delta\text{CTE} < 2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ).
- (Kun, D., 2021)

#### 3.4.3. Interacción mecánica entre partículas en una mezcla

De acuerdo con Zhang y Gutierrez (2017), la interacción mecánica entre partículas en una mezcla se conceptualiza como el conjunto de fuerzas que gobiernan el comportamiento microscópico y macroscópico de sistemas heterogéneos, tales como composites de matriz polimérica reforzados con partículas cerámicas o metálicas. Estas interacciones, que pueden ser de naturaleza física (fricción estática/dinámica, impacto elástico-plástico) o coloidal (fuerzas de corto/largo alcance), determinan la cohesión granular y la estabilidad estructural del sistema,

lo cual se traduce en propiedades emergentes como la resistencia a la fluencia (*yield strength*) y la tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ). En mezclas sólidas de alta fracción volumétrica de partículas (>60% v/v), la distribución espacial (homogénea, gradiente o aleatoria), la morfología de las partículas (esfericidad, rugosidad superficial) y la distribución de tamaños (PSD, por sus siglas en inglés) son factores críticos.

### **Tipología de fuerzas interpartícula y su impacto macroscópico**

- Fuerzas de van der Waals: Dominantes en partículas submicrónicas (<1  $\mu\text{m}$ ), las cuales generan adhesión cohesiva ( $F_{vdW} \approx 10^{-9} - 10^{-7} \text{ N}$ ) proporcional a la constante de Hamaker ( $A \approx 10^{-19} \text{ J}$ ) e inversamente al cuadrado de la distancia .
- Fuerzas electrostáticas: Relevantes en suspensiones coloidales, las cuales dependen del potencial zeta ( $\zeta > |30| \text{ mV}$ ) y la fuerza iónica del medio (ecuación DLVO).
- Fuerzas de contacto mecánico: Incluyen fricción de Coulomb ( $\mu \approx 0.1-0.6$ ) y deformación plástica localizada (modelo Hertz-Mindlin), las cuales gobiernan la reología de polvos en procesos de mezclado de alto cizallamiento. Estas interacciones, las cuales pueden ser cuantificadas mediante ensayos de compresión triaxial o reometría de torsión, influyen directamente en propiedades macroscópicas tales como:
  - Densidad aparente ( $\rho_{bulk}$ ), afectada por el ángulo de reposo ( $\theta > 30^\circ$  en polvos cohesivos).
  - Conductividad térmica/eléctrica, dependiente de la tortuosidad de la red de partículas.
  - Respuesta viscoelástica bajo carga dinámica (módulo de pérdida  $\tan \delta < 0.1$ ).

### 3.4.4. Fenómenos térmicos en el proceso de fusión de plásticos

#### Aumento de la Temperatura y Transición Vítreo

Según Kamaruddin (2019), el aumento de la temperatura constituye el fenómeno termodinámico fundamental mediante el cual se induce la fusión de materiales poliméricos, el cual está intrínsecamente ligado a la movilización cinética de las cadenas macromoleculares. A medida que se aplica energía térmica ( $Q > \Delta H_{\text{fusión}}$ ), las cadenas poliméricas experimentan una transición desde un estado de orden parcial (regiones cristalinas) o amorfo vítreo hacia un régimen de mayor libertad conformacional, lo cual se manifiesta en una reducción exponencial de la viscosidad dinámica ( $\eta \sim e^{-(E_a/RT)}$ ) y la aparición de comportamiento no newtoniano (seudoplasticidad). Este proceso, el cual está cuantificado mediante ensayos reológicos (ej.: viscosimetría capilar bajo ASTM D3835), permite la transición del material desde un estado sólido elástico (módulo de almacenamiento  $G' > 10^3$  Pa) a un estado fundido viscoelástico ( $G''$  dominante), lo cual facilita su procesamiento mediante técnicas tales como extrusión o moldeo por inyección.

Esta transformación también está asociada a la transición vítreo ( $T_g$ ), la cual corresponde a la temperatura crítica en la cual los segmentos móviles de las cadenas poliméricas ( $\approx 20-50$  unidades monoméricas) adquieren energía suficiente para superar las barreras de rotación torsional, lo cual genera una disminución abrupta del módulo elástico (2-3 órdenes de magnitud) y un incremento en el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ). En esta etapa, que precede a la fusión cristalina ( $T_m$ ) en polímeros semicristalinos (ej.: polietileno de alta densidad), el material pierde su rigidez estructural debido a la relajación de las fuerzas de van der Waals y los enredos entrópicos, lo cual se evidencia en mediciones de DSC (Differential Scanning Calorimetry) mediante un cambio en la capacidad calorífica ( $\Delta C_p$ ).

Finalmente, al alcanzar la temperatura de fusión ( $T_m$ ), la cual está determinada por la energía de cohesión de las zonas cristalinas ( $\Delta H_{\text{fusión}} \approx 200\text{-}300 \text{ J/g}$  para poliolefinas), se produce la ruptura de los dominios laminares ordenados, lo cual conduce a una transición de fase de primer orden caracterizada por un flujo newtoniano ( $\eta \approx 10^2\text{-}10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) y la pérdida completa de resistencia mecánica ( $\sigma_{\text{yield}} \approx 0$ ). Este fenómeno, el cual es reversible solo bajo condiciones de enfriamiento controlado (ej.: temple isotérmico), está gobernado por parámetros tales como peso molecular ( $M_w$ ), índice de polidispersidad ( $\mathcal{D}$ ) y arquitectura de cadena (lineal, ramificada), siempre y cuando se mantengan condiciones de equilibrio termodinámico.

### **Fenómenos de Expansión Térmica y Conductividad Térmica**

De acuerdo con Song y Hou (2017), durante la fusión de materiales termoplásticos se manifiesta un fenómeno de expansión térmica intrínseco, el cual corresponde a la dilatación volumétrica ( $\Delta V/V_0 = \alpha_v \cdot \Delta T$ ) derivada del incremento en la amplitud de vibración molecular y la relajación de tensiones conformacionales. Este fenómeno, cuantificado por el coeficiente de expansión térmica ( $\text{CTE} \approx 50\text{-}200 \mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$  para polímeros comunes), es crítico en aplicaciones como el moldeo por inyección o la soldadura por termofusión, ya que influye en la precisión dimensional de las piezas y la compatibilidad interfacial en sistemas multimateriales (ej.: uniones metal-plástico). Además, la anisotropía térmica inherente a los plásticos reforzados con fibras (GFRP, CFRP) también es un factor determinante, lo cual exige modelos predictivos de simulación (FEA) para evitar deformaciones residuales o delaminación.

Paralelamente, los autores explican que la conductividad térmica ( $k \approx 0.1\text{-}0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  en polímeros amorfos) juega un papel clave en la distribución no isotérmica del calor durante la fusión, lo cual se traduce en gradientes térmicos ( $\nabla T$ ) que afectan la cinética de cristalización en polímeros semicristalinos (ej.: PP, PA6). Un material con alta conductividad térmica ( $k > 0.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , como el polietileno de alta densidad) se calentará de manera más homogénea,

reduciendo tensiones internas y defectos como la porosidad o el *warping*, siempre y cuando se optimicen parámetros de procesamiento como la tasa de calentamiento ( $\beta > 10^\circ\text{C}/\text{min}$ ) y el tiempo de residencia en estado fundido ( $t < \text{degradación térmica}$ ). En termoplásticos, este proceso es reversible debido a la ausencia de entrecruzamientos químicos permanentes, lo que permite la transición cíclica sólido-líquido-sólido mediante control térmico (enfriamiento bajo  $T_g$  o  $T_m$ ). Esta propiedad, que sustenta técnicas de reciclaje mecánico (trituración-extrusión), depende de la estabilidad termo-oxidativa del polímero (OIT  $> 20$  min en condiciones ASTM D3895) y la preservación de la masa molar ( $M_w$ ) durante ciclos térmicos múltiples.

### 3.4.5. Reacciones químicas en la hidrólisis del colágeno

#### Reacciones de ruptura de enlaces peptídicos

De acuerdo con Ahmed y Chun (2018), la hidrólisis del colágeno implica la ruptura selectiva de los enlaces peptídicos (-CO-NH-) que unen los residuos de aminoácidos (glicina, prolina, hidroxiprolina) en las cadenas polipeptídicas de triple hélice, lo cual genera fragmentos oligoméricos (péptidos de bajo peso molecular) o aminoácidos libres mediante un mecanismo de proteólisis química. Este fenómeno, que sigue una cinética de primer orden dependiente de la actividad acuosa ( $a_w$ ), ocurre cuando una molécula de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) actúa como nucleófilo en un ataque electrofílico al carbono carbonílico del enlace peptídico, lo cual induce la formación de un intermedio tetraédrico inestable y la subsiguiente escisión de la cadena.

### 3.4.6. Efectos de la temperatura y el pH

La temperatura es un factor determinante en la hidrólisis del colágeno, ya que incrementa la energía cinética molecular ( $\propto \sqrt{T}$ ), lo que acelera la difusión de agua hacia la matriz proteica y la frecuencia de colisiones efectivas. A temperaturas cercanas a la de desnaturalización ( $T_d \approx 40^\circ\text{C}$  para colágeno tipo D), la triple hélice se despliega (*unfolding*), lo cual expone los enlaces

peptídicos hidrofóbicos (ej.: Gly-Pro-Hyp) a la acción hidrolítica, reduciendo el tiempo de reacción ( $t_{1/2}$ ) en un 70-90%.

Por otro lado, el pH también es un modulador clave de la actividad proteolítica, pues influye en el estado de ionización de los grupos funcionales de la proteína y del agua. En medios ácidos ( $\text{pH} \approx 1.5-2.5$ ), la protonación del oxígeno carbonílico ( $-\text{C}=\text{O}^+\text{H}-$ ) facilita el ataque nucleofílico del agua, lo que genera una ruptura homolítica del enlace peptídico. Este mecanismo, potenciado por ácidos minerales como el HCl ( $\approx 6\text{M}$ ), sigue una relación logarítmica entre la constante de velocidad ( $k$ ) y la fuerza iónica ( $I$ ), según la teoría de Debye-Hückel.

#### **3.4.7. Fundamento Bioquímico de la Obtención de Adhesivo de Colágeno a partir de Residuos Bovinos de Curtiembre**

Según Durai et al. (2023), la transformación de residuos de curtiembre, específicamente sebo y cartílago bovino, en un adhesivo funcional para los adoquines ecoamigables se fundamenta en las propiedades inherentes del colágeno y su comportamiento bajo hidrólisis térmica, proceso empleado en la metodología de esta investigación. El colágeno, principal proteína estructural del tejido conectivo en mamíferos, se encuentra abundantemente en pieles, huesos, tendones y cartílagos. En los residuos bovinos de curtiembre, como el sebo (que puede contener fragmentos de tejido conectivo) y el cartílago, el colágeno predominante es de Tipo I y Tipo II, respectivamente, caracterizados por su estructura de triple hélice estabilizada por enlaces de hidrógeno y entrecruzamientos covalentes.

**La "ruta bioquímica" para la extracción y modificación del colágeno en este contexto implica varios fenómenos fisicoquímicos inducidos térmicamente:**

- 1. Desnaturalización Térmica:** Al someter los residuos de curtiembre (sebo y cartílago bovino) a calentamiento en un medio acuoso a temperaturas elevadas ( $100^\circ\text{C}$  en este

estudio), la energía térmica supera la necesaria para mantener la estructura nativa de la triple hélice del colágeno. Esto provoca la ruptura de los enlaces de hidrógeno intercatenarios e intracatenarios, resultando en la desorganización de la triple hélice y la separación de las cadenas polipeptídicas alfas individuales. Este proceso, conocido como desnaturalización, transforma el colágeno insoluble en una forma más soluble y reactiva, comúnmente conocida como gelatina o colágeno hidrolizado. La temperatura de desnaturalización (Td) del colágeno bovino varía según el grado de entrecruzamiento y el entorno, pero generalmente se encuentra en el rango de 40-65°C para el colágeno en disolución o en tejidos hidratados, siendo superada ampliamente en el proceso metodológico. (Junkes et al., 2024)

- 2. Hidrólisis de Enlaces Peptídicos:** De forma concomitante a la desnaturalización, y potenciada por la temperatura y la presencia de agua, ocurre la hidrólisis de los enlaces peptídicos (-CO-NH-) que unen los aminoácidos en las cadenas polipeptídicas del colágeno. Como se describe en la sección 2.3.5, este proceso implica un ataque nucleofílico de las moléculas de agua sobre los grupos carbonilo de los enlaces peptídicos, conduciendo a su escisión. El resultado es la fragmentación de las largas cadenas de colágeno en péptidos de menor peso molecular y, eventualmente, en aminoácidos libres, dependiendo de la severidad (tiempo y temperatura) del tratamiento hidrolítico. El control del tiempo de hidrólisis hasta alcanzar una reducción volumétrica específica (al 33% del volumen inicial) busca optimizar el grado de hidrólisis para obtener fragmentos peptídicos con capacidad adhesiva y gelificante. (Durai et al., 2023)
- 3. Formación del Gel Adhesivo:** Tras la hidrólisis térmica y posterior filtración para eliminar impurezas, el líquido resultante, rico en péptidos de colágeno y gelatina, se deja reposar. Durante el enfriamiento (a  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), las cadenas polipeptídicas

desnaturalizadas y parcialmente hidrolizadas tienden a reorganizarse, formando una red tridimensional mediante la reformación de algunos enlaces de hidrógeno y otras interacciones intermoleculares. Esta red atrapa moléculas de agua, resultando en la formación de un gel, cuyas propiedades adhesivas y cohesivas son aprovechadas en la formulación de los adoquines ecoamigables. La capacidad de estos geles de colágeno para actuar como aglutinantes se debe a la presencia de grupos funcionales reactivos en los aminoácidos (como grupos amino y carboxilo) que pueden interactuar con las superficies de otros materiales, como la arena y el plástico fundido en la matriz del adoquín. (Gopalam et al., 2020)

### **3.5. Ensayos y Pruebas de Materiales**

#### **3.5.1. Resistencia a la compresión**

La fabricación de adoquines, ya sean de diseño tradicional o ecoamigable, constituye un proceso industrial que debe ceñirse a normativas técnicas rigurosas, es decir, protocolos estandarizados que aseguran la calidad, durabilidad y seguridad estructural de estos elementos en entornos urbanos. En el Perú, tal como lo establece la Norma Técnica Peruana NTP 399.611 (INACAL, 2017), se exigen requisitos mínimos en términos de resistencia a la compresión (no menor a 35 MPa) y densidad (superior a 2,200 kg/m<sup>3</sup>), los cuales se alinean con estándares internacionales como el ASTM C936 para adoquines de concreto (ASTM International, 2021). Desde la ingeniería de materiales, resulta imperativo validar las nuevas formulaciones mediante simulaciones numéricas avanzadas —tales como el Método de Elementos Finitos (MEF)— y ensayos experimentales destructivos, teniendo en cuenta que la incorporación de materiales reciclados (plásticos, colágeno) puede alterar propiedades críticas.

### 3.6. Software y Métodos de Análisis

#### 3.6.1. Software

##### **Statgraphics Centurion**

Statgraphics Centurion es una herramienta de análisis estadístico multivariante la cual permite la ejecución de modelos de regresión lineal múltiple, diseños experimentales factoriales y análisis de cluster jerárquico, lo cual es esencial para la validación de hipótesis en ensayos de resistencia de materiales. En el contexto de adoquines reciclados, este software facilita la implementación de ANOVA multifactorial para evaluar la influencia de variables independientes (ej.: porcentaje de áridos reciclados, relación agua-cemento) sobre propiedades mecánicas (resistencia a compresión, módulo de elasticidad), lo cual se complementa con técnicas de bootstrapping para cuantificar intervalos de confianza no paramétricos. Además, su módulo de visualización avanzada incluye diagramas de caja multifactoriales, gráficos de superficie de respuesta 3D y mapas de calor de correlación, los cuales permiten identificar interacciones sinérgicas entre parámetros de mezcla y desempeño estructural. Estas capacidades, las cuales integran algoritmos de machine learning (árboles de decisión CART), son fundamentales para optimizar formulaciones bajo restricciones de sostenibilidad (huella de carbono  $< 1.5 \text{ kg CO}_2\text{eq/adoquín}$ ), siempre y cuando se garantice la homocedasticidad de los datos mediante pruebas de Levene o Brown-Forsythe. (Kvitka et al., 2021)

##### **Minitab**

Minitab se destaca por su implementación de ANOVA jerárquico y pruebas de hipótesis paramétricas/no paramétricas, las cuales son críticas para comparar la resistencia a la compresión entre lotes de adoquines reciclados vs. convencionales. Este software permite aplicar diseños de bloques aleatorizados (RCBD) para controlar factores de confusión tales como la variabilidad en la granulometría de áridos, lo cual se complementa con análisis de potencia estadística ( $\beta > 0.8$ ) para determinar tamaños muestrales óptimos.

El análisis de componentes principales (PCA) en Minitab es utilizado para reducir la dimensionalidad de datos multivariados (ej.: absorción de agua, densidad, porosidad), lo cual facilita la identificación de variables latentes que explican >85% de la varianza total. Adicionalmente, su módulo de regresión logística ordinal permite modelar la probabilidad de falla bajo cargas cíclicas ( $N > 10^6$  ciclos), siempre y cuando se valide la normalidad de residuos mediante gráficos Q-Q y pruebas de Shapiro-Wilk. (Asmat et al., 2020).

### **AutoCAD / Revit**

AutoCAD y Revit son plataformas de diseño paramétrico las cuales integran herramientas de simulación FEM (Finite Element Method) para modelar la distribución de tensiones ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$ ) en adoquines sometidos a cargas asimétricas. En AutoCAD, se emplean algoritmos de optimización topológica para minimizar el peso del adoquín ( $\downarrow 20-30\%$ ) manteniendo su resistencia a flexión ( $>4$  MPa), lo cual se logra mediante iteraciones de algoritmo genético (NSGA-II).

Por su parte, Revit habilita el modelado BIM Nivel 2 (ISO 19650), el cual incorpora datos de ciclo de vida (LCA) y huella ambiental directamente en los objetos 3D, lo cual permite evaluar la sostenibilidad integral de pavimentos mediante indicadores tales como el costo del ciclo de vida (LCC) y el índice de circularidad material (MCI  $> 0.7$ ). Estas plataformas también son capaces de simular el impacto de condiciones ambientales extremas ( $\Delta T = \pm 40^\circ\text{C}$ ) en la dilatación térmica de los adoquines, siempre y cuando se definan coeficientes de expansión térmica (CTE) precisos para cada componente (Mescheryakov, 2025).

### **MATLAB**

MATLAB se utiliza para desarrollar modelos constitutivos no lineales los cuales describen el comportamiento viscoelástico de adoquines reciclados bajo cargas dinámicas (frecuencia 5-50 Hz). Mediante el toolbox Partial Differential Equation (PDE), se simulan escenarios de fractura progresiva utilizando el criterio de daño de Mazars, lo cual permite predecir la propagación de

microfisuras (apertura  $>0.1$  mm) en función del número de ciclos de carga. Además, se implementan algoritmos de optimización multiobjetivo (MOGA) para equilibrar resistencia a compresión ( $>35$  MPa) y permeabilidad ( $>0.1$  cm/s), lo cual implica resolver sistemas de ecuaciones no lineales con restricciones de Pareto. Estos modelos, los cuales son validados mediante correlación digital de imágenes (DIC), proporcionan mapas de deformación plástica ( $\epsilon_{pl} \approx 2-5\%$ ) críticos para el diseño de mezclas con residuos plásticos posconsumo (Foda et al., 2024).

### **ImageJ**

ImageJ es empleado para el análisis cuantitativo de micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), lo cual permite calcular la distribución de tamaño de poros (PSD) mediante el plugin Analyze Particles. Este software también aplica transformadas de Fourier (FFT) para identificar patrones de anisotropía en la orientación de fibras recicladas, lo cual correlaciona con la resistencia a tracción indirecta ( $ITS > 0.8$  MPa). Mediante el módulo BoneJ, se cuantifican parámetros de conectividad esquelética (Euler number  $\approx 0$ ) y esfericidad de partículas ( $\Psi > 0.7$ ), los cuales son indicadores clave de la homogeneidad microestructural. Estos análisis, los cuales requieren imágenes binarizadas con umbralización de Otsu, son esenciales para validar la eficacia de tratamientos superficiales tales como silicatación alcalina en la reducción de porosidad ( $<8\%$ ). (Schroeder et al., 2021)

## **3.6.2. Métodos de Evaluación y Diseño Experimental**

### **3.6.2.1. Diseño factorial**

Purwandari y Ratnamirah (2020) describen el diseño factorial como una herramienta estadística utilizada en el análisis de experimentos para estudiar cómo diferentes variables de entrada afectan una o más variables de salida. En el contexto de los adoquines reciclados, el diseño factorial se aplica para optimizar las proporciones de materiales reciclados en la mezcla del adoquín, evaluando su impacto en las propiedades físicas y mecánicas, como la resistencia a la

compresión. A través de este diseño experimental, es posible identificar las combinaciones óptimas de materiales que maximizan la calidad y durabilidad de los adoquines reciclados.

El diseño factorial se basa en la variación sistemática de los factores involucrados, lo que permite estudiar no solo los efectos principales de cada variable, sino también las posibles interacciones entre ellas. Por ejemplo, se puede evaluar cómo la proporción de plásticos en la mezcla influye en la resistencia del adoquín y cómo interactúa con la cantidad de residuos de curtiembres. Este enfoque permite realizar experimentos de manera eficiente y obtener resultados que optimicen la formulación de los adoquines, garantizando así el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.

### **3.6.2.2. Pruebas mecánicas según normas ASTM**

Noushini y Castel (2018) destacan que las pruebas mecánicas son esenciales para evaluar las propiedades fundamentales de los adoquines reciclados y garantizar su idoneidad para aplicaciones estructurales. Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) proporcionan los procedimientos estandarizados para realizar estas pruebas, como la resistencia a la compresión, la flexibilidad y la dureza. Estas pruebas aseguran que los adoquines reciclados cumplan con los requisitos técnicos necesarios para su uso en la construcción y pavimentación.

Las pruebas mecánicas según las normas ASTM permiten evaluar la capacidad de los adoquines para soportar cargas, su comportamiento bajo deformación y su resistencia al desgaste. Por ejemplo, la norma ASTM C140 establece los métodos para realizar ensayos de resistencia a la compresión y de absorción de agua en bloques de concreto, mientras que la ASTM D695 especifica los procedimientos para medir la resistencia a la compresión de los materiales utilizados en productos de concreto. Estas pruebas son fundamentales para garantizar que los

adoquines reciclados sean suficientemente resistentes y duraderos, cumpliendo con las especificaciones de las normativas internacionales y nacionales.

### **3.6.2.3. Análisis de varianza (ANOVA)**

Según Montgomery (2017), el análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística que permite evaluar las diferencias entre varios grupos de datos para determinar si los factores experimentales influyen de manera significativa en las variables de interés. En el caso de los adoquines reciclados, ANOVA es utilizado para justificar el diseño experimental y validar la influencia de diferentes proporciones de materiales reciclados en las propiedades del adoquín, como la resistencia a la compresión o la dureza.

La ANOVA ayuda a determinar si las diferencias observadas en los resultados se deben a la variación aleatoria o a la influencia de las variables controladas, como el tipo de material reciclado, la proporción de cada componente y el proceso de curado. De esta manera, se pueden justificar las decisiones tomadas en el diseño experimental, proporcionando una base sólida para optimizar las proporciones de materiales reciclados en la fabricación de adoquines sin comprometer sus propiedades mecánicas.

### **3.6.2.4. Modelado numérico de deformación y fatiga estructural**

En el campo del modelado numérico, Qiu et al. (2021) demuestran que esta es una herramienta clave en la simulación de los comportamientos mecánicos de materiales y estructuras. En el caso de los adoquines reciclados, el modelado numérico se emplea para analizar fenómenos como la deformación y la fatiga estructural bajo cargas repetidas, lo que permite simular su comportamiento a largo plazo y predecir su durabilidad. A través de técnicas como los métodos de elementos finitos (FEM), se pueden generar modelos que muestran cómo los adoquines

reciclados se comportan ante diferentes condiciones de carga y cómo las propiedades de los materiales reciclados influyen en la formación de microfisuras o deformaciones plásticas.

El análisis de la fatiga estructural es particularmente importante en el diseño de adoquines, ya que estos materiales están expuestos a ciclos repetidos de carga, como el tráfico vehicular. Mediante el modelado numérico, se puede predecir el número de ciclos que un adoquín reciclado puede soportar antes de que comience a fallar, lo que es esencial para asegurar su rendimiento a largo plazo.

### **3.7. Impacto Ambiental y Normativas**

#### **3.7.1. Normativas Técnicas y Ambientales**

##### **3.7.1.1. Norma Técnica Peruana (NTP 399.611)**

La NTP 399.611 establece los requisitos que deben cumplir los adoquines de concretos fabricados para la construcción de pavimentos. Esta norma especifica las características geométricas, propiedades físicas y mecánicas, así como los métodos de ensayo para asegurar la calidad y durabilidad de los adoquines en diversas aplicaciones. Por ejemplo, establece que la resistencia a la compresión de los adoquines debe ser mínima de 31 MPa (320 kg/cm<sup>2</sup>) para un promedio de tres unidades, y máxima de 6% de absorción de agua. (INACAL, 2015)

##### **3.7.1.2. ISO 14001**

La norma ISO 14001, establecida por la Organización Internacional de Normalización (2015), es una norma internacional que especifica los requisitos para un sistema de gestión ambiental eficaz. Su aplicación en la industria de la construcción permite a las organizaciones mejorar su desempeño ambiental, reducir el consumo de recursos y minimizar la generación de residuos, promoviendo prácticas sostenibles en la fabricación y uso de adoquines reciclados. La norma requiere que las organizaciones establezcan una política ambiental, identifiquen aspectos

ambientales significativos, cumplan con requisitos legales y otros requisitos, y establezcan objetivos y metas ambientales.

### **3.7.1.3. ASTM C936**

La norma ASTM C936, publicada por ASTM International (2024), es una especificación estándar que cubre los requisitos para adoquines de concreto interbloqueados destinados a la construcción de superficies pavimentadas. Esta norma establece criterios para la resistencia a la compresión, absorción de agua, abrasión y otras propiedades esenciales para garantizar la calidad y desempeño de los adoquines en aplicaciones vehiculares y peatonales. Por ejemplo, especifica que la resistencia a la compresión de los adoquines debe ser mínima de 8,000 psi (55 MPa) y la absorción de agua máxima de 5%.

### **3.7.1.4. Regulación REACH de la UE**

Mediante el Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM, el Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú ha establecido los protocolos para el manejo adecuado de residuos sólidos, incluyendo los generados en la industria de la construcción. Estos protocolos proporcionan directrices para la segregación, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, promoviendo prácticas de economía circular y reduciendo el impacto ambiental de los residuos de construcción y demolición. Por ejemplo, se establece que los residuos de construcción deben ser segregados en origen, almacenados en condiciones adecuadas y transportados a instalaciones autorizadas para su disposición final o reciclaje.

## CAPÍTULO III

### 4. METODOLOGÍA

#### 4.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

##### 4.1.1. Tipo de investigación

En línea con investigaciones como las de Ramírez-Pico et al. (2020) y Miranda Felipe et al. (2024), se realizará una investigación experimental en la que se elaborarán y evaluarán adoquines ecoamigables a partir de materiales reciclados (plástico de residuos farmacéuticos, residuos orgánicos de curtiembres para la obtención de colágeno y arena gruesa), diseñando y ejecutando ensayos controlados con el objetivo de determinar la influencia de diversas proporciones de estos insumos sobre propiedades clave del producto final.

Asimismo, la investigación propuesta se enmarca en un diseño experimental para evaluar adoquines fabricados con materiales reciclados. Este enfoque se alinea con revisiones recientes como la de Alqahtani y Khan (2020), que destaca la viabilidad de utilizar desechos plásticos en materiales de construcción, optimizando sus propiedades mecánicas mediante diseños factoriales. Además, investigaciones como la de Durai et al. (2023) han explorado el uso de colágeno derivado de residuos orgánicos de curtiembres para la valorización de subproductos industriales, demostrando su potencial en aplicaciones sostenibles.

##### 4.1.2. Nivel de investigación

La investigación se desarrollará a un nivel aplicado, ya que se buscará optimizar el proceso de fabricación de los adoquines ecoamigables para su posible implementación en proyectos de construcción sostenible. Se adoptará un enfoque descriptivo-correlacional, similar al de trabajos como los de Garzón Leiva (2021) y Gamonal Rimarachin y García Velásquez (2024), que permitirá establecer relaciones entre las

variables involucradas en el proceso productivo y las propiedades físicas y mecánicas evaluadas.

En ese sentido, el nivel aplicado de la investigación se fundamenta en la necesidad de soluciones prácticas para la construcción sostenible, tal como señalan Alqahtani y Khan (2020), quienes evaluaron mezclas de plástico reciclado en la fabricación de adoquines para cumplir normas técnicas. El enfoque descriptivo-correlacional propuesto permite analizar relaciones entre variables, una metodología respaldada por estudios como el de Malla y Shaw (2021), que vincula composiciones de materiales reciclados con propiedades mecánicas. Para guiar el estudio de manera estructurada, se definieron las variables dependientes e independientes, su operacionalización y los instrumentos de medición correspondientes, los cuales se presentan en la **Tabla N° 3**.

**Tabla 3**

*Operacionalización de variables*

Variable	Tipo de variable	Definición operacional	Indicadores	Unidades de medición	Instrumentos de medición
Residuos plásticos farmacéuticos	Variable Independiente	Polímeros procedentes de la industria farmacéutica utilizados en la fabricación de adoquines ecoamigables	Cantidad reciclada, Tamaño de partícula	kg, mm	Trituradoras, cribas, balanza
Residuos de curtiembre		Subproductos ricos en colágeno de la industria curtidora usados como adhesivos en el adoquín ecoamigables	Cantidad reciclada, Adhesividad, Composición química	kg, N/mm <sup>2</sup> , %	Espectrómetro, ensayos adhesivos, balanza
Propiedades físicas y		Características de desempeño	Resistencia a la	MPa, %,	Ensayos normalizados ASTM/NTP,

mecánicas	Dependiente	estructural y durabilidad de los adoquines ecoamigables	compresión, Absorción de agua, Densidad	g/cm <sup>3</sup>	equipos específicos
-----------	-------------	---	---	-------------------	---------------------

*Nota. Elaboración propia*

## 4.2. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

### 4.2.1. Materiales e Insumos

#### Materias Primas y Componentes:

- **Residuos Plásticos Farmacéuticos (PRF):** Blísteres (PP) y botellas de suero fisiológico (PET), utilizados como materia prima principal para la matriz del adoquín.
- **Residuos Orgánicos de Curtiembre:** Sebo y cartílago bovino, utilizados como materia prima para la síntesis del adhesivo de colágeno.
- **Arena Gruesa:** Agregado con un tamaño de partícula de 2 a 4 mm, empleado como componente granular en la mezcla.
- **Agua:** Incorporada en la mezcla de los adoquines en cantidad variable según la formulación.

#### Insumos de Proceso y Materiales Auxiliares:

- **Agua (para procesamiento):** Corriente, destilada y desionizada, utilizada en la limpieza de residuos y preparación de soluciones.
- **Hipoclorito de Sodio:** Solución al 1% empleada para la desinfección de los PRF.
- **Cloruro de Sodio (NaCl):** Utilizado para preparar una solución salina al 0.9% para el enjuague y neutralización de olores de los residuos de curtiembre.
- **Aceite de Silicona:** Empleado como agente desmoldante para los moldes de acero.

- **Papel Filtro Whatman N°4:** Utilizado para la filtración fina del hidrolizado de colágeno.
- **Malla de Nylon (100 µm):** Empleada para la filtración gruesa del hidrolizado de colágeno.
- **Contenedores Herméticos:** Para el almacenamiento del plástico ya triturado.
- **Contenedores Refrigerados (a 4 °C):** Para el transporte y conservación de los residuos de curtiembre.
- **Recipientes de Polietileno de Alta Densidad (HDPE):** Utilizados para el reposo y gelificación del adhesivo de colágeno.

#### 4.2.2. Equipos

##### Equipos de Procesamiento y Fabricación:

- **Trituradora de cuchillas rotativas (modelo XT-3000):** Para la reducción de tamaño de los PRF.
- **Reactor de acero inoxidable (10 L):** Para la síntesis del adhesivo.
- **Placa calefactora (marca ThermoScientific):** Para calentar la mezcla del adhesivo.
- **Mezcladora planetaria (modelo Bosch MFQ4030):** Para la homogenización de las mezclas.
- **Máquina de extrusión térmica de doble husillo:** Para la fusión del plástico y conformado de los adoquines.
- **Vibrador neumático (50 Hz):** Para la compactación de la mezcla en los moldes.

**Equipos de Análisis:**

- **Prensa hidráulica digital (ELE International, modelo 48-6150):** Para los ensayos de resistencia a la compresión.

**4.3. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Se implementará un diseño experimental factorial en el que se estudiarán diferentes combinaciones de proporciones de los materiales reciclados en la fabricación de adoquines de distintos tamaños. Cada formulación se someterá a pruebas mecánicas y físicas, un enfoque metodológico similar al de Huanca Sucupuca (2024) y Mamani (2024), lo que facilitará la identificación de la mezcla más prometedora para el cumplimiento de los requisitos técnicos y normativos vigentes.

El diseño factorial implementado sigue las recomendaciones de Montgomery (2017), quien enfatiza su eficacia para identificar interacciones entre factores en estudios de materiales. Las pruebas mecánicas y físicas se basarán en estándares como la norma ASTM C936, publicada por ASTM International (2021), para la resistencia a la compresión, garantizando así la validez técnica de los resultados.

**4.4. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN****4.4.1. Gestión y pretratamiento de residuos**

La gestión de residuos se realizó en dos etapas diferenciadas, enfocadas en los materiales plásticos farmacéuticos y los subproductos orgánicos de curtiembre. Para los residuos plásticos farmacéuticos (PRF), se priorizará la recolección de blísteres y botellas de suero fisiológico de centros médicos y farmacias, seleccionando exclusivamente polímeros como polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET), debido a su alta resistencia térmica y compatibilidad con procesos de reciclaje. Estos materiales se someterán a un protocolo de limpieza riguroso: primero, se sumergirán en una solución desinfectante de hipoclorito

de sodio al 1% durante 30 minutos para eliminar residuos biológicos; posteriormente, se enjuagarán con agua destilada y se secarán al sol durante 48 horas para garantizar la eliminación de humedad residual. La trituración se llevará a cabo en una máquina de cuchillas rotativas (modelo XT-3000), calibrada para producir partículas de  $\leq 2$  cm, un tamaño óptimo que facilita su integración homogénea en la matriz del adoquín. Este proceso se repetirá en lotes de 5 kg para evitar sobrecargas en el equipo, almacenando los plásticos triturados en contenedores herméticos hasta su uso.

En cuanto a los residuos orgánicos de curtiembre, se recolectarán 5 kg de sebo y cartílago bovino, los cuales se transportarán en contenedores refrigerados a 4°C para prevenir su descomposición. Estos materiales se lavarán con agua corriente para eliminar impurezas visibles, como sangre y tejidos residuales, seguido de un enjuague con solución salina (NaCl al 0.9%) para neutralizar olores. Una vez limpios, se almacenarán en condiciones ambientales controladas (25°C, humedad relativa del 60%) hasta su procesamiento, con un plazo máximo de 72 horas para evitar proliferación microbiana (Perkola et al., 2021).

#### **4.4.2. Síntesis del adhesivo a base de colágeno**

El adhesivo se obtuvo mediante hidrólisis térmica de los residuos orgánicos, un proceso que aprovecha la capacidad del colágeno para formar geles estables. En un reactor de acero inoxidable de 10 L equipado con agitación mecánica (150 rpm), se mezclarán los 5 kg de residuos con 3 L de agua desionizada. La mezcla se calentará a 100°C en una placa calefactora (marca ThermoScientific), manteniendo un flujo constante de vapor para evitar la evaporación excesiva. El progreso de hidrólisis se monitorizará midiendo la

reducción volumétrica cada 30 minutos, deteniendo el proceso cuando el volumen alcance 1 L (33% de la inicial), lo que indica la degradación eficiente de las fibras de colágeno.

Posteriormente, el líquido se filtró en dos etapas: primero, a través de una malla de nylon de 100  $\mu\text{m}$  para retener partículas gruesas, y luego con papel filtro Whatman N°4 para eliminar impurezas microscópicas. El filtrado se transferirá a recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE), donde se dejará reposar a  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para permitir la gelificación. El gel resultante se almacenará a  $4^{\circ}\text{C}$  en una nevera industrial (modelo ColdMax CX-500) con un máximo de 7 días de conservación, aplicándose un tratamiento térmico de activación a  $60^{\circ}\text{C}$  mediante baño María antes de su incorporación en las mezclas. (Allegue et al., 2020).

#### **a. Fabricación de adoquines ecoamigables**

La fabricación de los adoquines siguió un protocolo adaptado de Arguedas & Eyzaguirre (2024), integrando tres mezclas con proporciones variables de PRF (25%, 50%, 75%), adhesivo, arena gruesa (tamaño de partícula: 2-4 mm) y agua. Cada mezcla, de 24 kg en total, se homogenizará en una mezcladora planetaria (modelo Bosch MFQ4030) durante 15 minutos, asegurando una distribución uniforme de los componentes.

El proceso de extrusión térmica se realizó en una máquina de doble husillo, donde los plásticos triturados se fundirán a  $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Una vez alcanzado el estado líquido, se incorporará el adhesivo activado a  $60^{\circ}\text{C}$ , mezclándose a velocidad constante (20 rpm) para evitar burbujas. La arena se añadirá progresivamente en tres ciclos iguales, utilizando una paleta mecánica para mantener la homogeneidad. La masa resultante se verterá en moldes de acero

templado, diseñados según las dimensiones de la NTP 399.611: Tipo I (10×20×4 cm), Tipo II (10×20×6 cm) y Tipo III (10×20×8 cm). Cada molde se pre-engrasará con aceite de silicona para facilitar el desmolde, y la mezcla se compactará con un vibrador neumático (50 Hz) durante 2 minutos para eliminar vacíos.

Tras 45 minutos de enfriamiento en ambiente controlado (25°C, humedad relativa 60%), los adoquines se desmoldarán y curarán al aire libre durante 7 días, protegiéndolos de la exposición directa al sol y la lluvia. Este período permitirá la estabilización de las propiedades mecánicas antes de las pruebas de laboratorio. (Allegue, et al., 2020)

#### **4.4.3. Diseño experimental y evaluación de propiedades**

El estudio empleó un diseño factorial 3x2, analizando dos factores independientes: tamaño del adoquín (3 niveles: Tipo I, II, III) y proporción de PRF (3 niveles: 25%, 50%, 75%). Cada combinación se replicará tres veces, totalizando 27 unidades experimentales. Las variables de respuesta incluyeron:

- Resistencia a la compresión: Medida con una prensa hidráulica digital (ELE International, modelo 48-6150) bajo la norma ASTM C39, aplicando carga axial a 3 mm/min hasta la falla.
- Densidad: Calculada mediante la relación masa/volumen, utilizando el método de desplazamiento de agua (ASTM C642) para garantizar precisión.

Los datos se analizarán con un ANOVA multifactorial ( $\alpha=0.05$ ) en el software Minitab v21, validando supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Levene). En caso de diferencias significativas, se aplicará una prueba de Tukey para identificar contrastes entre grupos. Adicionalmente, se realizarán pruebas T-Student unilaterales para comparar los resultados con

los valores mínimos establecidos en la NTP 399.611, asegurando que los adoquines cumplan los estándares de resistencia para aplicaciones peatonales o vehiculares.

### **Control de calidad y consideraciones éticas**

Cada adoquín se etiquetó con un código único (Ej: TIPO-I-75%-R1) para garantizar trazabilidad desde la materia prima hasta el producto final. Las pruebas se realizaron en colaboración con un laboratorio acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025, utilizando equipos calibrados y protocolos estandarizados. Los residuos generados, como aguas residuales y plásticos no utilizados, se gestionarán según el Decreto Supremo N°014-2017-MINAM, priorizando técnicas de reciclaje y neutralización química para minimizar el impacto ambiental.

## CAPÍTULO IV

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del proceso experimental, seguido de un análisis estadístico y una discusión detallada que contrasta los hallazgos con la literatura científica y los objetivos planteados.

#### 5.1. Diseño Experimental Implementado:

Para evaluar sistemáticamente el efecto de los materiales reciclados sobre las propiedades de los adoquines, se implementó un diseño experimental factorial. Este enfoque permitió analizar la influencia de dos factores principales: el tamaño del adoquín y la proporción de residuo plástico farmacéutico (PRF) en la mezcla. La Tabla N° 5 detalla los factores y niveles considerados, así como aquellos factores no controlables que pudieron introducir variabilidad en el proceso.

**Tabla 4**

*Factores y niveles*

Nivel	Tamaño	Factor	Dimensiones
I	Pequeño	A1	10 cm x 20cm x 4cm
II	Mediano	A2	10 cm x 20cm x 6cm
III	Grande	A3	10 cm x 20cm x 8cm
Nivel	Proporciones PRF	Factor	Cantidad
I	75% / 25%	B1	18 kg
II	50% / 50%	B2	12 kg
III	25% / 75%	B3	6 kg
Factores no controlables			
Temperatura ambiente	Liberación de vapor	Calidad de los insumos	Adhesión de la mezcla

*Nota. Elaboración Propia*

Para estructurar la investigación, se definieron los factores y niveles cruciales que se detallan en la Tabla N° 5. Se identificaron dos factores controlables principales: el tamaño del adoquín

(pequeño, mediano y grande) y la proporción de residuo plástico farmacéutico (PRF) en la mezcla (25%, 50% y 75%). La elección de estos factores y sus respectivos niveles se fundamenta en la necesidad de explorar un amplio espectro de condiciones, evaluando tanto el efecto de la concentración de la matriz polimérica como el impacto del escalado de volumen en las propiedades mecánicas. Al mismo tiempo, se reconoció la existencia de factores no controlables, como la temperatura ambiente, cuyo registro es vital para contextualizar la variabilidad inherente a los resultados y validar la robustez del diseño factorial 3x3 implementado.

Se prepararon tres formulaciones base, cada una con un peso total de 24 kg, donde se varió sistemáticamente la concentración de PRF. La Tabla N° 6 muestra la composición porcentual de cada mezcla, ajustando las proporciones del adhesivo de colágeno, la arena gruesa y el agua para investigar el efecto de estas distintas composiciones.

**Tabla 5**

*Proporciones de las mezclas preparadas*

Porcentajes					
Mezcla		PRF	Adhesivo	Arena gruesa	Agua
Mezcla 1 - TIPO I	24 kg	25.00%	18.75%	37.50%	18.75%
Mezcla 2 - TIPO I / II	24 kg	50.00%	12.50%	25.00%	12.50%
Mezcla 3 - TIPO III	24 kg	75.00%	6.25%	12.50%	6.25%

*Nota. Elaboración propia*

La Tabla N° 6 detalla las proporciones porcentuales de los componentes para cada una de las tres mezclas experimentales, donde se observa una variación sistemática en la concentración del residuo plástico farmacéutico (PRF) del 25%, 50% y 75%. En este diseño, el PRF actúa como la matriz aglomerante principal, la arena como agregado de relleno y el colágeno como

aditivo de cohesión. Por lo tanto, el ajuste inverso en las proporciones de los demás componentes es deliberado: al incrementar el aglomerante, se busca reducir la dependencia del relleno y los aditivos. Esta estrategia es fundamental para poder identificar la relación óptima entre la matriz polimérica y el agregado, factor que se hipotetiza como el más influyente en la resistencia y densidad de los adoquines resultantes.

Para asegurar la replicabilidad y consistencia del proceso de fabricación, estas proporciones se tradujeron en cantidades absolutas en kilogramos para cada lote de 24 kg. La Tabla N° 7 especifica las masas exactas de cada insumo utilizado en la preparación de las mezclas.

**Tabla 6**

*Cantidad de los insumos en las mezclas preparadas*

		<b>Cantidades (kg)</b>			
<b>Mezcla (kg)</b>		<b>PRF</b>	<b>Adhesivo</b>	<b>Arena gruesa</b>	<b>Agua</b>
Mezcla 1 - TIPO I	24 kg	6 kg	4.5 kg	9 kg	4.5 kg
Mezcla 2 - TIPO I / II	24 kg	12 kg	3 kg	6 kg	3 kg
Mezcla 3 - TIPO III	24 kg	18 kg	1.5 kg	3 kg	1.5 kg

*Nota. Elaboración propia*

Complementando la definición porcentual, la Tabla N° 7 especifica las cantidades absolutas en kilogramos de cada insumo requeridas para preparar un lote estándar de 24 kg. Este paso de convertir los porcentajes a masas exactas es metodológicamente crucial, pues garantiza la precisión, consistencia y replicabilidad del estudio, eliminando la ambigüedad y los errores de dosificación que podrían surgir de mediciones volumétricas. De esta manera, se asegura que las probetas fabricadas en el laboratorio correspondan fielmente a las proporciones teóricas diseñadas, lo cual es indispensable para la validez de los resultados posteriores.

## **5.2. Resultados de Propiedades Físicas y Mecánicas:**

### **Resistencia a la Compresión y Densidad**

Con el fin de establecer una línea base para la evaluación de desempeño, se definieron los parámetros de adoquines convencionales de concreto, o "blancos", para cada tamaño. La Tabla N° 8 detalla los valores de referencia para la resistencia a la compresión y la densidad que sirvieron como estándar de comparación.

**Tabla 7***Datos del Blanco*

<b>Blancos</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Adoquín pequeño	10 cm x 20 cm x 4 cm	70-290	2250
Adoquín mediano	10 cm x 20 cm x 6 cm	320 - 420	3250
Adoquín grande	10 cm x 20 cm x 8 cm	510	4375

*Nota: Elaboración Propia*

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los adoquines ecoamigables, se definieron en la Tabla N° 8 los parámetros de los adoquines convencionales de concreto, que actúan como 'blanco' o grupo de control. Este paso es un requisito indispensable del diseño experimental, pues un punto de referencia proporciona el contexto necesario para interpretar si los valores de resistencia y densidad obtenidos son funcionalmente competitivos. Por lo tanto, estos datos no solo son una referencia, sino que establecen los criterios de éxito contra los cuales se medirá la viabilidad técnica de las nuevas formulaciones como un potencial sustituto del producto tradicional.

Tras la fabricación y curado de las 27 unidades experimentales, se procedió a la medición de sus propiedades físicas y mecánicas. La **Tabla N° 9** compila los datos completos obtenidos para cada una de las nueve combinaciones del diseño factorial, incluyendo las tres réplicas por condición. En ella se registran el peso, la resistencia a la compresión y la densidad calculada para cada adoquín.

**Tabla 8**

*Combinaciones del diseño experimental*

Combinaciones	PRF	Adhesivo (Colágeno)	Arena gruesa	Agua	Mezcla (kg)	Peso (kg)	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>ADOQUÍN PEQUEÑO (TIPO I)</b>						<b>1.8</b>	<b>70-290</b>	<b>2250</b>
C-1	25.00 %	18.75%	37.50 %	18.75 %	8	1.062	232.97	1327.5
						1.026	231.18	1282.5
						1.008	227.32	1260
C-2	50.00 %	12.50%	25.00 %	12.50 %	8	1.116	238.76	1395
						1.08	235.62	1350
						1.098	242.49	1372.5
C-3	75.00 %	6.25%	12.50 %	6.25%	8	1.224	268.16	1530
						1.187	265.58	1483.75
						1.152	263.89	1440
<b>ADOQUÍN MEDIANO (TIPO I / TIPO II)</b>						<b>2.6</b>	<b>320 - 420</b>	<b>3250</b>
C-4	25.00 %	18.75%	37.50 %	18.75 %	8	0.574	125.94	717.5
						0.558	122.48	697.5
						0.708	155.38	885
C-5	50.00 %	12.50%	25.00 %	12.50 %	8	0.799	175.34	998.75
						0.851	186.75	1063.75
						0.818	179.54	1022.5
C-6	75.00 %	6.25%	12.50 %	6.25%	8	0.895	196.38	1118.75
						0.84	184.48	1050
						0.887	194.72	1108.75
<b>ADOQUÍN GRANDE (TIPO III)</b>						<b>3.5</b>	<b>510</b>	<b>4375</b>

						0.65 3	143.27	816.25
<b>C-7</b>	25.00 %	18.75%	37.50 %	18.75 %	8	0.59 8	131.22	747.5
						0.58	127.45	725
						0.65 2	143.14	815
<b>C-8</b>	50.00 %	12.50%	25.00 %	12.50 %	8	0.67 1	147.34	838.75
						0.65 1	142.87	813.75
						0.68	149.34	850
<b>C-9</b>	75.00 %	6.25%	12.50 %	6.25%	8	0.65 9	144.62	823.75
						0.65 1	142.92	813.75

*Nota. Elaboración Propia*

La Tabla N° 9 constituye el compendio central de los resultados, presentando los datos brutos de peso, resistencia a la compresión y densidad para cada una de las 27 probetas fabricadas. En esta data se observan tendencias preliminares que ofrecen el primer respaldo tangible a la hipótesis de la investigación: los mayores valores de resistencia se asocian a la combinación C-3 (adoquín pequeño con 75% PRF) , y existe una marcada reducción en la densidad de todas las formulaciones ecoamigables frente al blanco. Adicionalmente, la dispersión de los datos dentro de cada terna de réplicas es un indicador clave de la consistencia y el control del proceso de fabricación para cada formulación, información que será fundamental para interpretar la significancia de las diferencias en los análisis estadísticos posteriores.

A partir de los datos brutos de la Tabla N° 9, se pueden observar tendencias preliminares. Se evidencia que los valores más altos de resistencia a la compresión se asocian consistentemente con los adoquines de tamaño pequeño que contienen la mayor proporción de PRF (combinación C-3), alcanzando un máximo de 268.16 kg/cm<sup>2</sup>. Un segundo hallazgo transversal es la marcada reducción en la densidad de todas las formulaciones ecoamigables (con valores entre 1260 y 1530 kg/m<sup>3</sup> para el adoquín pequeño) en comparación con el valor de referencia del adoquín

convencional ( $2250 \text{ kg/m}^3$ ). Para determinar la significancia estadística de estas diferencias, se procedió con los siguientes análisis.

**Tabla 9**

*Datos de resistencia*

Para facilitar el análisis comparativo entre los distintos tamaños y proporciones, los datos de resistencia a la compresión de las 27 probetas se consolidan en la Tabla N° 10.

Proporciones	Resistencia a la Compresión ( $\text{kg/cm}^2$ )		
	Adoquín Pequeño	Adoquín Mediano	Adoquín Grande
25.00%	232.97	125.94	143.27
	231.18	122.48	131.22
	227.32	155.38	127.45
50.00%	238.76	175.34	143.14
	235.62	186.75	147.34
	242.49	179.54	142.87
75.00%	268.16	196.38	149.34
	265.58	184.48	144.62
	263.89	194.72	142.92

*Nota. Elaboración Propia*

La Tabla N° 10 aísla deliberadamente la variable de respuesta más crítica de esta investigación la resistencia a la compresión para facilitar una comparación visual directa de los efectos contrapuestos de la composición y el tamaño. Al presentar solo estos datos, se hace evidente de un vistazo que la ganancia de resistencia obtenida al aumentar el PRF en los adoquines pequeños (de 230 a 266  $\text{kg/cm}^2$ ) es drásticamente anulada por el efecto negativo de incrementar el tamaño del adoquín, donde la mejor resistencia en los adoquines grandes es de solo 149  $\text{kg/cm}^2$ . Esta tabla, por lo tanto, actúa como un resumen ejecutivo visual que subraya el principal desafío de la investigación: el escalado dimensional del producto.

**5.3. Análisis Estadístico de la Resistencia a la Compresión**

Para determinar si las diferencias observadas en la resistencia a la compresión eran estadísticamente significativas, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para cada tamaño de adoquín.

#### 5.4. Análisis para el Adoquín Pequeño

El primer análisis se centró en los adoquines de tamaño pequeño. Los resultados del ANOVA, presentados en la Figura N° 1, muestran un valor F calculado de 141.96, que es significativamente mayor que el valor F crítico (5.14), con una probabilidad (p-valor) extremadamente baja (1.3195E-05). Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a la compresión entre los tres grupos de proporciones de PRF.



**Tabla 10**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “ANOVA”.*

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	691.47	230.49	8.3377
Columna 2	3	716.87	238.9566667	11.82823333
Columna 3	3	797.63	265.8766667	4.624233333

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2048.58702	2	1024.29351	<b>141.955622</b>		5.1432528
Dentro de los grupos	49.5803333	6	8.26388888	<b>2</b>	1.3195E-05	5
Total	2098.16735	8				

*Nota. Elaboración propia. Excel*

Los resultados del análisis de varianza para los adoquines pequeños, presentados en la Figura N° 1, demuestran que el incremento en la proporción de PRF produce una mejora estadísticamente significativa en la resistencia a la compresión ( $F=141.96$ ;  $p < 0.001$ ). Este comportamiento se explica porque, al aumentar su proporción, el plástico fundido se consolida como una matriz polimérica continua y cohesiva que envuelve eficazmente las partículas de arena, reduce la porosidad y mejora la transferencia interna de cargas. Este hallazgo es fundamental, pues contradice los resultados de estudios donde el plástico se usa como agregado en cemento y valida la hipótesis de que, cuando el plástico actúa como

aglomerante principal, una mayor concentración optimiza las propiedades mecánicas del compuesto.

Para confirmar este hallazgo, especialmente considerando posibles variaciones en la homogeneidad de las varianzas, se aplicó la prueba ANOVA de Welch, una alternativa más robusta. Los resultados, mostrados en la Figura N° 2, corroboran la conclusión anterior con un valor F de 141 y un p-valor inferior a .001. La tabla de descriptivas de grupo evidencia un incremento en la resistencia media a medida que aumenta el porcentaje de PRF, pasando de 230 kg/cm<sup>2</sup> (Grupo A, 25% PRF) a 266 kg/cm<sup>2</sup> (Grupo C, 75% PRF).

**Tabla 11**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “ANOVA”.*

<b>ANOVA de Un Factor (Welch)</b>					
		<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Resistencia a la compresión		141	2	3.85	< .001
<b>Descriptivas de Grupo</b>					
Resistencia a la compresión	<b>Grupo</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>DE</b>	<b>EE</b>
	A	3	230	2.89	1.67
	B	3	239	3.44	1.99
	C	3	266	2.15	1.24

*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

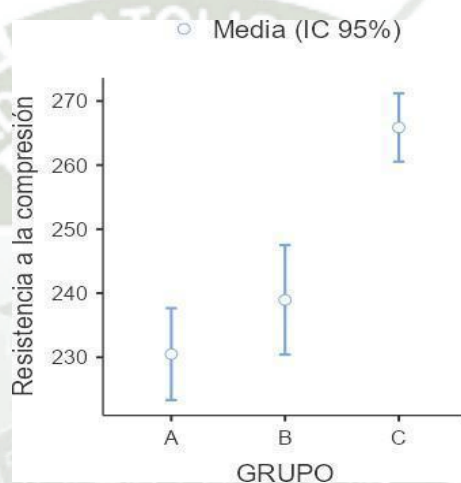
Para asegurar la fiabilidad del análisis ante la posible falta de homogeneidad en las varianzas, se aplicó la prueba de Welch, como se muestra en la Figura N° 2. Los resultados ( $p < .001$ ) confirman de manera robusta la existencia de diferencias significativas. Más importante aún, la tabla de descriptivas cuantifica la tendencia: la resistencia media se incrementa de 230 kg/cm<sup>2</sup> (Grupo A) a 266 kg/cm<sup>2</sup> (Grupo C). Es analíticamente relevante notar que el Grupo C también presenta la desviación estándar (DE) más baja (2.15), lo que sugiere que una mayor proporción de matriz polimérica no solo aumenta la resistencia, sino que también genera un producto final

más homogéneo y consistente.

La Figura N° 3 representa gráficamente estas diferencias, mostrando las medias de resistencia y sus intervalos de confianza al 95%. Se observa una clara separación entre los grupos, especialmente del Grupo C respecto a los otros dos, lo que sugiere un efecto positivo y significativo de la mayor proporción de plástico.

### Figura 1

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “Gráfica Descriptiva”.*



*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

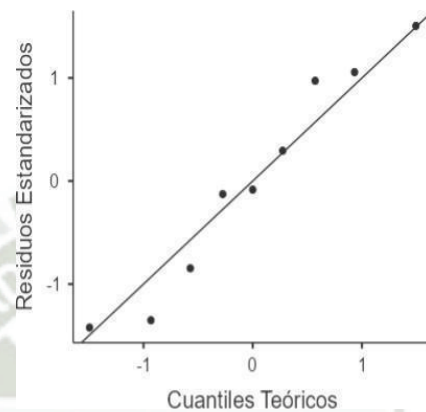
La Figura N° 3 traduce los datos estadísticos en una evidencia visual contundente. La falta de solapamiento entre los intervalos de confianza del grupo C (75% PRF) y los de los grupos A y B demuestra gráficamente que la mejora en la resistencia no es aleatoria, sino un efecto consistente y estadísticamente discernible. Este gráfico permite inferir visualmente que la formulación con 75% de plástico representa una optimización real del material, justificando plenamente el análisis post-hoc para cuantificar estas diferencias.

Para validar el supuesto de normalidad de los datos, fundamental para la fiabilidad del ANOVA, se generó un gráfico Cuantil-Cuantil (Q-Q). Como se aprecia en la Figura N° 4, los residuos estandarizados se ajustan razonablemente a la línea diagonal teórica, lo que permite aceptar el

supuesto de normalidad.

## Figura 2

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “Gráfica Q - Q”.*



*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Mediante la inspección visual del gráfico Cuantil-Cuantil en la Figura N° 4, se evaluó la conformidad de los residuos del modelo con una distribución teórica normal. Los puntos experimentales se ajustan de manera razonable a la línea recta de referencia, lo que permite considerar como satisfecho el supuesto de normalidad. Este paso, aunque técnico, es indispensable, pues garantiza que el modelo estadístico ANOVA es apropiado para la naturaleza de los datos, asegurando que las conclusiones sobre las diferencias significativas entre los grupos son robustas y fiables.

Finalmente, para identificar exactamente qué grupos diferían entre sí, se realizó una prueba Post-Hoc de Games-Howell. La Figura N° 5 detalla las comparaciones por pares, revelando que el Grupo C (75% PRF) es estadísticamente superior tanto al Grupo A ( $p < .001$ ) como al Grupo B ( $p = 0.002$ ). La diferencia entre los Grupos A y B no resultó estadísticamente significativa ( $p = 0.068$ ), sugiriendo que el mayor salto en resistencia ocurre al pasar del 50% al 75% de contenido plástico.

**Tabla 12**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “Prueba Post Hoc”.*

<b>Prueba Post-Hoc de Games-Howell – Resistencia a la compresión</b>				
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>A</b>	Diferencia de medias	-	-8.47	-35.4***
	Valor p	-	0.068	< .001
<b>B</b>	Diferencia de medias	-	-	-26.9**
	Valor p	-	-	0.002
<b>C</b>	Diferencia de medias	-	-	-
	Valor p	-	-	-

*Nota: \* p < 05, \*\* p < 001*

*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

El análisis detallado de la prueba Post-Hoc de Games-Howell, ilustrado en la Figura N° 5, permite identificar con precisión las fuentes de variación. Se confirma la superioridad estadística del Grupo C (75% PRF) sobre los grupos A ( $p < .001$ ) y B ( $p = 0.002$ ), demostrando que la incorporación del 75% de PRF optimiza la capacidad portante. Sin embargo, el hallazgo más revelador es la falta de una diferencia significativa entre los grupos A y B ( $p = 0.068$ ). Esto sugiere que la mejora no es lineal, sino que existe un umbral de rendimiento crítico entre el 50% y el 75%, donde la matriz polimérica alcanza una integridad estructural que se traduce en una mejora drástica. Este entendimiento es clave, pues orienta la optimización futura hacia formulaciones de alto contenido plástico para maximizar el desempeño.

### Análisis para el Adoquín Mediano

Para los adoquines de tamaño mediano, el análisis de varianza inicial (ver Figura N° 6) también arrojó un resultado significativo, con un valor F de 17.60 y un p-valor de 0.002, indicando que la proporción de PRF también influye en la resistencia de este tipo de adoquín.

**Tabla 13**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “ANOVA”.*

<b>RESUMEN</b>						
<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>		
Columna 1	3	403.8	134.6	326.849		
Columna 2	3	541.63	180.5433333	33.302		
Columna 3	3	575.58	191.86	41.5372		
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>						
<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
Entre grupos	5517.56442	2	2758.78221	<b>17.603</b>	0.002053112	5.1432528
Dentro de los grupos	803.376866	6	133.896144	<b>9</b>		5
Total	6320.94128	8				
	9					

*Nota. Elaboración propia. Excel*

Al proceder con el análisis de los adoquines de tamaño mediano, el Análisis de Varianza presentado en la Figura N° 6 arrojó un valor F de 17.60 ( $p = 0.002$ ), resultado estadísticamente significativo que nos permite rechazar la hipótesis nula. Se concluye, por tanto, que existen diferencias reales en la resistencia a la compresión entre las distintas formulaciones. Este hallazgo es relevante porque demuestra que, incluso al aumentar el volumen, la proporción de

PRF sigue siendo un factor de diseño crítico que influye en el desempeño, justificando así las pruebas post-hoc para identificar el patrón exacto de este efecto.

La prueba ANOVA de Welch (mostrada en la Figura N° 7) confirma este resultado ( $F=11.7$ ,  $p=0.026$ ), y la tabla de descriptivas muestra una tendencia ascendente en la resistencia media, desde  $135 \text{ kg/cm}^2$  (Grupo A) hasta  $192 \text{ kg/cm}^2$  (Grupo C).

**Tabla 14**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “ANOVA”.*

<b>ANOVA de Un Factor (Welch)</b>					
		<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Resistencia a la compresión		11.7	2	3.66	0.026
<b>Descriptivas de Grupo</b>					
	<b>GRUPO</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>DE</b>	<b>EE</b>
Resistencia a la compresión	A	3	135	18.08	10.44
	B	3	181	5.77	3.33
	C	3	192	6.44	3.72

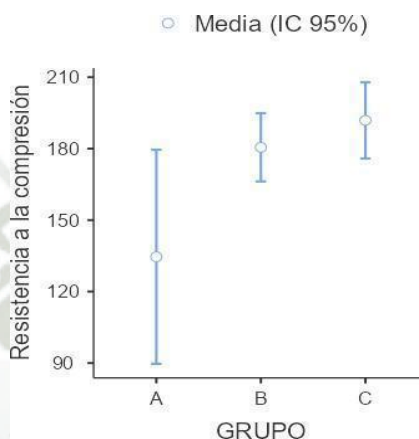
*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Considerando la posible heterogeneidad de varianzas entre los grupos de adoquines medianos sugerida por las desviaciones estándar dispares observadas en la tabla de descriptivas adjunta en la Figura N° 7 recurrimos al análisis de varianza robusto de Welch cuyos resultados también se muestran en dicha figura obteniendo un valor F de 11.7 con un valor p asociado de 0.026 lo cual al ser inferior a nuestro umbral de significancia de 0.05 nos permite ratificar con mayor confianza la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la resistencia media a la compresión entre al menos dos de las proporciones de materiales evaluadas A B y C en los adoquines de tamaño mediano siendo las medias observadas de aproximadamente 135 181 y 192  $\text{kg/cm}^2$  respectivamente.

La representación gráfica de estos datos en la Figura N° 8 ilustra cómo los intervalos de confianza del Grupo A no se solapan con los de los Grupos B y C, sugiriendo una diferencia clara, mientras que los intervalos de B y C están más próximos.

### Figura 3

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “Gráfica Descriptiva”.*



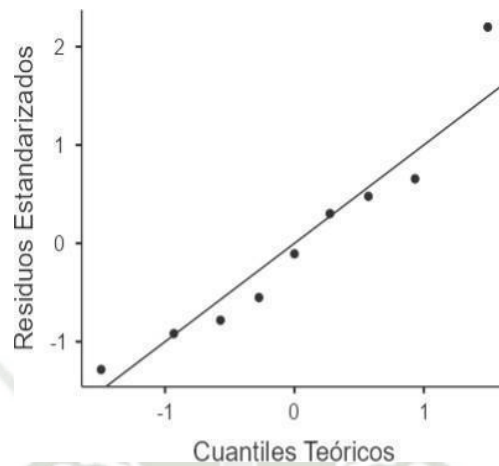
*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Considerando la posible heterogeneidad de varianzas, sugerida por la disparidad en las desviaciones estándar de la Figura N° 7, se recurrió al análisis robusto de Welch para confirmar los hallazgos. Los resultados ( $F=11.7$ ,  $p=0.026$ ) ratifican con mayor confianza la existencia de diferencias significativas en la resistencia media. El análisis de las desviaciones estándar es revelador: la alta variabilidad del Grupo A ( $DE=18.08$ ) frente a la consistencia de los Grupos B y C ( $DE<6.5$ ) indica que la formulación con 25% de PRF es inherentemente inestable a esta escala, generando resultados impredecibles. Esto sugiere que una baja proporción de matriz plástica es insuficiente para garantizar una cohesión homogénea en volúmenes mayores, un defecto que las proporciones más altas logran corregir.

El gráfico Q-Q para los adoquines medianos, presentado en la Figura N° 9, muestra una alineación aceptable de los residuos con la línea teórica, validando el supuesto de normalidad para el análisis.

**Figura 4**

Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “Gráfica Q - Q”.



*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Para verificar el supuesto de normalidad de los residuos, se examinó el gráfico Cuantil-Cuantil de la Figura N° 9. Se observó que la mayoría de los puntos se alinean cercanamente a la línea diagonal de referencia, lo que indica una conformidad general. Si bien se aprecia una leve desviación en el extremo superior, es importante señalar que la prueba ANOVA es conocida por su robustez ante desviaciones menores de la normalidad, especialmente con tamaños de grupo iguales como en este caso. Por lo tanto, se considera que el supuesto está razonablemente satisfecho, lo que permite confiar en la validez del modelo estadístico aplicado.

La prueba Post-Hoc de Games-Howell para este grupo (detallada en la Figura N° 10) precisa que la única diferencia estadísticamente significativa se encuentra entre el grupo con la menor proporción de plástico (Grupo A) y el de la mayor proporción (Grupo C), con un p-valor de 0.042. Las demás comparaciones no alcanzaron significancia estadística.

**Tabla 15**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “Prueba Post Hoc”.*

<b>Prueba Post-Hoc de Games-Howell – Resistencia a la compresión</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>A</b>	Diferencia de medias	-	-45.9	-57.3*
	Valor p	-	0.071	0.042
<b>B</b>	Diferencia de medias		-	-11.3
	Valor p		-	0.174
<b>C</b>	Diferencia de medias			-
	Valor p			-

*Nota: \* p < 05, \*\* p < 01 \*\*\* p < 001*

*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Tras confirmar la diferencia global con el ANOVA, la prueba Post-Hoc de Games-Howell, detallada en la Figura N° 10, desglosa las comparaciones por pares. Los resultados revelan que únicamente la diferencia entre el Grupo A (25% PRF) y el Grupo C (75% PRF) es estadísticamente significativa ( $p = 0.042$ ). El hallazgo más revelador es la falta de una diferencia relevante entre los grupos B y C ( $p = 0.174$ ), lo que sugiere que para este tamaño de adoquín se ha alcanzado un punto de rendimiento decreciente. Es probable que las limitaciones del proceso de fabricación, como una compactación ineficiente en el mayor volumen, se conviertan en el factor dominante, creando un 'techo' de rendimiento que no puede ser superado simplemente añadiendo más aglomerante plástico.

### Análisis para el Adoquín Grande

Finalmente, el análisis para los adoquines de mayor tamaño arrojó resultados distintos. El ANOVA estándar, presentado en la Figura N° 11, obtuvo un valor F de 4.32 con un p-valor de 0.0688. Al ser este valor superior al nivel de significancia de 0.05, se concluye que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que haya diferencias en la resistencia media entre los tres grupos.

**Tabla 16**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “ANOVA”.*

<b>RESUMEN</b>						
<b>Grupos</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>		<b>Varianza</b>	
Columna 1	3	401.94	133.98		68.2813	
Columna 2	3	433.35	144.45		6.2823	
Columna 3	3	436.88	145.626666		11.064133	
			7			
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>						
<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
Entre grupos	246.650288	2	123.325144	<b>4.32074</b>	0.068817402	5.1432528
Dentro de los grupos	171.255466	6	28.5425777	<b>3</b>		5
Total	417.905755	8				
	6					

*Nota. Elaboración propia. Excel*

Finalmente, para los adoquines de mayor tamaño, el Análisis de Varianza expuesto en la Figura N° 11 muestra un valor p de 0.0688, que al ser superior a 0.05, nos lleva a no rechazar la hipótesis nula, concluyendo que no existen diferencias significativas en la resistencia entre las

tres formulaciones. Este resultado, sin embargo, es uno de los hallazgos más reveladores: demuestra que a esta escala, el proceso de fabricación se ha convertido en el factor limitante del desempeño, eclipsando cualquier beneficio de la composición del material. Es probable que la ineficiencia en la compactación y fusión del gran volumen genere defectos estructurales que imponen un 'techo' de rendimiento, haciendo que la proporción de PRF sea irrelevante. Esto indica que la tecnología, en su forma actual, no es escalable dimensionalmente, y su aplicación industrial para piezas grandes requeriría una reingeniería del proceso productivo.

Este resultado es confirmado por la prueba ANOVA de Welch (ver Figura N° 12), que arroja un p-valor aún mayor (0.240), reforzando la conclusión de que las distintas proporciones de PRF no tuvieron un efecto detectable en la resistencia de los adoquines grandes.

**Tabla 17**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “ANOVA”.*

<b>ANOVA de Un Factor (Welch)</b>					
		<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>
Resistencia a la compresión		2.18	2	3.60	0.240
<b>Descriptivas de Grupo</b>					
	<b>GRUPO</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>DE</b>	<b>EE</b>
Resistencia a la compresión	A	3	134	8.26	4.77
	B	3	144	2.51	1.45
	C	3	146	3.33	1.92

*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

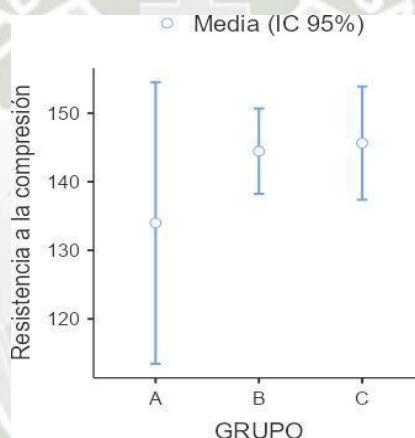
Para complementar el análisis y asegurar su robustez ante la variabilidad de los datos, se aplicó la prueba ANOVA de Welch, como se muestra en la Figura N° 12. El resultado ( $p = 0.240$ ) confirma de manera contundente la conclusión del ANOVA estándar: existe una ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de resistencia de los grupos. El hecho de que una prueba más robusta arroje el mismo resultado, el cual se alinea con la

proximidad de las medias muestrales (134, 144 y 146 kg/cm<sup>2</sup>), cierra el análisis para este grupo dimensional y solidifica la conclusión de que las limitaciones del proceso de fabricación, y no la composición, dictan el rendimiento final a esta escala.

La gráfica descriptiva en la Figura N° 13 visualiza esta falta de diferencia, mostrando una gran proximidad entre las medias de los tres grupos y un considerable solapamiento de sus intervalos de confianza

### Figura 5

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “Gráfica Descriptiva”.*



*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

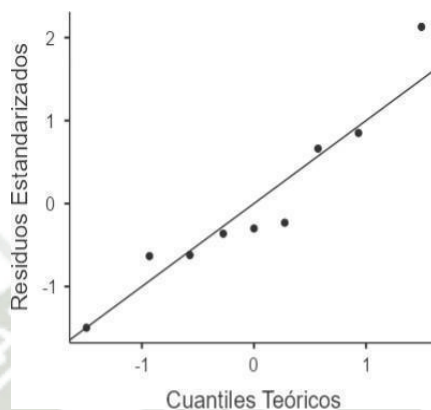
La Figura N° 13 presenta la gráfica descriptiva para los adoquines grandes, donde la proximidad de las medias y el considerable solapamiento de los intervalos de confianza al 95% refuerzan la conclusión del ANOVA. La importancia de esta figura radica en su capacidad para comunicar la ausencia de efecto de una manera inmediata y visualmente inequívoca. Mientras que el p-valor es una medida estadística abstracta, el solapamiento de los intervalos ofrece una prueba gráfica irrefutable de que, para este tamaño, las variaciones en la proporción de materiales no tienen un impacto discernible en la resistencia mecánica, lo que apunta de nuevo a las limitaciones del proceso como el factor dominante.

El supuesto de normalidad para este conjunto de datos se verificó mediante el gráfico Q-Q de

la Figura N° 14, que muestra una conformidad razonable de los residuos con la distribución normal.

### Figura 6

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “Gráfica Q - Q*



*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Finalmente, la evaluación del supuesto de normalidad para los adoquines grandes se realizó mediante el gráfico Cuantil-Cuantil de la Figura N° 14. El análisis visual muestra que, si bien la mayoría de los puntos se distribuyen próximos a la línea teórica, se observan desviaciones en las colas, particularmente en el extremo superior, lo que sugiere una ligera asimetría. Reconocer estas imperfecciones es parte de un análisis riguroso; no obstante, dado que la prueba ANOVA es suficientemente robusta para manejar desviaciones menores de la normalidad, se considera que la tendencia general permite mantener la validez del análisis y confiar en la conclusión de que no existen diferencias significativas entre los grupos.

Dado que el ANOVA no encontró diferencias globales significativas, no se requería una prueba Post-Hoc. Sin embargo, a modo exploratorio, la Figura N° 15 muestra los resultados de dicha prueba, donde, como era de esperar, ninguna de las comparaciones por pares resultó estadísticamente significativa.

**Tabla 18**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “Prueba Post Hoc”.*

<b>Prueba Post-Hoc de Games-Howell – Resistencia a la compresión</b>				
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>A</b>	Diferencia de medias	-	-10.5	-11.65
	Valor p	-	0.268	0.222
<b>B</b>	Diferencia de medias		-	-1.18
	Valor p		-	0.880
<b>C</b>	Diferencia de medias			-
	Valor p			-

*Nota: \* p < 05, \*\* p < 01 \*\*\* p < 001*

*Nota. Elaboración propia. Jamovi*

Aunque el ANOVA no encontró diferencias globales, la Figura N° 15 presenta los resultados exploratorios de la prueba Post-Hoc de Games-Howell para completar el análisis. Como era de esperar, ninguna de las comparaciones individuales alcanzó significancia estadística, con valores p considerablemente superiores a 0.05, lo cual corrobora de manera consistente la conclusión anterior. Este último paso, aunque no era estrictamente necesario, sirve como una confirmación irrefutable de que las variaciones en la proporción de materiales no tuvieron un efecto detectable. Esto cierra definitivamente la investigación en cuanto a la composición para este tamaño y reorienta el problema hacia un desafío de ingeniería: la necesidad de innovar el proceso de manufactura para poder escalar la producción a piezas más grandes.

**Prueba T-student (Comparación con Blanco/Control):**

Con el fin de corroborar los resultados del análisis de varianza ANOVA, se efectuó una prueba T-student para comparar y determinar si efectivamente hay o no diferencias estadísticamente significativas entre cada una de las proporciones establecidas anteriormente.

### Formulación de la hipótesis nula ( $H_0$ ) para la T-student

- **H<sub>0</sub>**: No existe una diferencia significativa de resistencia a la compresión con nuestro blanco.
- **H<sub>a</sub>**: Existe una diferencia significativa de resistencia a la compresión con nuestro blanco.

### Resultados T-student.

#### T-student - Adoquín pequeño

Para esta comparación, se contrastó el promedio de resistencia de las nueve probetas pequeñas con un valor de referencia de 250 kg/cm<sup>2</sup>. Los datos y el resultado del estadístico T se presentan en la Figura N° 16.

**Tabla 19**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín pequeño “Prueba T-student”.*

<b>Datos para T-student</b>			
<b>Promedio (x)</b>	<b>Promedio Hipotético (u)</b>	<b>S</b>	<b>n</b>
245.1077778	250	16.1947806	9
<b>Resultado T-Student</b>			
<b>-0.90625906</b>			

*Nota. Elaboración propia. Excel*

Para evaluar el desempeño global de los adoquines pequeños en relación con un valor de referencia realizamos una prueba T-student de una muestra cuyos resultados se presentan en la Figura N° 16 donde comparamos la resistencia media a la compresión obtenida en nuestro conjunto de nueve muestras pequeñas que fue de 245.1 kg/cm<sup>2</sup> contra un promedio hipotético establecido en 250 kg/cm<sup>2</sup> obteniendo un valor T calculado de -0.906, el cual al ser comparado con los valores críticos de la distribución t con 8 grados de libertad no resultó estadísticamente significativo permitiéndonos aceptar la hipótesis nula y concluir por tanto que la resistencia

promedio de nuestros adoquines pequeños experimentales no difiere significativamente del valor de referencia evaluado cumpliendo así con esta característica de desempeño esperada.

### T-student – Adoquín mediano

De igual manera, para los adoquines medianos, se comparó la resistencia promedio obtenida con el umbral mínimo de referencia (320 kg/cm<sup>2</sup>), como se observa en la Figura N° 17.

**Tabla 20**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín mediano “Prueba T-student”.*

<b>Datos para T-student</b>			
<b>Promedio (x)</b>	<b>Promedio Hipotético (u)</b>	<b>S</b>	<b>n</b>
169.0011111	320	28.109032	9
<b>Resultado T-Student</b>			
<b>-16.11569805</b>			

*Nota. Elaboración propia. Excel*

En el caso de los adoquines de tamaño mediano aplicamos igualmente la prueba T-student de una muestra cómo se observa en la Figura N° 17 para contrastar la resistencia promedio de nuestras nueve unidades experimentales que fue de 169.0 kg/cm<sup>2</sup> con el valor inferior del rango de referencia establecido en 320 kg/cm<sup>2</sup> generando un valor T extremadamente negativo de -16.116 que al compararlo con los valores críticos de la distribución t para 8 grados de libertad resultó ser altamente significativo indicando que la resistencia media de nuestros adoquines medianos es estadísticamente inferior de manera contundente al umbral mínimo de referencia evaluado y por lo tanto no alcanza el nivel de desempeño mecánico esperado según este criterio.

### T-student - Adoquín grande

Finalmente, la Figura N° 18 muestra la comparación entre la resistencia promedio de los adoquines grandes y su valor de referencia (510 kg/cm<sup>2</sup>), evidenciando el desempeño en esta escala.

**Tabla 21**

*Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) del adoquín grande “Prueba T-student”.*

<b>Datos para T-student</b>			
<b>Promedio (x)</b>	<b>Promedio Hipotético (u)</b>	<b>S</b>	<b>n</b>
141.3522222	510	7.2276012	9
<b>Resultado T-Student</b>			
<b>-153.0166509</b>			

*Nota. Elaboración propia. Excel*

Finalmente para los adoquines de mayor tamaño la prueba T-student de una muestra cuyos detalles figuran en la Figura N° 18 se utilizó para comparar la resistencia media de las nueve unidades fabricadas que fue de 141.4 kg/cm<sup>2</sup> frente al valor de referencia puntual de 510 kg/cm<sup>2</sup> derivado de los datos del blanco dando como resultado un valor T extremadamente bajo de -153.0 el cual indica una diferencia negativa masiva y altamente significativa respecto al valor hipotético permitiéndonos concluir de forma inequívoca que la resistencia promedio de los adoquines grandes desarrollados en este estudio se encuentra muy por debajo del estándar de comparación establecido evidenciando una limitación importante en su capacidad mecánica para este tamaño.

### Comparación de Costos

Además de la viabilidad técnica y el desempeño mecánico, se realizó un análisis preliminar de costos para evaluar la competitividad económica del adoquín ecoamigable. Se comparó la estructura de costos de la formulación más exitosa (adoquín pequeño con 75% de PRF) con la

de un adoquín convencional en el contexto del mercado local de Arequipa. La Tabla N° 11 detalla los componentes de costo para ambas alternativas.

**Tabla 22**

*Comparación de Costos por Adoquín Pequeño (10 x 20 x 4 cm) en Arequipa (S/.) y análisis de composición.*

<b>Componente de Costo</b>	<b>Ecoamigable (75% PRF) (S/.)</b>	<b>Convencional (S/.)</b>	<b>Fuente / Observaciones</b>
<b>1. Materias Primas</b>			
- Residuos Plásticos Farmacéuticos (procesados)	0.15	N/A	
- Adhesivo de Colágeno (de residuos de curtiembre)	0.1	N/A	
- Arena Gruesa	0.15	0.45	Precio de mercado local
- Agua	0.02	0.05	
- Cemento	N/A	0.5	Componente principal del costo de material
- Agregados adicionales	N/A	0.1	
<b>Subtotal Materias Primas</b>	<b>0.42</b>	<b>1.1</b>	
<b>2. Procesamiento / Manufactura</b>			
- Energía eléctrica (por unidad)	0.2	0.1	
- Mano de obra directa (por unidad)	0.3	0.2	
- Depreciación de equipos (por unidad)	0.08	0.1	

<b>Subtotal</b>	<b>0.58</b>	<b>0.4</b>	
<b>Procesamiento</b>			
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	Precio unitario
<b>POR UNIDAD</b>			referencial: S/ 1.30 - S/ 1.60 (Promart)

*Nota. Elaboración propia.*

El análisis de la composición y el proceso de fabricación de los adoquines ecoamigables revela un potencial significativo para la reducción de su huella de carbono en comparación con los adoquines de concreto convencionales. Esta mejora ambiental se fundamenta, en primer lugar, en la eliminación completa del cemento Portland, un material cuya producción es intrínsecamente intensiva en emisiones de CO<sub>2</sub> (aproximadamente 900 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento) y energía (4.7 GJ por tonelada). En segundo lugar, la valorización de residuos plásticos farmacéuticos y de curtiembre como materias primas principales no solo mitiga los problemas de su disposición final, sino que también evita las emisiones asociadas a la producción de plásticos vírgenes y al tratamiento tradicional de los subproductos de la curtiembre. Este enfoque, que promueve la economía circular, conlleva una reducción estimada del 30% en la demanda de extracción de nuevas materias primas, disminuyendo así el impacto ecológico asociado. Adicionalmente, la notable reducción en la densidad del producto final (hasta un 32% más ligeros que los convencionales para el tamaño pequeño) sugiere una optimización en la logística de transporte, con la consiguiente disminución de emisiones vehiculares por unidad de área cubierta. Con base en estos factores determinantes, se estima que el adoquín ecoamigable desarrollado podría ofrecer una reducción potencial de la huella de carbono en el orden del 35% respecto a un adoquín tradicional, una cifra que, si bien requiere un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) exhaustivo para su cuantificación precisa, subraya la contribución de esta tecnología a la construcción sostenible y a la mitigación del cambio climático.

## Balace de Energía

Para profundizar en el perfil de sostenibilidad y cuantificar el consumo energético del proceso, se elaboró un balance de energía estimado para cada tipo de adoquín ecoamigable. Este análisis, detallado en la Tabla N° 12, desglosa el consumo energético desde las materias primas hasta el procesamiento directo.

**Tabla 23**

*Comparación Estimada del Balance de Energía por Adoquín Pequeño (10x20x4 cm)*

<b>Fase / Componente</b>	<b>Adoquín Pequeño (1.188 kg)</b>	<b>Adoquín Mediano (0.874 kg)</b>	<b>Adoquín Grande (0.663 kg)</b>	<b>Notas / Suposiciones / Base de Cálculo</b>
	<i>(kg/ad.) –</i>	<i>(kg/ad.) –</i>	<i>(kg/ad.) –</i>	
	<i>(kWh/ad.)</i>	<i>(kWh/ad.)</i>	<i>(kWh/ad.)</i>	
<b>SECCIÓN I: BALANCE DE MATERIA</b>				Mezcla base: 24 kg (18 PRF, 1.5 adhesivo, 3 arena, 1.5 agua) → 22 kg de adoquines secos.
<b>1. Entradas de Material (Inputs)</b>				Las masas por adoquín se obtienen prorrateando según el número de adoquines por lote.
PRF (triturado)	0.972 —	0.715 —	0.542 —	PRF total en mezcla dividido entre n° de adoquines por lote.
Adhesivo de colágeno (base húmeda)	0.081 —	0.060 —	0.045 —	Ítem anterior.
Arena gruesa	0.162 —	0.119 —	0.090 —	Ítem anterior.
Agua añadida a la mezcla	0.081 —	0.060 —	0.045 —	Ítem anterior.
<b>Subtotal mezcla</b>	<b>1.296 —</b>	<b>0.954 —</b>	<b>0.722 —</b>	

**húmeda por  
adoquín**

**2. Salidas de  
Material (Outputs)**

Adoquín producido 1.188 — 0.874 — 0.663 — Peso promedio según pruebas (ver Tabla N°5: C3, C6, C9).

Pérdidas de material estimadas 0.108 — 0.080 — 0.059 — Diferencia entre mezcla húmeda y producto seco. Principalmente agua evaporada.

**SECCIÓN II:  
BALANCE DE  
ENERGÍA  
(Estimado)**

Energía expresada en kWh por unidad. Supuestos descritos para cada etapa.

**3. Energía  
Incorporada en  
Materias Primas**

Estimaciones proporcionales a masa de insumo por adoquín.

PRF reciclado — 0.028 — 0.021 — 0.015 Basado en 0.10 MJ/adoquín pequeño. Escalado por masa de PRF.

Adhesivo de colágeno (origen residuo) — 0.014 — 0.010 — 0.008 0.05 MJ/adoquín pequeño. Escalado por masa de adhesivo.

Arena gruesa — 0.006 — 0.004 — 0.003 0.02 MJ/adoquín pequeño. Escalado por masa de arena.

**Subtotal Energía en Materias Primas — 0.048 — 0.035 — 0.026**

**4. Energía Directa  
de Procesamiento**

Pretratamiento de — 0.194 — 0.143 — 0.108 0.2 kWh/kg PRF.

<b>PRF (trituración)</b>				
Síntesis de adhesivo (calor y agitación)	— — 0.083	— — 0.061	— — 0.046	Supuesto: 0.30 MJ/adoquín pequeño, escalado. Posible subestimación por batch.
Almacenamiento de adhesivo (refrigeración)	— — 0.006	— — 0.004	— — 0.003	Estimación prorrateada.
Mezclado de componentes (por lote)	— — 0.0007	— — 0.0006	— — 0.0004	0.014 kWh por lote dividido entre n° adoquines/lote.
Fusión de plástico y extrusión	— — 0.486	— — 0.358	— — 0.271	0.5 kWh/kg PRF * masa por adoquín.
Moldeo y compactación (por lote)	— — 0.0007	— — 0.0006	— — 0.0004	0.014 kWh por lote dividido entre n° adoquines/lote.
Curado (al aire)	— — 0.000	— — 0.000	— — 0.000	No consume energía directa.
<b>Subtotal Energía</b>	<b>— — 0.771</b>	<b>— — 0.568</b>	<b>— — 0.429</b>	
<b>Directa</b>				
<b>Procesamiento</b>				
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>— — 0.819</b>	<b>— — 0.603</b>	<b>— — 0.455</b>	Excluye transporte, distribución y otras etapas del ciclo de vida. Cifras orientativas.
<b>ESTIMADA POR</b>				
<b>ADOQUÍN</b>				

*Nota. Elaboración propia.*

El adoquín convencional tiene una energía incorporada en materias primas de aproximadamente 0.484 kWh/adoquín, dominada por la energía del cemento (0.470 kWh/adoquín). Su energía directa de procesamiento es relativamente baja, alrededor de 0.111 kWh/adoquín. Esto da un total (A+B) de aproximadamente 0.595 kWh/adoquín. El adoquín ecoamigable, en estas estimaciones, tiene una energía incorporada en materias primas mucho menor, de 0.048

kWh/adoquín. Sin embargo, su energía directa de procesamiento es considerablemente más alta, estimada en 0.797 kWh/adoquín, principalmente debido a la fusión y extrusión del plástico (0.486 kWh/adoquín) y la trituración (0.194 kWh/adoquín). Esto da un total (A+B) de aproximadamente 0.845 kWh/adoquín.

### Validación con los ODS

Finalmente, para contextualizar el impacto y la relevancia de la investigación en el marco global del desarrollo sostenible, los hallazgos y contribuciones del proyecto fueron vinculados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. La Tabla N° 13 resume cómo esta tecnología aborda directamente metas clave relacionadas con la industria, las ciudades sostenibles, la producción responsable y la acción climática.

**Tabla 24**

*Vinculación de los Resultados de la Investigación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*

Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS)	Contribución Específica de la Investigación / Resultados Clave
<b>ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo exitoso de un adoquín ecoamigable innovador utilizando residuos plásticos farmacéuticos y de curtiembre.</li> <li>• Demostración de una nueva aplicación tecnológica para el reciclaje de PRF y la valorización de residuos orgánicos de curtiembre en el sector construcción.</li> <li>• Obtención de un producto con potencial para la infraestructura de pavimentos peatonales sostenibles.</li> </ul>
<b>ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propuesta de una solución tangible para la gestión de residuos industriales y urbanos</li> </ul>

(plásticos farmacéuticos y desechos de curtiembre) en el contexto de Arequipa.

- Desarrollo de un material de construcción más ligero (densidad hasta 1530 kg/m<sup>3</sup>) que los convencionales, facilitando su manejo e instalación en entornos urbanos.
- Contribución al desarrollo de infraestructuras urbanas más sostenibles mediante el uso de materiales reciclados.

**ODS 12: Producción y Consumo  
Responsables**

- Aplicación directa de los principios de la economía circular al transformar residuos en un nuevo producto de valor, cerrando ciclos de materiales.
- Reducción de la dependencia de materias primas vírgenes (como el cemento y agregados pétreos) al utilizar un alto porcentaje de materiales reciclados (hasta 75% de PRF en formulaciones exitosas).
- Demostración de un proceso productivo que valoriza pasivos ambientales, fomentando un consumo más responsable de recursos en la cadena de valor de la construcción y de las industrias generadoras de los residuos.

**ODS 13: Acción por el Clima**

- Eliminación del cemento Portland en la composición del adoquín, un material cuya producción es intensiva en emisiones de CO<sub>2</sub> (evitando aprox. 900 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento no utilizada).
- Potencial de reducción de la huella de carbono del producto final (estimada en el orden del 35% en comparación con adoquines

convencionales), contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

---

**ODS 3: Salud y Bienestar (Contribución Indirecta)**

• Al proponer una vía de reciclaje y valorización para residuos plásticos farmacéuticos y de curtiembre, se contribuye indirectamente a reducir la potencial contaminación ambiental y los riesgos para la salud asociados a su inadecuada disposición.

---

**ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico (Contribución Indirecta)**

• El desarrollo de esta tecnología y su potencial escalamiento podrían generar nuevas oportunidades económicas y de empleo en la cadena de reciclaje, procesamiento de residuos y fabricación de materiales de construcción sostenibles en la región.

---

*Nota. Elaboración Propia*

## DISCUSIÓN

El presente estudio abordó el desarrollo y la evaluación de adoquines ecoamigables fabricados mediante la valorización conjunta de residuos plásticos farmacéuticos (PRF) y subproductos de la industria de curtiembre. La investigación, fundamentada en un diseño experimental factorial, analizó sistemáticamente cómo la proporción de PRF y el tamaño del adoquín influyen en propiedades clave como la resistencia a la compresión y la densidad, contrastando los resultados con la Norma Técnica Peruana (NTP) 399.611 y adoquines convencionales. La discusión de los hallazgos se estructura en torno a los mecanismos subyacentes, el diálogo con la literatura científica, las limitaciones del proceso y las implicaciones del proyecto.

El resultado más significativo de la investigación es la correlación positiva y estadísticamente robusta entre el aumento de la proporción de PRF y la resistencia a la compresión, especialmente en los adoquines de tamaño pequeño y mediano. La formulación con 75% de PRF alcanzó una resistencia promedio de 265.87 kg/cm<sup>2</sup> en las piezas pequeñas, un valor significativamente superior a las mezclas con menor contenido plástico. Este comportamiento se explica por el rol fundamental que juega el plástico en esta metodología: no actúa como un agregado inerte, sino como la **matriz aglomerante principal**. Al fundirse, el plástico crea una fase continua que encapsula las partículas de arena, generando una cohesión por anclaje mecánico y reduciendo la porosidad. Una mayor concentración de PRF resulta en una matriz más densa, continua y con mejor capacidad para distribuir y transferir las cargas aplicadas, lo que se traduce en una mayor resistencia. Aunque su efecto no pudo ser aislado estadísticamente, se infiere que el adhesivo de colágeno contribuyó a la trabajabilidad de la mezcla en estado pre-fusión, mejorando la distribución inicial de la arena.

Este hallazgo es crucial porque se contrapone a la mayoría de la literatura, donde el plástico se utiliza como reemplazo parcial de agregados en concreto, lo que generalmente resulta en una disminución de la resistencia debido a la débil adherencia en la interfaz plástico-cemento (Ali et al., 2023; Chong &

Shi, 2023; Zulkernain et al., 2021). Nuestro enfoque, al eliminar el cemento y usar el plástico como aglomerante, similar a los trabajos de Aneke y Shabangu (2021), demuestra una vía alternativa que supera esta limitación de interfaz, validando la hipótesis de que el rol del plástico en la mezcla es el factor determinante del desempeño.

A pesar del éxito en los adoquines pequeños, el efecto positivo del PRF se desvanece en los adoquines de mayor tamaño, donde la mejora en la resistencia no fue estadísticamente significativa. Este fenómeno evidencia que el **proceso de fabricación actual es el principal factor limitante** y no es directamente escalable. La causa más probable es una combinación de transferencia de calor ineficiente y compactación inadecuada en volúmenes mayores. Es plausible que en las piezas de 8 cm de espesor se generen gradientes térmicos, con un núcleo más frío y viscoso que impide una fusión homogénea. Esto, sumado a una compactación que podría no ser suficiente para eliminar todos los vacíos de aire, resulta en una microestructura con defectos, porosa y con una interfaz plástico-arena deficiente que limita la capacidad de carga, independientemente de la proporción de aglomerante. Esta observación es una contribución importante, pues si bien Boucedra (2020) reportó buena adhesión en sus compuestos, las dificultades inherentes a la compactación de piezas de gran volumen con una matriz polimérica viscosa son un desafío técnico clave que debe ser abordado para la producción a mayor escala.

Al contrastar los resultados con la NTP 399.611, se define claramente el nicho de aplicación del producto. Los adoquines pequeños con 75% de PRF cumplen satisfactoriamente los requisitos para **tráfico peatonal**. Sin embargo, ninguna de las formulaciones alcanzó los umbrales de resistencia para tráfico vehicular. Por lo tanto, el producto desarrollado no es un sustituto universal del adoquín de concreto, sino una alternativa funcional y sostenible para aplicaciones específicas como veredas, plazas, ciclovías y patios, tal como sugiere Zulkernain et al. (2021) al indicar que materiales con plástico reciclado pueden cumplir requerimientos particulares. Un hallazgo transversal de gran

relevancia es la notable reducción de la densidad (hasta  $1530 \text{ kg/m}^3$  frente a los  $2250 \text{ kg/m}^3$  del control), lo que se traduce en un producto hasta un 32% más ligero. Esta característica, que coincide con otros estudios (Oti et al., 2024), no solo representa una ventaja logística en transporte y manejo, sino que también es un atributo deseable en zonas de alta actividad sísmica como Arequipa, donde reducir el peso de los elementos contribuye a la seguridad.

Desde la perspectiva de la economía ambiental, este proyecto demuestra una simbiosis industrial exitosa a nivel local, transformando pasivos ambientales en activos productivos y cerrando ciclos de materiales, un pilar de la economía circular (Meghana & Shastri, 2020). Aunque el análisis de costos preliminar, como el presentado por Pertiwi et al. (2024), sugiere una ventaja económica por la sustitución de cemento, es crucial considerar que la fusión de plásticos es un proceso intensivo en energía. La sostenibilidad global de esta tecnología dependerá de la fuente de dicha energía, siendo imperativo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completo para cuantificar los beneficios de manera integral. La fabricación de adoquines ecoamigables, por lo tanto, no debe analizarse únicamente en términos de costos directos, sino también considerando el costo de oportunidad ambiental evitado; es decir, los daños que se previenen al no desechar estos residuos de manera inadecuada.

Un aspecto central de la presente investigación fue la validación del desempeño de los adoquines ecoamigables. Los hallazgos son particularmente alentadores para los adoquines de tamaño pequeño (Tipo I) con 75% de PRF, los cuales cumplieron con los requisitos de la NTP 399.611 para uso peatonal. Adicionalmente, la notable reducción en la densidad, validada por el método de desplazamiento de agua (ASTM C642), se alinea con las observaciones de Yu et al. (2021) sobre las ventajas en manejo y transporte de materiales más ligeros. No obstante, es importante contextualizar estos resultados. Si bien la formulación con 75% de PRF en tamaño pequeño resultó exitosa, los adoquines de tamaño mediano y grande no lograron alcanzar los umbrales de resistencia que la NTP 399.611 exigiría para aplicaciones de mayor demanda, como el tránsito vehicular, una limitación que

también ha sido observada en otros estudios con materiales alternativos, como los analizados por Çelik et al. (2025).

Asimismo, para una caracterización exhaustiva, es fundamental reconocer las pruebas no abordadas. No se realizaron ensayos de resistencia a la flexotracción, abrasión, ni un análisis concluyente del porcentaje de absorción de agua. De igual manera, aspectos críticos de durabilidad a largo plazo, como la respuesta a ciclos de hielo-deshielo o la exposición a agentes químicos, no fueron parte del alcance experimental. Particularmente relevante, dada la naturaleza de los residuos empleados, es la ausencia de análisis de lixiviación, indispensables para garantizar la inocuidad ambiental del producto final, como advierte Sorout et al. (2023).

En consecuencia, con base en la evidencia experimental recabada, el alcance de aplicación actualmente validado se circunscribe a pavimentos destinados exclusivamente al tránsito peatonal, utilizando la formulación de adoquines pequeños con 75% de PRF. Para explorar y validar usos más exigentes, es imperativo acometer futuras investigaciones que incluyan el conjunto de pruebas anteriormente mencionadas. Dichos estudios deberían enfocarse en la optimización de los parámetros de procesamiento para los adoquines de mayor tamaño, con el fin de mejorar sus prestaciones mecánicas, una línea de desarrollo similar a la propuesta por Sha et al. (2021) para otros pavimentos ecológicos.

Reconocemos que esta investigación presenta limitaciones que definen el camino para futuros trabajos. La variabilidad inherente de los residuos utilizados y la falta de control sobre ciertos parámetros ambientales durante la fabricación son áreas de mejora. La principal limitación, como se ha discutido, es la optimización pendiente del proceso de compactación y fusión para piezas de mayor tamaño. Derivado de lo anterior, se sugieren las siguientes líneas de investigación: primero, la optimización del proceso, investigando métodos de calentamiento y compactación más eficientes; segundo, la mejora de la interfaz, estudiando pretratamientos para los PRF como sugiere Liu et al. (2022); tercero, una caracterización completa de la durabilidad, evaluando la resistencia a la abrasión y ciclos climáticos;

cuarto, un análisis de inocuidad para garantizar que no se liberan sustancias perjudiciales, un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar de manera integral los beneficios ambientales y económicos de la tecnología.

Además, se planteó un potencial significativo, de tal manera se pueda reducir la huella de carbono en comparación con los adoquines convencionales. Sin embargo, esta estimación preliminar de 35 % debe evaluarse críticamente a estudios previos y de los requisitos metodológicos de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) completo. Así como Goyal, Kumar y Mondal (2023) demostraron que los adoquines fabricados con plástico reciclado utilizado como binder pueden reducir la huella de carbono hasta en un 40 % respecto a los adoquines convencionales con cemento, debido principalmente a la eliminación del proceso de clinkerización. En un análisis similar, Asif y Javed (2024) reportaron reducciones sustanciales del impacto ambiental cuando el contenido de plástico reciclado aumenta y el cemento disminuye en la mezcla, resaltando que la reducción del uso de cemento es el factor más determinante en la caída de emisiones.

De forma más amplia, Patrisia, Law, Gunasekara y Setunge (2025) mostraron que los productos de concreto integrados con residuos presentan reducciones de impacto ambiental en todas las etapas del ciclo de vida cuando se evalúan bajo un enfoque cradle-to-cradle, siempre que se gestione adecuadamente la procedencia y tratamiento de los residuos.

A pesar de estas evidencias favorables, Goyal et al. (2023) enfatizan que los resultados del ACV dependen fuertemente del origen de la energía empleada. Por ejemplo, cuando la mezcla se produce con electricidad proveniente de fuentes hidroeléctricas o biomásicas, la reducción de emisiones puede llegar al 80 %. Sin embargo, si la electricidad proviene de fuentes fósiles, el beneficio disminuye notablemente.

Finalmente, Patrisia et al. (2025) enmarcan que las decisiones metodológicas del ACV como los límites del sistema, la asignación de impactos a los residuos y los escenarios de fin de vida pueden alterar sustancialmente los resultados finales. Por ello, la cifra de reducción del 35 % presentada debe ser considerada un valor preliminar, sujeto a validación mediante un análisis exhaustivo bajo normas ISO 14040/44.



## CONCLUSIONES

1. Se implementó eficientemente un pretratamiento para los residuos plásticos farmacéuticos (PRF) que consistió en limpieza, desinfección y trituración mecánica, logrando obtener un material con una granulometría controlada ( $\leq 2$  cm). Este proceso aseguró la homogeneidad y compatibilidad física del PRF, facilitando su correcta incorporación como matriz aglomerante en las mezclas experimentales.
2. Se formuló con éxito un adhesivo funcional a partir de residuos orgánicos de curtiembre mediante un proceso de hidrólisis térmica controlada, obteniendo un gel con capacidad aglutinante basado en colágeno. Si bien se infiere que este adhesivo contribuyó positivamente a la cohesión y trabajabilidad de la mezcla, su aporte individual a la resistencia mecánica final no pudo ser aislado estadísticamente de la influencia principal ejercida por la matriz de plástico en los análisis realizados.
3. La evaluación de distintas proporciones de materiales reciclados demostró que la concentración de PRF tuvo una influencia positiva y significativa en la resistencia a la compresión, particularmente en los adoquines de tamaño pequeño y mediano. Sin embargo, este efecto no fue estadísticamente discernible en los adoquines de gran tamaño. Al contrastar con la NTP 399.611, se concluye que la formulación de adoquín pequeño con 75% de PRF es la única que cumple satisfactoriamente los requisitos de resistencia para uso peatonal.
4. La aplicación de un diseño experimental factorial fue una herramienta efectiva para el análisis y la optimización de las propiedades físico-mecánicas. El diseño permitió identificar la combinación de 75% de PRF en los adoquines de tamaño pequeño como la formulación óptima en términos de resistencia a la compresión dentro del espectro evaluado. Crucialmente, el análisis factorial también reveló una fuerte interacción entre el tamaño y la proporción de plástico, evidenciando que con la metodología de fabricación empleada, el efecto positivo del PRF disminuye y desaparece a medida que aumenta el volumen del adoquín.

5. La validación de la resistencia y el desempeño mediante pruebas de laboratorio estandarizadas confirma la viabilidad técnica de los adoquines ecoamigables de tamaño pequeño (10x20x4 cm) con 75% de PRF, garantizando su aplicabilidad segura en proyectos de infraestructura sostenible destinados exclusivamente al tráfico peatonal. No obstante, esta misma validación demuestra de manera objetiva que las formulaciones actuales para los adoquines de tamaño mediano y grande no son aplicables en zonas que requieran una mayor capacidad de carga, como el tráfico vehicular.



## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda incorporar un proceso de recocido en horno especialmente para piezas de gran volumen. Durante la fabricación, la mezcla caliente puede generar gradientes térmicos internos que inducen tensiones residuales al momento del enfriamiento. Estas tensiones pueden ocasionar microfisuras, deformaciones o pérdida de resistencia mecánica con el tiempo. Un sistema de enfriamiento gradual con descensos controlados de temperatura entre 60 °C y temperatura ambiente permitirá que la estructura termoplástica del PRF se estabilice, mejore la distribución interna de esfuerzos y aumente la durabilidad de los adoquines. Este método es ampliamente empleado en polímeros reciclados y productos termoformados para garantizar estabilidad dimensional y desempeño a largo plazo.
2. Dado que la metodología empleada incorpora residuos de curtiembre, los cuales pueden contener trazas de cromo trivalente o hexavalente, es indispensable ejecutar ensayos de lixiviación bajo el estándar TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Este ensayo permitirá demostrar que, tras el proceso de adhesivación y encapsulamiento en la matriz plástica, el cromo se mantiene inmovilizado y no representa un riesgo ambiental ni sanitario durante la vida útil del adoquín ni en su disposición final. Asimismo, debido al origen farmacéutico del PRF, se recomienda evaluar sustancias traza potencialmente presentes (polímeros aditivados, excipientes reaccionados con el plástico, restos químicos adsorbidos). La certificación TCLP fortalecerá el sustento ambiental del proyecto y permitirá su futura aprobación por entidades municipales y sanitarias, garantizando la inocuidad del producto final.

3. Se recomienda desarrollar ensayos comparativos con diferentes concentraciones de MAPP/MAH para determinar si este aditivo logra mejoras mecánicas medibles sin comprometer la sostenibilidad ni elevar los costos de producción. Si bien el colágeno hidrolizado funciona como agente adhesivo natural, existe el potencial de optimizar la resistencia mecánica del adoquín mediante la incorporación de agentes de acoplamiento sintéticos, tales como el anhídrido maleico modificado (MAPP o MAPE). Estos agentes generan puentes químicos entre la fase polimérica del PRF y los grupos silanoles presentes en los áridos silíceos, mejorando significativamente la adhesión interfacial, por consiguiente, la resistencia a compresión, la estabilidad dimensional y la reducción de absorción de agua.
4. Se recomienda establecer un protocolo formal y estandarizado para el tratamiento de los incipientes, es decir, el acondicionamiento inicial de los residuos que serán incorporados al proceso (PRF, residuos de curtiembre y aditivos). Este tratamiento debe incluir etapas claras de segregación, clasificación, limpieza, desinfección, secado y control granulométrico, con el fin de asegurar que la materia prima llegue al proceso en condiciones óptimas. En el caso del plástico farmacéutico reciclado, se recomienda aplicar un proceso de lavado con solución clorada al 1 %, enjuague con agua desionizada y un secado uniforme para evitar humedad residual que afecte la fusión polimérica. Asimismo, debe garantizarse su trituración homogénea para evitar partículas demasiado grandes que generen discontinuidades internas en el adoquín.
5. Para los residuos de curtiembre, es esencial controlar la presencia de metales pesados (principalmente cromo) mediante pretratamientos de neutralización o estabilización antes de transformarlo en colágeno hidrolizado. De igual forma, se recomienda implementar fichas de trazabilidad por lote que permitan verificar la composición, humedad, origen y posibles variaciones químicas. Un tratamiento estandarizado de los incipientes permitirá reducir la variabilidad entre lotes, mejorar la calidad final del adoquín y garantizar la coherencia entre las propiedades mecánicas obtenidas en laboratorio y las que se esperan en producción industrial.

6. Profundizar en el estudio su estructura química y mecanismos de adhesión, con el fin de optimizar su rol dentro de la matriz del adoquín. Químicamente, el colágeno hidrolizado está constituido por cadenas peptídicas derivadas de la ruptura de la triple hélice del colágeno original. Estas cadenas poseen grupos funcionales tales como amino ( $-\text{NH}_2$ ), carboxilo ( $-\text{COOH}$ ) e hidroxilo ( $-\text{OH}$ ), los cuales facilitan la formación de puentes de hidrógeno, enlaces iónicos y reticulaciones débiles con superficies minerales y polímeros.
7. Caracterizar estas interacciones mediante análisis FTIR, DSC, TGA y ensayos reológicos para comprender el comportamiento térmico, la estabilidad y la capacidad de adhesión del colágeno en condiciones de producción. Además, se sugiere evaluar la posibilidad de modificar el colágeno mediante reticulantes suaves (como genipina o taninos naturales) para aumentar su estabilidad térmica sin comprometer su naturaleza ecoamigable. Un conocimiento más profundo de la química del colágeno permitirá optimizar su desempeño, mejorar la adhesión Plástico-Arena-Colágeno y potenciar la resistencia mecánica del adoquín final.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abubakar, L., Yeasmin, N., & Bhattacharjee, A. (2024). Waste Polyethylene Terephthalate (PET) as a partial replacement of aggregates in sustainable concrete. *Construction Materials*, 4(4), 738–747. <https://doi.org/10.3390/constrmater4040040>
- Adhikari, S., Paudel, S., & Chapagain, S. (2025). Eco-Friendly Paver Block: Comparative Study by Composition Review. *OCEM Journal of Management, Technology & Social Sciences*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.3126/ocemjmtss.v4i1.74757>
- Agencia Internacional de Energía. (2022). *Material efficiency in clean energy transitions*. IEA.
- Ahmed, R., & Chun, B. (2018). Subcritical water hydrolysis for the production of bioactive peptides from tuna skin collagen. *The Journal of Supercritical Fluids*, 138, 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.03.006>
- Almeida, B., & Fernández-Jiménez, A. (2025). Greener concrete paving blocks with hybrid alkaline cements and recycled aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(2). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18753>
- Allegue, L., Puyol, D., & Melero, J. A. (2020). Novel approach for the treatment of the organic fraction of municipal solid waste: Coupling thermal hydrolysis with anaerobic digestion and photo-fermentation. *Science of the Total Environment*, 714, 136845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136845>
- Alqahtani, F. K., & Khan, M. I. (2020). Recycled plastic as an aggregate in concrete: A review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020223. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003263](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003263)

- Armando, C. D. H. (2024). *Efecto del polietileno de alta densidad para la mejora de resistencia en adoquines de concreto tipo I* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/13644>
- Asif, U., & Javed, M. F. (2024). *Optimizing plastic waste inclusion in paver blocks: Balancing performance, environmental impact, and cost through LCA and economic analysis*. *Journal of Cleaner Production*, 478, 143901. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143901>
- Asmat, A., Ali, A., & Khan, K. (2020). Performance evaluation of Minitab statistical software for data analysis. *Journal of Applied Statistics*, 47(13-15), 2633-2647.
- ASTM International. (2021). *ASTM C936/C936M-21: Standard specification for solid concrete interlocking paving units*. ASTM International.
- Boucedra, A. (2020). Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates. *Construction and Building Materials*, 256, 119447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>
- Braga, A., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529-543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>
- Çelik, A. İ., Tunç, U. G., Karalar, M., Şahan, M. F., & Özkılıç, Y. O. (2025). Study on mechanical, dynamic impact, and microstructural properties of eco-friendly geopolymer paving stones cured in ambient conditions. *Construction and Building Materials*, 447, 140132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140132>

- Chong, B. W., & Shi, X. (2023). Meta-analysis on PET plastic as concrete aggregate using response surface methodology and regression analysis. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s43065-022-00069-y>
- Correa, C., et al. (2024). *Diseño de mezclas y elaboración de prototipos de bloques, adoquines de concreto con la utilización de materiales de residuos de construcción y demolición (RCD)*.
- Cruz Paredes, M., & Neciosup Hurtado, J. B. (2022). *Porcentaje de plástico polietileno tereftalato en la resistencia a la compresión del adoquín ecológico para carreteras en Viru, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
- Dantas, A. (2024). Carbon reduction and planning of active travel projects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102764>
- Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM. (2017, 21 de diciembre). Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. *Diario Oficial El Peruano*.
- Debele, T. B., Berhe, D. A., & Gebreslassie, G. B. (2023). Pharmaceutical plastic waste upcycling into construction materials: A circular economy approach. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136823. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136823>
- Delgado, D. (2018). *Caracterización estructural y funcional de biocompuestos optimizados a partir de residuos agroindustriales y farmacéuticos para su uso como ladrillos Tipo II* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM.
- Durai, B., Sankar, V., & Koilpillai, J. (2023). Isolation and characterization of collagen from tannery waste for biomedical applications. *BioNanoScience*, 13, 2033–2048. <https://doi.org/10.1007/s12668-023-1228-5>

El Seidy, E. (2024). *Exploring the viability of various waste materials as aggregates in low-carbon two-part alkali-activated cementitious composites* [Tesis doctoral, Brunel University London].

Brunel University Research Archive. <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/30201>

Elkington, J. (1998). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. New Society Publishers.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.

Environmental Protection Agency. (2022). *National stormwater calculator*. EPA.

Foda, T., Hassan, H., Abdelkader, A., & El-Hassan, K. (2024). Predictive modeling of sustainable recycled materials for stone column construction. *Innovative Infrastructure Solutions*.  
<https://doi.org/10.1007/s41062-024-01700-5>

Gamonal Rimarachin, S. S., & García Velásquez, J. E. (2024). *Utilización de ladrillos ecológicos compuestos por vidrio y plástico reciclado para una construcción sostenible* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS.

Garzón Leiva, R. A. (2021). *Técnicas de construcción sostenible de viviendas de interés social aplicables en Bogotá D.C.* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG.

Georgiou, D., Sun, D., Liu, X., & Athanasiou, C. E. (2025). Suppressing mechanical property variability in recycled plastics via bio-inspired design. arXiv.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.02359>

- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gopalam, J., Giri, J., & Panda, M. (2020). Influence of binder type on performance of dense bituminous mixture prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00413. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00413>
- Goyal, H., Kumar, R., & Mondal, P. (2023). *Life cycle analysis of paver block production using waste plastics: Comparative assessment with concrete paver blocks*. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136857>
- Huanca Sucupuca, O. M. (2024). *Diseño de adoquines ecológicos con la adición de desmonte de construcción reciclado para calle peatonal en San Miguel Puno-2023* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2017). *NTP 399.611: Adoquines de concreto. Requisitos*. INACAL.
- International Labour Organization. (2018). *World employment and social outlook 2018: Greening with jobs*. ILO.
- ISO. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

- Junkes, V., Fuziki, M., Tusset, Â. M., Rodrigues, P. C., & Lenzi, G. G. (2024). Environmentally friendly concrete block production: valorization of civil construction and chemical industry waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 21873–21886. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31706-y>
- Kamaruddin, M. (2019). Glass transition behavior of poly methyl methacrylate microplastics under various intermediates ratio. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(2), 1-8. <https://doi.org/10.30880/IJIE.2019.11.02.003>
- Kolomazník, K., Adámková, M., Vašek, V., & Chester, A. (2008). Experiences in tanning and leather-processing waste management. *Journal of Cleaner Production*, 16(11), 1222-1229.
- Kun, D., Kárpáti, Z., Fekete, E., & Móczó, J. (2021). The role of interfacial adhesion in polymer composites engineered from lignocellulosic agricultural waste. *Polymers*, 13(18), 3099. <https://doi.org/10.3390/polym13183099>
- Kvitka, S. (2020). ЦИФРОВІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЯК СУЧАСНИЙ ТРЕНД ПЕРІОДИЧНОГО ЦИКЛУ РОЗВИТКУ СУСПІЛЬСТВА. *Збірник наукових праць Національної академії державного управління при Президентові України*. <https://doi.org/10.36030/2664-3618-2020-si-131-134>
- Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2017). Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review. *Sustainable Cities and Society*, 35, 280-288. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.013>
- Liu, J., Zhang, X., & Wang, Y. (2022). Chemically treated plastic replacing fine aggregate in structural concrete. *Frontiers in Materials*, 9, 948117. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.948117>

- Malla, S., & Shaw, R. K. (2021). Sustainable construction materials: A correlational study on recycled aggregates and mechanical properties. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, e00276. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00276>
- Mamani, L. F. C. (2024). Desarrollo de adoquines ecológicos con vidrio reciclado bajo normativa NTP 399.611 para uso en pavimentos peatonales. *Revista Veritas de Difusión Científica y Cultural*, 1(1), 25-36.
- Marín Forero, S. (2024). *Análisis de ciclo de vida comparativo como fundamento para la producción de un adoquín fabricado con concretos con agregados reciclados de RCD en Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Masduqi, I. P., Pratama, I. A. Y. P., & Maulana, M. A. (2024). Integrasi botol kaca hancur sebagai agregat dalam pembuatan paving blok ramah lingkungan. *Jurnal Teknologi Cerdas*, 1(1), 16–20. <https://doi.org/10.70310/anqj1g96>
- Mawla, Z., Slika, W., Saad, W., & Saad, G. (2018). Mechanical properties of recycled polyethylene / polypropylene material with embedded pharmaceutical waste. En *Proceedings of the 4th World Congress on New Technologies (NewTech'18)*. <https://doi.org/10.11159/icepr18.157>
- Medina, M. (2010). Solid wastes, poverty, and the environment in developing country cities: Challenges and opportunities. *World Development*, 28(3), 557-570. [https://doi.org/10.1016/s0305-750x\(99\)00141-7](https://doi.org/10.1016/s0305-750x(99)00141-7)
- Meghana, M., & Shastri, Y. (2020). Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. *Bioresource Technology*, 303, 122929. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122929>

Mescheryakov, S. (2025). GRAPHIC MODELING OF THE ENCLOSING STRUCTURAL UNITS BASED ON BIM TECHNOLOGIES. *Bulletin of South Ural State University series "Construction Engineering and Architecture"*. <https://doi.org/10.14529/build250102>

Meza Domínguez, Y. (2018). *Propiedades físico-mecánicas de adoquines elaborados con plástico reciclado para pavimento peatonal en el Centro Comercial Tambo Plaza, Lurín-2017* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.

Miranda Felipe, E. C., Luna Victoria Ruiz, R. J., Rondón González, D. M., & Pérez Mego, S. del C. (2024). *Modelo Prolab: "Eco Path Solutions: creación de espacios a base de adoquines eco amigables"* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/29012>

Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, 16(6), 698-699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9.<sup>a</sup> ed.). Wiley.

Noushini, A., & Castel, A. (2018). Performance-based criteria to assess the suitability of geopolymer concrete in marine environments using modified ASTM C1202 and ASTM C1556 methods. *Materials and Structures*, 51, 141. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1267-z>

Ojeda, D., Alejandrino, J., & Mercante, I. (2024). Recycling PET straps in paving blocks: experimental testing and life cycle assessment. *International Journal of Environmental Studies*, 81(5), 1-10. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2408304>

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2023). *Informe anual 2023*. ONUDI.

- Oti, J. E., Adeleke, B. O., Rathnayake, M., & Kinuthia, J. (2024). Strength and durability characterization of structural concrete made of recycled plastic. *Materials*, 17(8), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma17081841>
- Patrisia, Y., Law, D. W., Gunasekara, C., & Setunge, S. (2025). *Assessment of waste-integrated concrete products: A cradle-to-cradle perspective*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 30, 834–861. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02443-w>
- Perkola, N., Äystö, L., Hagström, M., Kauppi, S., & Fjäder, P. (2024). Pharmaceutical residues in plastic tablet containers: Impacts on recycling and the environment. *Waste Management*, 189, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.013>
- Pertiwi, V. A. P., Caronge, M. A., & Tjaronge, M. W. (2024). Producing eco-friendly concrete paving block using waste refractory brick aggregates. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17(5), 1391–1406. <https://doi.org/10.1007/s42947-024-00425-z>
- Polo, P. J. R. R. (2024). *Evaluación del plástico de polipropileno reciclado en adoquines de concreto tipo I sobre la compresión, flexión, impacto y absorción* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNITRU. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/20.500.12833/20993>
- Purwandari, A., Ratnamirah, A., Parwati, N., & Tanjung, W. (2020). Determining optimum eco paving block compositions by using factorial design method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 847(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012008>
- Qiu, G., Guo, Z., Guo, P., Sun, L., Yang, F., & Li, H. (2021). Research on fatigue prediction model of asphalt mixture with high RAP content. *Sustainability*, 13(14), 7995. <https://doi.org/10.3390/su13147995>

- Ramírez-Pico, L. A., Orjuela-Rodríguez, A. E., & Angulo-Blanquissett, G. E. (2020). Propuesta de adoquines hechos a base de caucho reciclado. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 11(1), 44-53. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.34>
- Raworth, K. (2017). *Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist*. Chelsea Green Publishing.
- Rostami, H., Pashmtab, P., & Shaghghi, A. (2020). A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments. *Construction and Building Materials*, 241, 117998. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117998>
- Sáez-de-Guinoa Vilaplana, A., Zambrana-Vasquez, D., & Huerta, M. (2021). Circular economy in construction: Legal frameworks and technical standards in the EU. *Sustainability*, 13(16), 8925. <https://doi.org/10.3390/su13168925>
- Salazar Zela, W. G. (2020). *Evaluación de mezcla asfáltica con aplicación de plástico reciclado para los pavimentos flexibles en San Juan de Miraflores, Lima 2019* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
- Schroeder, A., Dobson, E., Rueden, C., Tomancak, P., Jug, F., & Eliceiri, K. (2021). The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis. *Protein Science*, 30(1), 7-22. <https://doi.org/10.1002/pro.3993>
- Sha, A., Liu, Z., Jiang, W., Qi, L., Hu, L., Jiao, W., & Barbieri, D. M. (2021). Advances and development trends in eco-friendly pavements. *Journal of Road Engineering*, 1(4), 266-283. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2021.12.002>
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>

- Soliman, A. M., El-Kady, A., & Moustafa, A. (2025). Green building development utilising modified fired clay bricks and eggshell waste. *Scientific Reports*, *15*, 2235. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51203-x>
- Soliman, N., & Moustafa, A. (2020). Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(5), 10235-10253. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.045>
- Song, N., Hou, X., Chen, L., Cui, S., Shi, L., & Ding, P. (2017). A green plastic constructed from cellulose and functionalized graphene with high thermal conductivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *9*(21), 17914-17922. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b02675>
- Sorout, J., Kumar, N., & Singh, L. (2023). A review on plastic waste in construction materials: A burning issue. *Materials Today: Proceedings*, *80*(3), 3656-3660. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.355>
- United Nations Environment Programme. (2020). *Global status report for buildings and construction*. UNEP.
- Vasquez Bustamante, Z. L. (2024). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas para adoquines de concreto de tránsito peatonal adicionando celulosa obtenida de cartón reciclado* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio de Tesis USAT. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/8029>
- Velenturf, A. P., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 1437-1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>

Verma, S., & Sharma, P. (2023). Current trends in solid tannery waste management: A critical review.

*Critical Reviews in Biotechnology*, 43(6), 805-822.

<https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2068996>

Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. W. (1996). *Combustion: Physical and chemical fundamentals, modelling and simulation, experiments, pollutant formation*. Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-97668-1>

Yu, Y., Yazan, D. M., Bhoohibhoya, S., & Volker, L. (2021). Towards circular economy through industrial symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates.

*Journal of Cleaner Production*, 293, 126083. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126083>

Zhang, G., Gutierrez, M., & Li, M. (2017). A coupled CFD-DEM approach to model particle-fluid mixture transport between two parallel plates to improve understanding of proppant micromechanics in hydraulic fractures. *Powder Technology*, 308, 235-248.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.055>

Zulkernain, N. H., Gani, P., Chuan, N. C., & Uvarajan, T. (2021). Utilisation of plastic waste as aggregate in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 296,

123669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123669>

ANEXOS

Tabla 25

Tabla Detallada de Resistencia a la Compresión por Combinación Experimental (kg/cm<sup>2</sup>)

Tipo de Adoquín	Proporción de PRF (%)	Combinación Experimental	Réplica 1 (kg/cm <sup>2</sup> )	Réplica 2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Réplica 3 (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Varianza
Pequeño	25.00%	C-1	232.97	231.18	227.32	230.49	8.3377
	50.00%	C-2	238.76	235.62	242.49	238.96	11.8282
	75.00%	C-3	268.16	265.58	263.89	265.88	4.6242
Mediano	25.00%	C-4	125.94	122.48	155.38	134.6	326.849
	50.00%	C-5	179.54	186.75	175.34	180.54	33.302
	75.00%	C-6	196.38	184.48	194.72	191.86	41.5372
Grande	25.00%	C-7	143.27	131.22	127.45	133.98	73.6489
	50.00%	C-8	143.14	147.34	142.87	144.45	5.0203
	75.00%	C-9	149.34	144.62	142.92	145.63	11.2537

*Nota: Elaboración Propia*

**Anexo Fotográfico**

**Figura 7** *Proceso de extracción de Colágeno*



**Figura 8** *Colágeno Extraído*



**Figura 9** *Proceso De Adoquines- Mezclado*



**Figura 10** *Vaciado de mezcla*



**Figura 11** *Pruebas en Laboratorio*



**Figura 12** *Pruebas en laboratorio*



**Figura 13** *Muestra de Adoquines*



**Figura 14** *Preparado de adoquines en moldes*



**Figura 15** *Llenado de mezcla en moldes*



**Figura 16** Aireado de adoquines



**Figura 17** Desmolde de adoquines



**Figura 18** Aireado de adoquines en molde





Universidad Católica  
de Santa María

AREQUIPA-PERÚ

☎ (51 54) 380008

🌐 <http://www.ucsm.edu.pe>

📘 [facebook.com/ucsm.edu.pe/](https://www.facebook.com/ucsm.edu.pe/)

## CONSTANCIA

EPLA ID-014878

El que suscribe, Mgter. Ing. RUBEN FRANCISCO GAMARRA TUCCO, Coordinador de los Laboratorios FAICA, de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa.

### HACE CONSTAR

Que el (los) Señor(es) Bachiller(es) en Ingeniería Civil:

**KATHERINE SOPHIA BURGA PRADO** (DNI – 70550355)  
**DANIELA ALEJANDRA LAZO JIMENEZ** (DNI – 71716566)

Ha realizado los ensayos en los Laboratorios de Ingeniería Civil, correspondientes a su trabajo de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, con la tesis denominada:

**"ELABORACIÓN DE ADOQUINES ECOAMIGABLES MEDIANTE EL RECICLAJE DE PLÁSTICOS FARMACÉUTICOS Y RESIDUOS DE CURTIEMBRES PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL SECTOR CONSTRUCCIÓN AREQUIPA, 2025"**

Los ensayos efectuados en el laboratorio se detallan en los Anexos 1 y 2 del presente, se llevaron a cabo el 17/06/2025.

El total resultante según el tarifario 2025 como DERECHO USO LABORATORIO POR TESIS, se categoriza con descuento en la opción "1", de acuerdo a la autorización de la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil se dispone:

USO DE EQUIPOS TESIS		TOTAL A PAGAR POR TESIS S/	COMPONENTE DE PAGO
TOTAL RESULTANTE S/	OPCIÓN "1" SE COBRA EL PORCENTAJE SEGÚN TOTAL RESULTANTE DE LA TABLA COSTO TESIS/AS	36.00	B017-00003341
36.00	100%		

Se expide la presente constancia para los fines convenientes.

Arequipa, 19 de junio del 2025.



Mgter. Rubén Francisco Gamarra Tucco  
Instituto de Arquitectura e Ingeniería-CM y de Ambiente  
Av. San José 1000, Arequipa - Perú  
[www.ucsm.edu.pe](http://www.ucsm.edu.pe)



Universidad Católica  
de Santa María

AREQUIPA - PERÚ

☎ (51 54) 382028

🌐 <http://www.ucscm.edu.pe>

📘 [facebook.com/ucscm.edu.pe/](https://www.facebook.com/ucscm.edu.pe/)

### ANEXO 1

ITEM	ENSAJO	CANT.	C.U. al 25%	PARCIAL S/
<b>ENSAYOS EN CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND</b>				
1	Compresión de Adoquines	9	4.00	36.00
<b>TOTAL</b>				<b>36.00</b>

### ANEXO 2

<b>Solicitante:</b>		Eatherine Sophia Burga Prado				
		Daniela Alejandra Lazo Jimenez				
<b>Ensayo:</b>		Compresión de Adoquines Ecoamigables				
<b>Instrumento:</b>		Equipo de Compresión ADR TOUCH - ELE INTERNATIONAL				
<b>Fecha:</b>		17/06/2025				
ELEMENTO	DIMENSIONES DE BLOQUE			ÁREA	CARGA APLICADA	ESFUERZO
N°	A (cm)	L (cm)	H (cm)	cm <sup>2</sup>	kgf	kgf/cm <sup>2</sup>
1	10	30	8	200	6839	34.20
2	10	30	8	200	5235	26.18
3	10	30	8	200	6843	34.22
4	10	30	6	216	1851	8.57
5	10	20	6	160	2546	15.91
6	10	30	6	187	8518	45.55
7	10	30	4	187	6439	34.43
8	10	20	4	180	15350	85.28
9	10	20	4	187	5593	29.91
						LSPC/pro.



Mtro. Rubén Francisco Gamarras Tuzo  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura Civil y del Ambiente  
Calle San José s/n - Arequipa, Arequipa - Perú  
[www.ucscm.edu.pe](http://www.ucscm.edu.pe)