



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO
PRIMARIO DE UNA INDUSTRIA PAPELERA PARA LA ELABORACIÓN DE
ADOQUINES”**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera Ambiental**

AUTOR: Steffania Nohely Muñoz Villamar

TUTOR: Ing. Marcelo Berrones Rivera, M. I. A

Guayaquil Ecuador

2023

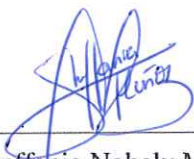
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Steffania Nohely Muñoz Villamar con cedula de ciudadanía No.0940427214
manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera
total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 24 Agosto del 2023

Atentamente,



Steffania Nohely Muñoz Villamar
No. 0940427214

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Steffania Nohely Muñoz Villamar con cedula de ciudadanía No. 0940427214 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajos experimentales “APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PRIMARIO DE UNA INDUSTRIA PAPELERA PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Ambiental , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 24 Agosto del 2023

Atentamente,



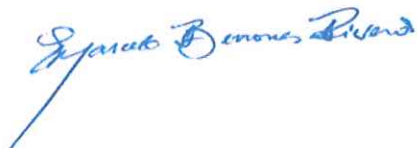
Steffania Nohely Muñoz Villamar
No. 0940427214

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ing. Néstor Marcelo Berrones Rivera, M.I.A con documento de ciudadanía No. 0914078290 docente de la Universidad Politécnica Salesiana , declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:“ APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PRIMARIO DE UNA INDUSTRIA PAPELERA PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES” , realizado por Steffania Nohely Muñoz Villamar con documento de identificación No. 0940427214 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajos experimentales que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 24 Agosto del 2023

Atentamente,



Ing. Néstor Marcelo Berrones Rivera, M.I.A
No. 0914078290

DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico a Dios y la virgen de Guadalupe, por ser esa guía en cada momento y ayudarme a superar cualquier impedimento que haya pasado en el camino hasta llegar a este punto en mi vida.

A una de las personas más importante de este proceso mi hermana, que siempre me ayudo a que cumpliera este sueño, que es tanto tuyo como mío, el recorrido hasta llegar aquí no fue fácil pero no imposible, por eso motivo te dedico este logro.

A mi madre por ser la persona más paciente y siempre aconsejarme y nunca dejarme sola en todo momento en esta etapa, te dedico a ti este nuevo triunfo que viene en nuestras vidas, las amo.

Steffania Nohely Muñoz Villamar

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por siempre guiarme y ayudarme a concluir esta etapa en mi vida y estar presente en cada momento en mi vida.

A mi hermana por siempre ser ese apoyo en mi vida, el camino no fue fácil pero siempre me diste tu apoyo en todo momento, gracias por cada enseñanza y valores que me has brindado.

A mi mamá por estar siempre dispuesta en ayudarme en todo lo que necesitaba, en este proceso gracias por acompañarme siempre a donde me tocara estar.

A mi papá por estar presente en este proceso y aconsejarme en este proceso.

A Stalyn por ser un apoyo para mi hermana durante todo este tiempo y este proceso, gracias por ayudarla y también por ayudarme.

A mis tíos Gavina y Leonardo por haberme recibido, durante este tiempo en mis estudios y ayudarme en cualquier cosa que necesitaba.

Al Ing. Fabricio Rodas y Ing. Katty Chiriguaya por ayudarme a plasmar la idea de este proyecto, gracias por todo lo que me enseñaron.

A mi tutor Ing. Marcelo Berrones Rivera M. I. A, por su ayuda y guía necesaria para alcanzar el objetivo necesario en este proyecto de titulación, gracias por siempre tener esa disposición de ayuda con todos sus estudiantes.

Resumen

En este proyecto de investigación centrado en la elaboración de adoquines a partir de lodos residuales de una industria papelera, se han evaluado aspectos cruciales para su viabilidad y calidad. A través de pruebas de absorción y compresión, se ha analizado la capacidad de los adoquines para interactuar con la humedad y resistir cargas verticales. Los resultados revelan desafíos en términos de cumplimiento de normas técnicas y resistencia estructural. La prueba de absorción ha indicado una variabilidad en los resultados, destacando la necesidad de optimizar la formulación y el proceso de fabricación para lograr productos consistentes y adecuados para la construcción. Por otro lado, la prueba de compresión muestra un bajo cumplimiento de la norma, lo que resalta la importancia de mejorar la resistencia y la capacidad de carga de los adoquines. En perspectiva, la elaboración de adoquines a partir de lodos residuales ofrece ventajas en términos de sostenibilidad y reutilización de subproductos industriales. Sin embargo, para garantizar su efectividad, se recomienda investigar formulaciones de materiales, optimizar procesos, implementar un control de calidad riguroso, fomentar la colaboración interdisciplinaria y monitorear su desempeño a largo plazo en proyectos de construcción reales. En resumen, este proyecto resalta la importancia de abordar desafíos técnicos en la fabricación de adoquines a partir de lodos residuales. La optimización de formulaciones y procesos es esencial para garantizar productos confiables y resistentes, contribuyendo a una construcción más sostenible y eficiente.

Palabras clave: adoquines, lodos residuales, absorción, compresión, sostenibilidad.

Abstract

In this research project focused on the production of paving blocks from waste sludge from a paper industry, crucial aspects for their feasibility and quality have been evaluated. Through absorption and compression tests, the ability of the pavers to interact with moisture and resist vertical loads has been analyzed. The results reveal challenges in terms of compliance with technical standards and structural strength. The absorption test has indicated variability in the results, highlighting the need to optimize the formulation and manufacturing process to achieve consistent products suitable for construction. On the other hand, the compression test shows low compliance with the standard, highlighting the importance of improving the strength and load-bearing capacity of the pavers. In perspective, the production of pavers from sewage sludge offers advantages in terms of sustainability and reuse of industrial by-products. However, to ensure its effectiveness, it is recommended to investigate material formulations, optimize processes, implement rigorous quality control, foster interdisciplinary collaboration, and monitor its long-term performance in real construction projects. In summary, this project highlights the importance of addressing technical challenges in the manufacture of pavers from sewage sludge. Optimization of formulations and processes is essential to ensure reliable and resistant products, contributing to a more sustainable and efficient construction.

Keywords: pavers, sewage sludge, absorption, compression, sustainability.

Índice de contenido

PORTADA	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice de tablas	xiii
Índice de figuras	xiv
1.4 Importancia y alcance	6
2. Fundamento teórico	8
2.1 Estado del arte.....	8
2.2. Lodos residuales	10
2.2.2.1. Origen de lodos residuales	10
2.2.2.2. Evolución del manejo de lodos residuales	12
2.3. Relevancia y aplicaciones de los lodos residuales en diversas industrias	13
2.4. Características de los lodos residuales.....	15

2.5. Composición física, química y biológica de los lodos residuales.....	16
2.6. Tipos de lodos residuales.....	17
2.6.1. Lodos primarios.....	17
2.6.2. Lodos secundarios.....	17
2.6.3. Lodos deshidratados.....	17
2.7. Factores que influyen en la generación de lodos residuales.....	18
2.8. Impacto ambiental y sanitario de los lodos residuales.....	18
2.9. Métodos de tratamiento de lodos residuales.....	18
2.10. Descripción de tecnologías de tratamiento convencionales.....	19
2.10.1. Digestión anaeróbica.....	20
2.10.2. Lodos activos.....	20
2.11. Avances en tecnologías de tratamiento.....	21
2.11.1. Secado térmico.....	21
2.11.2. Incineración.....	21
2.11.3. Pirólisis.....	22
2.12. Consideraciones sobre la reutilización de lodos tratados.....	22
2.13. Gestión y disposición de lodos residuales.....	22
2.14. Estrategias para el manejo seguro y eficiente de lodos residuales.....	23
2.15. Métodos de disposición final de lodos residuales.....	23
2.15.1. Vertederos.....	23

2.15.2. Aplicación agrícola	24
2.15.3. Valorización energética de lodos residuales	24
2.16. Riesgos asociados con la gestión inadecuada de los lodos residuales	24
3. Materiales y Métodos	25
3.1. Diseño de la Investigación	25
3.1.1. Tipo de investigación	25
3.2. Población y Muestra	25
3.3. Descripción de variables	26
3.3.1. Variables independientes.....	26
3.3.2. Variables dependientes.....	27
3.4. Instrumentos de recopilación de datos	27
3.4.1. Proceso de elaboración.....	28
3.4.2. Formulación	31
3.4. Análisis de datos	33
3.4.1. Métodos estadísticos	34
3.4.2. Software estadístico.....	34
4. Resultados y discusión	35
4.1. Análisis y presentación de los datos	35
4.2. Discusión	41
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	44

5.1. Conclusiones	44
5.2. Recomendaciones	45
6. Bibliografía.....	47
7. Anexos.....	52

Índice de tablas

Tabla 1. Formulación de adoquines.....	32
Tabla 2. ANOVA de las propiedades físicas en lodos del clarificador	35
Tabla 3. Prueba de absorción de agua en adoquines a partir de lodos residuales	38
Tabla 4. Prueba de compresión en adoquines a partir de lodos residuales.....	40
Tabla 6. Análisis de varianza del pH.....	67
Tabla 7. Análisis de varianza de la humedad	67
Tabla 8. Análisis de varianza de los sólidos totales	67
Tabla 9. Análisis de varianza de la concentración de sólidos totales	68
Tabla 10. Análisis de varianza de los sólidos totales volátiles.....	68
Tabla 11. Análisis de varianza de la concentración de los sólidos totales volátiles.....	68
Tabla 12. Análisis de varianza de la fibra	69
Tabla 12. Parámetros de dispersión a las muestras de lodos deshidratados	69

Índice de figuras

Figura 1. Comportamiento de la Absorción W_a en adoquines a partir de lodos residuales	39
Figura 2. Comportamiento de la compresión en adoquines a partir de lodos residuales	41
Figura 3. Pruebas en adoquines a partir de lodos residuales	53
Figura 4. Compresión de adoquines a partir de lodos residuales	53
Figura 5. Compresión de adoquines a partir de lodos residuales	54
Figura 6. Evaluación de parámetros en adoquines a partir de lodos residuales	54
Figura 7. Control de calidad de adoquines a partir de lodos residuales	55
Figura 8. Control de calidad de adoquines a partir de lodos residuales	55
Figura 9. Moldeado de adoquines a partir de lodos residuales.....	56
Figura 10. Mezclado de adoquines a partir de lodos residuales	56
Figura 11. Pruebas de adoquines a partir de lodos residuales	57
Figura 12. Mezclas de adoquines a partir de lodos residuales.....	57
Figura 13. NTE INEN 3040	66
Figura 14: Especificación de valores de resistencia climática (absorción de agua) y resistencia a la tracción indirecta.....	70

1. Introducción

En el contexto mundial, la importancia de los materiales de construcción es innegable, impulsando el avance en edificaciones e infraestructuras que conllevan un impacto socioeconómico significativo en cualquier nación. Entre estos materiales, los bloques y adoquines desempeñan un papel esencial en la industria de la construcción. Sin embargo, se ha evidenciado que, según (Anant L. Murmu, 2018) la producción de estos materiales es intensiva en energía, carece de eco-amigabilidad y genera residuos. La obtención de estos componentes implica un proceso energético que plantea desafíos medioambientales. A medida que se buscan soluciones más sostenibles, han surgido enfoques innovadores en el sector de los materiales de construcción, como la incorporación de residuos como los lodos del sistema primario y el poliuretano.

La tendencia hacia la creación de adoquines ecológicos alineados con la sostenibilidad y la preservación del entorno ha cobrado fuerza. Un ejemplo de ello es India, donde la industria de la construcción es responsable del 22% de las emisiones de gases de efecto invernadero. La exploración de nuevos agregados a partir de residuos reciclables está demostrando ser una vía efectiva para reducir el consumo energético, los recursos y el agua esenciales para la producción de adoquines. Sin embargo, esta evolución presenta desafíos en términos de satisfacción de la demanda en la industria de la construcción y en la adopción de nuevos materiales.

A nivel local, en el cantón Quevedo de la provincia de los Ríos en Ecuador, se ha llevado a cabo una investigación que muestra el uso de otros tipos de residuos en la fabricación de adoquines. Con base en el estudio de (Jonathan Bolívar Varas-Ramírez, 21) se explora la adición de residuos orgánicos del maíz para mejorar las propiedades mecánicas de los adoquines de hormigón. Aunque estos avances muestran potencial, enfrentan obstáculos en términos de comercialización debido a factores como el desconocimiento del producto y la falta de confianza en materiales alternativos.

Esta investigación en Ecuador se centra en una metodología experimental dentro de una industria papelera. Esta metodología utiliza los lodos del sistema de tratamiento primario o clarificador, caracterizados por su rigidez una vez secos al aire libre, junto con el poliuretano reciclado. Esta combinación ha permitido la creación de adoquines que no

solo benefician al medio ambiente, sino que también contribuyen a la gestión responsable de los residuos, evitando su deposición en rellenos sanitarios.

La gestión de los residuos industriales en la industria papelera presenta desafíos ambientales, ya que los lodos del clarificador liberan dióxido de carbono en los rellenos sanitarios. A esto se suma el poliuretano de las zapatas de cartonera, que enfrenta problemas similares. En consecuencia, la investigación busca desarrollar adoquines que cumplan con las normas establecidas en la INEN 1488, en términos de características físicas y mecánicas, utilizando materiales como cemento, arena, poliuretano y lodos del clarificador. Estos materiales se someterán a pruebas para determinar su viabilidad.

Este proyecto demuestra cómo los recursos de la industria papelera pueden ser transformados en productos nuevos y sostenibles. El objetivo final es la creación de una mezcla equilibrada con cemento para producir adoquines, contribuyendo a la innovación de materiales en la construcción.

1.1 Problema de estudio

Los adoquines, fundamentales en la construcción, tienen su origen en la materia prima del cemento, el cual desempeña un rol central en la industria ecuatoriana. Sin embargo, la fabricación de cemento se ha convertido en una fuente global de preocupación debido a su asociación con la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero, que se han exacerbado con la creciente demanda de construcciones a nivel local y mundial.

La manufactura artesanal de adoquines, aunque común, presenta inconvenientes notables. El proceso involucra el uso de hornos para acelerar el fraguado y secado, lo que lamentablemente contribuye a la emisión de humos perjudiciales, como el CO, NO, CO₂ y SO₂, directamente a la atmósfera. Estos contaminantes primarios han surgido como una de las principales consecuencias de la urbanización acelerada y las necesidades constructivas en la sociedad contemporánea. Las construcciones tradicionales dependen en gran medida del cemento, el segundo material más utilizado después del agua.

El enfoque de esta investigación radica en encontrar alternativas que reduzcan el impacto ambiental de la fabricación de adoquines. Un enfoque clave es la inclusión de nuevos materiales y aditivos, particularmente los lodos del sistema de tratamiento

primario, un subproducto del proceso de tratamiento de aguas en la industria papelera. En Ecuador, estos lodos no se consideran peligrosos, según el Acuerdo Ministerial No. 142 "Listados Nacionales de Sustancias Químicas Peligrosas, Desechos Peligrosos y Especiales". Sin embargo, existen normativas internacionales, como el análisis CRETIB, que evalúan su potencial corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico, lo que determina su disposición en un relleno sanitario industrial, generando emisiones de CO₂ en su descomposición.

En la búsqueda de soluciones más sustentables, la industria de la construcción ha abrazado la aplicación de materiales reciclados. En este sentido, la implementación de nuevos adoquines elaborados con materiales reciclables ha demostrado ser efectiva en la reducción de emisiones de CO₂. Esta investigación explora la integración de nuevos agregados como el poliuretano de las zapatas de cartonera, además de los lodos del clarificador, como componentes esenciales en la fabricación de estos nuevos adoquines. Esta iniciativa representa un avance significativo hacia la disminución de la dependencia del cemento, ya que los adoquines convencionales se componen en gran parte por cemento, representando entre un setenta y ochenta por ciento de su estructura.

En resumen, la presente investigación enfoca su esfuerzo en buscar alternativas viables y ambientalmente conscientes para la fabricación de adoquines. La inclusión de materiales reciclables y la reducción del uso de cemento son estrategias cruciales en la lucha contra la contaminación y la mitigación de emisiones de CO₂ en el sector de la construcción.

1.2 Justificación

La industria papelera, caracterizada por su considerable consumo de agua fresca y la consecuente generación de volúmenes considerables de lodos, encara una problemática ambiental importante. Estos lodos, conocidos como lodos primarios, albergan contenido orgánico y, de manera destacada, fibras o celulosa. Según Osto H. L. (2021), la celulosa, biopolímero que conforma aproximadamente un tercio de los tejidos vegetales y puede ser regenerada mediante fotosíntesis, es el componente principal. La variabilidad de la composición química de las fibras naturales se ajusta al tipo y origen de la fibra, siendo este elemento fundamental en la producción de pulpa de papel.

Paralelamente, la construcción, una industria de alta demanda, depende en gran medida de materiales cementicios, como los adoquines. La iniciativa de emplear nuevos agregados, en específico los lodos del clarificador, se desencadena por la necesidad de reducir la utilización de cemento en la elaboración de los adoquines. Gutiérrez (2021) señala que la generación de residuos de lodos de papel y su posterior disposición en vertederos no solo conlleva costos económicos, sino que también causa daños ambientales considerables. Los lodos del clarificador, que exhiben rigidez tras el secado, representan una opción promisoriosa para la fabricación de los adoquines propuestos.

Este proyecto busca, precisamente, paliar la dependencia del cemento en la producción de adoquines. En su proceso experimental, se reduce moderadamente el uso de cemento con el propósito de disminuir su impacto ambiental en la construcción, un sector en constante crecimiento debido a las crecientes demandas y necesidades. La industria del papel, fuente de los lodos primarios, enfrenta el desafío de la acumulación de estos residuos que, a pesar de no ser peligrosos, requieren de una disposición adecuada en rellenos sanitarios industriales. Transformar estos desechos en un segundo producto, los adoquines ecológicos, constituye una solución viable y sostenible.

El proyecto también se centra en gestionar residuos generados en la industria papelera, como el poliuretano contenido en las zapatas de cartonera. Estas zapatas, utilizadas como prensas entre los fieltros del proceso de fabricación de papel, son descartadas y destinadas al reciclaje. La propuesta consiste en incorporar este poliuretano a la mezcla, junto con los lodos del clarificador, con el objetivo principal de cumplir con las normativas ecuatorianas, especialmente las normas INEN 1488 (INEN, 2014), voluntarias, pero altamente reconocidas, para la producción de adoquines.

El proyecto de investigación se origina en la necesidad de abordar la problemática ambiental en la industria papelera a través de la reutilización de lodos primarios y poliuretano. La propuesta no solo busca reducir la dependencia del cemento en la producción de adoquines, sino que también alinea sus objetivos con las normativas de calidad vigentes. Con esta estrategia, se pretende ofrecer una alternativa sostenible y amigable con el entorno en la construcción de adoquines.

1.3 Antecedentes

En el ámbito de la investigación, (Ribeiro, 2021) presentó un enfoque novedoso al desarrollar un compuesto de vermiculita y resina de poliuretano vegetal para la fabricación de eco-ladrillos. Su estudio se centró en la producción y evaluación de compuestos de vermiculita cruda, sometidos a análisis termogravimétricos. También investigó la resina de poliuretano y luego procedió a mezclar y elaborar ladrillos en concentraciones de 70%, 80% y 90% en peso de poliuretano crudo, además de las mismas proporciones utilizando poliuretano expandido. Notablemente, solo los ladrillos con 70% de vermiculita cruda superaron las pruebas de resistencia a la compresión y absorción, lo que condujo a la elección de esta como material para los prototipos.

(Jurgita Malaikiene, 2018), por su parte, examinó el impacto de los lodos primarios de la industria papelera en las propiedades de pasta y mortero de cemento. En su investigación, incorporó lodos primarios en varios porcentajes (5%, 10%, 15% o 20%) para reemplazar el contenido de cemento en los especímenes. Sus hallazgos indicaron que estos residuos poseen una alta porosidad abierta y una capacidad notable para absorber agua. Además, demostró cómo el lodo primario, reemplazando el 10% del contenido de cemento en la mezcla, influyó en el proceso de fraguado inicial y final.

(Maiccon Martins Barros, 2020) exploró la fabricación de ladrillos ecológicos a partir de residuos de piedra ornamental y resina de poliéster. Mediante caracterización espectroscópica y análisis termogravimétricos, identificó las proporciones adecuadas (70/30, 80/20, 85/15 y 90/10) para mezclar estos materiales. Los ladrillos resultantes demostraron una resistencia a la compresión excepcional (en especial, el ladrillo de caliza/poliéster con una proporción de 90/10), superando incluso a los ladrillos convencionales y de suelo cemento.

(Vsévolod Mymrin, 2020), presentó alternativas eficientes en la producción de pulpa de celulosa para la construcción de materiales sostenibles. Su investigación exploró las propiedades mecánicas y físicas de varios materiales de construcción, y propuso el uso de residuos industriales de la industria papelera y concreto. A través de técnicas como XRF, XRD, SEM, EDS y LAMMA, demostró que la combinación de celulosa y papel Kraft con residuos de hormigón podría ser una solución beneficiosa desde una perspectiva medioambiental y económica. En conjunto, estos estudios evidencian la tendencia creciente de explorar y aprovechar los residuos industriales, especialmente los de la industria papelera, para el desarrollo de nuevos materiales de construcción sostenibles y

amigables con el entorno.

1.4 Importancia y alcance

La investigación cobra un significado crucial al explorar la posibilidad de obtener nuevos materiales de construcción sostenibles a partir de residuos industriales. En este contexto, la relevancia se fundamenta en la búsqueda de alternativas que beneficien tanto a la industria de la construcción como al medio ambiente. Los lodos resultantes del sistema de tratamiento primario, una problemática latente en la industria papelera debido a su acumulación, adquieren un papel protagónico en este estudio. La propuesta de combinar estos lodos con poliuretano para la fabricación de adoquines abre un horizonte promisorio en la gestión de residuos y la obtención de nuevos recursos útiles. El alcance de esta investigación abarca desde el desarrollo de una metodología viable para la creación de los adoquines hasta el potencial impacto positivo en la reducción de residuos y el fomento de prácticas más sostenibles en el sector de la construcción. En esencia, la importancia y el alcance de esta investigación radican en su contribución hacia la creación de soluciones innovadoras que armonizan los imperativos industriales con la preservación del entorno.

1.5 Delimitación

1.1.5 Delimitación del problema

Este trabajo experimental se focalizó en la producción de adoquines mediante la formulación de mezclas balanceadas de cemento con lodos primarios, provenientes del proceso de tratamiento primario en la industria papelera.

1.1.6 Delimitación del espacio

El proyecto se llevó a cabo en el entorno de una instalación industrial dedicada a la producción de papel. Las pruebas físicas y de resistencia, por su parte, se realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales de la Carrera De Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana.

1.1.7 Delimitación del tiempo

El proceso de investigación se extendió a lo largo de un período de seis meses,

abarcando cada fase desde la concepción inicial hasta la obtención del producto final. Este cronograma permitió abordar de manera exhaustiva cada etapa del proyecto y evaluar su viabilidad.

1.6 Objetivo general

Elaborar adoquines para tránsito liviano aprovechando los lodos de un sistema de tratamiento primario por la formación de lodos del sistema primario, y poliuretano reciclado.

1.7 Objetivos específicos

- Evaluar si los lodos del clarificador y el material poliuretano cumplen con las especificaciones técnicas requeridas para la fabricación de adoquines de tránsito liviano.
- Establecer una fórmula óptima en unidades de cálculo para determinar la mezcla idónea en la producción de adoquines.
- Comparar mediante cuadros descriptivos los materiales y sus respectivos porcentajes utilizados en la elaboración de adoquines a partir de lodos del clarificador y en contraste con los adoquines convencionales.
- Someter los adoquines a pruebas mecánicas y de resistencia variadas con el fin de evaluar su idoneidad para su empleo en tránsito liviano.

1.8 Hipótesis

A través de la utilización de lodos provenientes del sistema de tratamiento primario, se buscará la obtención de adoquines a partir de estos residuos.

2. Fundamento teórico

2.1 Estado del arte

Espinoza Quiñones et al. (2020) realizaron un estudio de viabilidad centrado en la creación de adoquines ecológicos utilizando lodos residuales de la industria papelera, enriquecidos con restos y trazas de mármol y bentonita sódica importados desde China. La problemática surge debido a la generación masiva de lodos residuales por las industrias papeleras y la falta de infraestructura adecuada en los rellenos sanitarios, lo que impacta negativamente en el medio ambiente. Por ende, la reutilización de estos lodos se presenta como la opción más idónea. Se llevó a cabo un estudio de mercado mediante encuestas para conocer las preferencias de los clientes y analizar la oferta y demanda del sector, si bien la situación cambió significativamente debido a la pandemia del COVID-19 a partir de marzo. La ingeniería del proyecto se enfocó en obtener un óptimo rendimiento en compresión y flexión para los adoquines, y se diseñó la planta de producción. Se abordaron aspectos organizacionales clave para establecer la empresa, incluyendo estrategias de marketing para el posicionamiento de la marca, fijación de precios y publicidad. Para asegurar la sostenibilidad, se evaluaron los impactos ambientales y se propusieron planes de mitigación. La planificación financiera concluyó que el proyecto es viable, rentable y económicamente factible.

Por otro lado, Camargo y Yambay (2020) examinaron la viabilidad de utilizar los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Quitumbe (PTAR-Q) para fabricar ladrillos artesanales. Se probaron diferentes porcentajes de lodo húmedo (10%, 15% y 20%) y lodo seco (5%, 10% y 15%). Se evaluaron las propiedades mecánicas mediante ensayos de compresión y absorción de agua según la norma NTE INEN 3049-5. Los ladrillos con un 5% de adición de lodo húmedo mostraron un aumento del 23% en resistencia a la compresión en comparación con los ladrillos tradicionales. Se concluye que es factible utilizar lodos residuales en la fabricación de mampostería no estructural, beneficiando a la PTAR-Q y reduciendo los desechos en escombreras.

Un proyecto de investigación realizado por Álvarez et al. (2020) buscaron encontrar una alternativa viable para la disposición de los residuos de lodo de la empresa Empacor S.A. El estudio consta de tres fases: recolección de datos secundarios sobre impactos ambientales causados por la disposición actual de lodos papeleros, análisis de

aplicaciones y estudios a nivel mundial, y la evaluación de posibles alternativas en Bogotá y sus alrededores. Se utilizó un proceso analítico de jerarquización para seleccionar la mejor opción de reutilización de lodos, y se propone su uso como combustible secundario en una central termoeléctrica cercana a la capital. Este enfoque podría aumentar el margen de utilidad de Empacor S.A. en aproximadamente \$ 215 millones anuales y reducir el impacto ambiental. Se presentan recomendaciones para el tratamiento de los lodos papeleros y la mejora ambiental a la empresa.

Valderrama (2013) con el objetivo de comprender los tipos de lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR en Chinavita y determinar posibles estrategias de manejo, se llevó a cabo un muestreo y análisis agronómico, contenido de metales pesados y análisis microbiológico. Al comparar los resultados con las normativas de la EPA 40 CFR parte 503, se proponen alternativas de estabilización química mediante cal y estabilización biológica a través de la digestión anaerobia. Se optó por la estabilización química debido a su facilidad de implementación. Con el contenido de materia orgánica y la reducción de patógenos, se busca usar los lodos en plantaciones forestales, recuperación de suelos degradados y producción de abonos y enmiendas, sin restricciones.

La Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A. (CEDAL), fundada en 1974 en Latacunga, inició su producción en 1976 como una empresa de extrusión de aluminio para atender la demanda de perfiles arquitectónicos y estructurales. El proceso de anodizado produce aguas residuales y lodo que son tratados en la Planta de Efluentes, generando residuos en forma de lodo. Este estudio tiene como objetivo ofrecer una alternativa sostenible para la disposición de estos lodos, reduciendo costos y volúmenes de desechos. Se elaboraron materiales para la construcción, incluyendo adoquines y concreto, utilizando lodos como materia prima. Las muestras con un 25% y 35% de lodo seco demostraron superar el límite mínimo de resistencia, confirmando la factibilidad de reutilizar los lodos en materiales de construcción Razo (2020).

Este trabajo documental presenta un análisis investigativo sobre alternativas de manejo y aprovechamiento de lodos residuales de una planta de asfalto en Mavi Pavimentaciones S.A.S. Se examinaron causas y consecuencias en la producción y entorno laboral, caracterizando la tecnología Astecnia utilizada en la planta. Se evaluaron tres alternativas: disposición final en rellenos, disposición final en proceso de secado y

lavado, y se seleccionó esta última debido a su potencial para dar un manejo y reutilización adecuados a los lodos. Esta opción beneficiaría la empresa económicamente y mejoraría la organización y seguridad en el sitio de trabajo Devia y Yate (2022).

2.2. Lodos residuales

Los lodos residuales son subproductos generados en diversos procesos de tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales. Estos lodos contienen materia orgánica, sólidos suspendidos y elementos contaminantes, lo que los hace un desafío para la gestión ambiental. Sin embargo, también presentan oportunidades para el aprovechamiento y valorización. El tratamiento adecuado de los lodos residuales es esencial para evitar impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública. En la actualidad, se investigan y desarrollan métodos sostenibles para su tratamiento, como la producción de biogás, compostaje y su uso como fuente de nutrientes para la agricultura Velázquez et al. (2019).

En la industria, los lodos se definen como residuos sólidos o semisólidos que surgen como subproducto de diversos procesos de tratamiento, producción o purificación de líquidos, principalmente en el tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales Cupe y Juscamaita (2018). Estos lodos son una amalgama de materia orgánica, sólidos suspendidos, compuestos químicos y elementos contaminantes, separados del líquido durante el proceso de tratamiento. La formación de lodos es una consecuencia natural del proceso de limpieza y purificación de aguas, donde los sólidos y materiales no deseados se separan del agua para su posterior eliminación o aprovechamiento Mantilla et al. (2017). La gestión adecuada de estos lodos es esencial para prevenir impactos ambientales negativos y maximizar su reutilización o valorización. Existen diversas opciones de tratamiento, incluyendo la deshidratación, compostaje, incineración o su utilización como abono en la agricultura, dependiendo de sus contenidos y características particulares Huamán y Huamán (2020).

2.2.2.1. Origen de lodos residuales

El origen de los lodos residuales se encuentra en la naturaleza misma de los procesos de tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales, donde estos subproductos sólidos o semisólidos se generan como resultado inevitable del proceso de

limpieza y purificación del agua. Estos lodos, también conocidos como biosólidos, son una combinación de materia orgánica, sólidos suspendidos, compuestos químicos y elementos contaminantes, que se separan del líquido durante el proceso de tratamiento Rice et al. (2017).

Los lodos residuales se originan en diversas actividades industriales, así como en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, industriales y comerciales. Algunas de las principales fuentes generadoras de lodos residuales son:

1. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Estas plantas reciben aguas residuales de áreas urbanas y llevan a cabo una serie de procesos de tratamiento para eliminar contaminantes antes de liberar el agua tratada al medio ambiente. Durante este proceso, los sólidos suspendidos se separan del agua y se concentran para formar los lodos residuales.
2. Industria Alimentaria: La producción de alimentos, como la fabricación de aceites vegetales, procesamiento de carnes, lácteos y productos agrícolas, genera lodos residuales con alto contenido de materia orgánica.
3. Industria Química y Petroquímica: Los procesos industriales que involucran la fabricación de productos químicos y derivados del petróleo también generan lodos residuales con compuestos tóxicos y contaminantes.
4. Industria Papelera: La producción de papel genera grandes cantidades de lodos residuales, principalmente compuestos por fibras de celulosa y otros productos químicos utilizados en el proceso.
5. Industria Minera: La minería produce lodos residuales con alto contenido de metales pesados y sustancias tóxicas, resultado de la extracción y procesamiento de minerales.

La composición y características de los lodos residuales varían significativamente dependiendo de la fuente y el tipo de tratamiento realizado. Por ejemplo, los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales tienden a ser ricos en materia orgánica, mientras que los lodos provenientes de la industria química pueden contener productos químicos peligrosos Angelakis et al. (2018). Es importante tener en cuenta que la generación de lodos residuales representa un desafío en términos de gestión y disposición adecuada, ya que estos residuos pueden contener sustancias tóxicas y patógenos que pueden ser dañinos para el medio ambiente y la salud pública. Por lo tanto,

es fundamental implementar prácticas de tratamiento y disposición seguras y sostenibles para los lodos residuales.

En la actualidad, se están investigando y desarrollando diversas alternativas para el manejo y aprovechamiento de los lodos residuales. Algunas de estas opciones incluyen la producción de biogás a través de la digestión anaerobia, el compostaje para la producción de abono orgánico y la utilización de lodos como fuente de nutrientes en la agricultura. Los lodos residuales son subproductos inevitables de los procesos de tratamiento de aguas residuales y actividades industriales. Su origen diverso y composición compleja hacen que su gestión adecuada sea de vital importancia para minimizar su impacto ambiental y aprovechar su potencial como recurso valioso. Se requiere un enfoque integral y sostenible para el manejo de lodos residuales, que involucre una combinación de tecnologías de tratamiento, regulaciones efectivas y prácticas de gestión responsables Yue et al. (2018).

2.2.2.2. Evolución del manejo de lodos residuales

El manejo adecuado de los lodos residuales, también conocidos como biosólidos, ha sido un desafío ambiental y sanitario a lo largo de la historia. Los lodos residuales son subproductos inevitables de los procesos de tratamiento de aguas residuales y actividades industriales, y su gestión ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo Piedra (2020).

Los inicios del manejo de lodos residuales, históricamente, los lodos residuales eran considerados como residuos sin valor y se descartaban en ríos o vertederos sin ningún tipo de tratamiento. Esta práctica causaba graves problemas de contaminación y propagación de enfermedades. Con el advenimiento de la Revolución Industrial, el problema de los lodos residuales se intensificó debido al aumento de la producción industrial y la urbanización Hualpa (2019).

Las primeras técnicas de tratamiento fueron a finales del siglo XIX y principios del XX, se empezaron a desarrollar las primeras técnicas de tratamiento de lodos residuales, como la sedimentación y la filtración, que permitían separar los sólidos del agua residual. Sin embargo, estos métodos iniciales eran rudimentarios y no lograban una completa estabilización y reducción del volumen de los lodos (Buitrago (2018).

Los avances en la digestión anaerobia, en la década de 1930, se introdujo la digestión anaerobia, un proceso biológico en ausencia de oxígeno, que permitía la descomposición de la materia orgánica presente en los lodos, produciendo biogás como subproducto. Esta tecnología representó un avance significativo en la estabilización de los lodos y la generación de energía García (2021).

El auge del compostaje de lodos residuales, en las últimas décadas del siglo XX, el compostaje de lodos residuales se consolidó como una alternativa sostenible y ambientalmente amigable. Mediante el proceso de compostaje, los lodos se mezclan con materiales orgánicos y se descomponen para producir un abono rico en nutrientes, que puede utilizarse en la agricultura y en la restauración de suelos degradados Chaparro y Zorro (2017). Mientras que su enfoque en la valorización y reutilización, en la actualidad, la valorización y reutilización de los lodos residuales se han convertido en prioridades para la gestión sostenible de estos subproductos. Se han desarrollado tecnologías avanzadas, como la pirolisis y la gasificación, que permiten convertir los lodos en biocombustibles y productos químicos de valor añadido.

La evolución del manejo de lodos residuales ha sido marcada por avances significativos en la tecnología y la comprensión de su potencial como recurso valioso Marín (2019). Desde los inicios de su gestión rudimentaria hasta las técnicas actuales de valorización, se ha transitado hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La búsqueda continua de soluciones innovadoras para el manejo de lodos residuales es esencial para enfrentar los desafíos ambientales y mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. La valorización y reutilización de los lodos se presentan como una perspectiva prometedora para reducir el impacto ambiental y maximizar su aprovechamiento como recurso valioso.

2.3. Relevancia y aplicaciones de los lodos residuales en diversas industrias

Los lodos residuales, también conocidos como biosólidos, han adquirido una creciente relevancia en diversas industrias debido a su potencial como recurso valioso y sostenible. Estos subproductos sólidos o semisólidos, generados en procesos de tratamiento de aguas residuales y actividades industriales, han sido tradicionalmente considerados como residuos sin valor, pero en la actualidad, se están reconociendo sus múltiples aplicaciones beneficiosas en diferentes sectores Araujo et al. (2018).

Ahora bien, en la industria agrícola, uno de los principales usos de los lodos residuales es como enmienda orgánica en la agricultura. Los lodos, ricos en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, pueden mejorar la fertilidad del suelo, promoviendo el crecimiento de cultivos y aumentando el rendimiento agrícola. El uso de lodos residuales en la agricultura contribuye a la conservación de recursos naturales, disminuye la necesidad de fertilizantes sintéticos y favorece la retención de humedad en el suelo, reduciendo la erosión.

Mientras que, en la industria de la construcción, los lodos residuales también han encontrado aplicaciones en la industria de la construcción. Mediante el proceso de deshidratación y estabilización, los lodos se pueden convertir en materiales de construcción como ladrillos, bloques o adoquines. Estos productos a base de lodos residuales ofrecen una alternativa sostenible y económica a los materiales tradicionales, reduciendo la necesidad de recursos naturales y fomentando la economía circular.

Por otro lado, en la industria energética, la generación de energía a partir de los lodos residuales es otra aplicación relevante. Mediante la digestión anaerobia, los lodos pueden ser sometidos a un proceso biológico que produce biogás, una mezcla de metano y dióxido de carbono, que puede utilizarse como combustible para la generación de electricidad y calor. Esta práctica no solo reduce la dependencia de fuentes de energía fósiles, sino que también minimiza la liberación de gases de efecto invernadero.

De igual manera en industria de la cerámica y cemento, los lodos residuales se utilizan como aditivos en la formulación de arcillas y cementos. Los lodos, al ser sometidos a altas temperaturas durante el proceso de cocción, se convierten en materiales cerámicos y cementicios que pueden mejorar las propiedades mecánicas y estructurales de los productos finales.

Otro campo que se une a esta área es la industria textil y papelera, ya que, en la industria textil, los lodos residuales se utilizan como agentes de floculación en el tratamiento de aguas residuales de los procesos de tintura y lavado. Por otro lado, en la industria papelera, los lodos pueden ser reciclados y reintegrados al proceso de producción de papel como fibras secundarias, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes y disminuyendo la huella ambiental del sector.

Los lodos residuales han dejado de ser considerados como simples desechos para convertirse en valiosos recursos con múltiples aplicaciones en diversas industrias. Su utilización como enmienda agrícola, materiales de construcción, fuente de energía renovable y aditivos industriales, demuestra su relevancia en la economía circular y en la promoción de prácticas sostenibles. No obstante, es importante destacar la necesidad de un manejo adecuado y responsable de los lodos residuales, garantizando su tratamiento adecuado para evitar impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública. La investigación continua en el desarrollo de tecnologías avanzadas y la promulgación de políticas regulatorias eficientes son clave para maximizar el potencial de los lodos residuales como recursos valiosos en diferentes industrias.

2.4. Características de los lodos residuales

Las características de los lodos residuales son fundamentales para entender su composición y aplicaciones. Los lodos residuales son subproductos generados en diversos procesos de tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales Tito (2022). Estos lodos están compuestos por una mezcla compleja de materia orgánica, sólidos suspendidos, compuestos químicos y elementos contaminantes que son separados del líquido durante el proceso de tratamiento Iyare et al. (2020)

La cantidad y naturaleza de los lodos residuales pueden variar considerablemente dependiendo del origen y la calidad del agua tratada. Los lodos pueden clasificarse como húmedos o secos, siendo los primeros aquellos con mayor contenido de agua y los segundos con menor humedad Guven et al. (2017). Además, los lodos residuales pueden ser biodegradables o no biodegradables, lo que afecta su capacidad de descomposición natural.

Otra característica importante de los lodos residuales es su contenido de nutrientes. Estos subproductos contienen altas concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que los convierte en una valiosa fuente de nutrientes para la agricultura Liu et al. (2019). Sin embargo, también pueden contener elementos tóxicos y compuestos orgánicos persistentes que representan un riesgo para el medio ambiente y la salud pública Alatabi et al. (2017).

La estabilización de los lodos residuales es un aspecto crucial en su manejo. Los

lodos frescos son altamente biodegradables y pueden generar olores desagradables y liberar metano si no son tratados adecuadamente Sabri et al. (2020). Por tanto, es importante aplicar procesos de estabilización como la digestión anaerobia, el compostaje o la incineración para reducir la carga orgánica y minimizar el riesgo de contaminación Nancharaiah y Sarvajith (2019).

Las características de los lodos residuales varían en función de su origen, contenido de nutrientes, biodegradabilidad y posibles riesgos para el medio ambiente. Estos subproductos deben ser gestionados adecuadamente para maximizar su aprovechamiento como recurso valioso y minimizar su impacto negativo en el entorno. La investigación continua y la implementación de tecnologías sostenibles son fundamentales para lograr una gestión eficiente y responsable de los lodos residuales en diversas industrias.

2.5. Composición física, química y biológica de los lodos residuales

Los lodos residuales son subproductos generados en procesos de tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales, cuya composición es compleja y variable. La composición física de los lodos incluye sólidos suspendidos, partículas orgánicas e inorgánicas, así como materiales coloidales Huamán y Campos (2020). Estos componentes pueden variar en tamaño, desde partículas visibles hasta materiales microscópicos.

En cuanto a la composición química, los lodos residuales contienen una amplia gama de elementos y compuestos. Entre los elementos más comunes se encuentran el carbono, nitrógeno, fósforo y potasio, que son esenciales para el crecimiento de microorganismos y plantas. Además, los lodos pueden contener metales pesados y sustancias tóxicas provenientes de diversas actividades industriales y domésticas Cruz (2019).

La composición biológica de los lodos está conformada por una diversidad de microorganismos, como bacterias, virus y hongos. Estos microorganismos son responsables de la degradación de la materia orgánica presente en los lodos, transformándola en subproductos más estables y menos contaminantes Cristina (2021).

2.6. Tipos de lodos residuales

2.6.1. Lodos primarios

Los lodos primarios se generan en la primera etapa del tratamiento de aguas residuales, en la cual se realiza la separación física de sólidos suspendidos y materiales flotantes presentes en el agua. Estos lodos tienen una alta concentración de materia orgánica y sólidos, pero su contenido de nutrientes es relativamente bajo Suárez (2017).

2.6.2. Lodos secundarios

Los lodos secundarios, también conocidos como lodos biológicos, se producen en la segunda etapa del tratamiento de aguas residuales, en la cual se emplean procesos biológicos para eliminar la materia orgánica disuelta. Estos lodos son el resultado de la sedimentación de microorganismos y materia orgánica, lo que les confiere un alto contenido de nutrientes como nitrógeno y fósforo Mantilla et al. (2017)

2.6.3. Lodos deshidratados

Los lodos deshidratados son aquellos sometidos a un proceso de eliminación de agua para reducir su volumen y facilitar su manejo y disposición final. Este proceso de deshidratación puede llevarse a cabo mediante la aplicación de fuerza centrífuga, filtración, o mediante el uso de agentes deshidratantes como polímeros. Los lodos deshidratados suelen tener una mayor concentración de sólidos y menor contenido de agua, lo que los hace más fáciles de transportar y disponer de manera segura Salameh et al. (2020).

La composición física, química y biológica de los lodos residuales varía según su origen y el proceso de tratamiento al que han sido sometidos. Existen diferentes tipos de lodos, como los primarios, secundarios y deshidratados, cada uno con características particulares que deben ser consideradas en su manejo y aplicaciones en distintos sectores industriales y ambientales. Un adecuado conocimiento de estas características es esencial para desarrollar prácticas sostenibles y eficientes en el tratamiento y aprovechamiento de los lodos residuales.

2.7. Factores que influyen en la generación de lodos residuales

La generación de lodos residuales está influenciada por diversos factores que varían según el tipo de industria y el proceso de tratamiento de aguas o efluentes. Algunos de los factores clave incluyen la carga de contaminantes en el agua residual, la eficiencia de los sistemas de tratamiento, la calidad del agua de entrada, y las prácticas de conservación y reutilización de agua Jaramillo y Tamayo (2019). En industrias como la alimentaria y química, la naturaleza y cantidad de los productos y subproductos utilizados determinan la composición de los lodos residuales generados. En el caso de aguas residuales municipales, la densidad poblacional y el nivel de desarrollo urbano también juegan un papel importante en la generación de lodos. Además, los avances tecnológicos en los sistemas de tratamiento pueden influir en la producción de lodos, ya que procesos más eficientes pueden reducir la cantidad de sólidos suspendidos y materia orgánica en el agua tratada, generando menos lodos Puente et al. (2020).

2.8. Impacto ambiental y sanitario de los lodos residuales

La gestión inadecuada de los lodos residuales puede tener graves consecuencias para el medio ambiente y la salud pública. Los lodos contienen una carga significativa de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, que si son liberados al ambiente sin control pueden causar eutrofización en cuerpos de agua y afectar negativamente la biodiversidad acuática Ayala (2020).

Asimismo, los lodos residuales pueden contener compuestos tóxicos, metales pesados y patógenos que representan riesgos para la salud humana y el ecosistema. La disposición inapropiada de lodos en vertederos o cuerpos de agua puede contaminar suelos y fuentes de agua subterránea, afectando la calidad del agua potable y de los recursos naturales. Sin embargo, cuando son manejados adecuadamente, los lodos residuales pueden ser una fuente valiosa de nutrientes y materia orgánica para la agricultura y la restauración de suelos degradados. La valorización de los lodos a través de métodos de tratamiento sostenibles puede contribuir a reducir su impacto ambiental y promover su uso beneficioso Ospina et al. (2017).

2.9. Métodos de tratamiento de lodos residuales

Existen diversas tecnologías y métodos de tratamiento para reducir la cantidad y

toxicidad de los lodos residuales, así como para aprovechar su contenido de nutrientes y materia orgánica. Entre los principales métodos de tratamiento se encuentran la digestión anaerobia, el compostaje, la incineración, la deshidratación y la estabilización química González y Prado (2019).

La digestión anaerobia es un proceso biológico que descompone la materia orgánica en lodos mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás como subproducto. El compostaje, por otro lado, utiliza la descomposición natural de la materia orgánica para obtener un producto final estable y libre de olores, que puede ser utilizado como fertilizante en la agricultura Toasa (2018).

La incineración es una opción para reducir significativamente el volumen de los lodos, así como para destruir organismos patógenos y compuestos tóxicos, generando calor y energía en el proceso. La deshidratación, por su parte, utiliza tecnologías mecánicas o térmicas para eliminar el exceso de agua de los lodos, facilitando su transporte y disposición Sanz Vera (2018).

La estabilización química es otro método que utiliza aditivos químicos para reducir la biodegradabilidad y toxicidad de los lodos, mejorando su manejo y utilización. La selección del método de tratamiento adecuado dependerá de las características específicas de los lodos y los objetivos de gestión y aprovechamiento que se busquen alcanzar. Un enfoque integrado y sostenible en el tratamiento de lodos residuales es fundamental para mitigar su impacto ambiental y maximizar su potencial como recurso valioso en diversas aplicaciones industriales y ambientales Sánchez et al. (2020).

2.10. Descripción de tecnologías de tratamiento convencionales

En el marco del tratamiento de lodos residuales, existen diversas tecnologías convencionales que han sido ampliamente utilizadas y estudiadas en la industria. Estas tecnologías buscan reducir la cantidad de sólidos y materia orgánica presentes en los lodos, así como estabilizarlos para su posterior disposición o reutilización. Dos de las tecnologías más destacadas son la digestión anaeróbica y los lodos activos Mantilla et al. (2017).

capacidad para reducir el impacto ambiental de los lodos residuales. Sin embargo, la selección de la tecnología más adecuada dependerá de las características específicas de los lodos, los objetivos de tratamiento y las condiciones operativas de cada planta de tratamiento. Un enfoque integral y bien fundamentado es esencial para lograr una gestión sostenible y eficiente de los lodos residuales Arrieta y Chica (2019).

2.11. Avances en tecnologías de tratamiento

En el campo del tratamiento de lodos residuales, se han desarrollado continuamente nuevas tecnologías con el objetivo de mejorar la eficiencia de tratamiento, reducir los impactos ambientales y aprovechar de manera más efectiva los recursos presentes en los lodos. Estos avances han llevado a la implementación de tecnologías innovadoras que ofrecen soluciones más sostenibles y rentables para la gestión de lodos (Prieur et al., 2022) .

2.11.1. Secado térmico

El secado térmico es una tecnología de tratamiento de lodos que utiliza calor para eliminar el contenido de agua, reduciendo así su volumen y aumentando su contenido de materia seca. Esta técnica se realiza mediante la aplicación de calor en secadores específicos, como secadores de tambor, de banda o de lecho fluidizado Alarcón y Carranza (2021).

El secado térmico es especialmente útil para lodos con un alto contenido de agua, ya que reduce significativamente los costos de transporte y disposición. Además, el lodo seco resultante puede ser más fácilmente manejado y utilizado en diversas aplicaciones, como combustible para calderas, producción de biogás, o como material para la construcción y la agricultura.

2.11.2. Incineración

La incineración es una tecnología de tratamiento que consiste en la quema controlada de lodos a altas temperaturas, convirtiéndolos en cenizas. Este proceso elimina la mayoría de los componentes orgánicos y reduce el volumen de los lodos significativamente.

La incineración de lodos es una opción atractiva para aquellos casos en los que se requiere una reducción drástica de los volúmenes de lodos o cuando se busca una eliminación segura de patógenos y compuestos tóxicos. Además, la incineración puede ser una fuente de energía, ya que el calor generado durante el proceso puede utilizarse para generar electricidad (Sanz Vera, 2018).

2.11.3. Pirólisis

La pirólisis es una tecnología de tratamiento térmico que implica la descomposición de los lodos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este proceso transforma los lodos en productos útiles, como gases, aceites y carbón, que pueden tener aplicaciones industriales o ser utilizados como combustibles. La pirólisis tiene ventajas significativas, como la producción de biocombustibles y productos químicos valiosos a partir de los lodos, reduciendo así su impacto ambiental y generando ingresos adicionales. Sin embargo, también presenta desafíos, como la necesidad de un control preciso de las condiciones de operación para obtener productos de alta calidad (Velázquez et al., 2019).

2.12. Consideraciones sobre la reutilización de lodos tratados

La reutilización de lodos tratados se presenta como una opción atractiva para cerrar el ciclo de los recursos y minimizar la generación de residuos. Sin embargo, antes de considerar su reutilización, es fundamental evaluar cuidadosamente la calidad del lodo tratado y asegurarse de que cumpla con los estándares y regulaciones establecidas para su aplicación específica. Además, se deben considerar aspectos relacionados con la salud y la seguridad, así como los posibles impactos ambientales de su reutilización. Es esencial contar con una evaluación de riesgos y una planificación adecuada para garantizar que la reutilización de los lodos tratados sea segura y beneficie tanto a la industria como al medio ambiente (Castillo, 2022).

2.13. Gestión y disposición de lodos residuales

La gestión y disposición adecuada de los lodos residuales es un aspecto crucial en el manejo de estos subproductos. Se deben considerar diferentes opciones de disposición, como la aplicación agrícola, la valorización energética y la disposición en vertederos. Cada opción tiene ventajas y desventajas, y la elección dependerá de las características del lodo, los requisitos regulatorios y las consideraciones ambientales (Espinoza Eche,

2022). La gestión efectiva implica la implementación de prácticas de manejo seguro y eficiente que minimicen los impactos negativos y maximicen el aprovechamiento de los recursos presentes en los lodos residuales.

2.14. Estrategias para el manejo seguro y eficiente de lodos residuales

El manejo seguro y eficiente de lodos residuales requiere la implementación de estrategias integrales que aborden aspectos como la recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final (Falconi Garay, 2017). Es fundamental contar con un plan de gestión que considere los riesgos asociados y las medidas de prevención y mitigación adecuadas. La capacitación del personal involucrado y el cumplimiento de las regulaciones ambientales son aspectos esenciales para asegurar un manejo adecuado de los lodos residuales.

2.15. Métodos de disposición final de lodos residuales

Existen diferentes métodos de disposición final de lodos residuales, cada uno con sus ventajas y desventajas. Los vertederos son una opción común, pero pueden presentar riesgos ambientales y de contaminación si no se gestionan adecuadamente. La aplicación agrícola puede ser una alternativa beneficiosa, siempre y cuando se cumplan los estándares de calidad y se evite la acumulación de contaminantes en el suelo. La valorización energética, como la incineración o la pirolisis, puede proporcionar una solución para la reducción de volúmenes y la obtención de energía renovable, pero también implica consideraciones ambientales y de emisiones (Ramírez & Alcocer, 2018).

2.15.1. Vertederos

Los vertederos han sido históricamente una opción común para la disposición final de lodos residuales. En este método, los lodos son descargados en áreas designadas de almacenamiento y se dejan para su degradación natural con el tiempo. Sin embargo, esta práctica plantea desafíos ambientales, ya que los lodos pueden liberar lixiviados que contienen contaminantes y nutrientes, los cuales pueden filtrarse al suelo y las aguas subterráneas, generando una potencial contaminación ambiental. Además, los lodos almacenados pueden emitir gases de efecto invernadero, como metano y dióxido de carbono, contribuyendo al cambio climático (Aller Díaz, 2023).

2.15.2. Aplicación agrícola

La aplicación agrícola de lodos residuales trata de reutilizar los nutrientes y la materia orgánica presentes en los lodos para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la producción agrícola. Cuando los lodos cumplen con ciertos criterios de calidad y están libres de contaminantes peligrosos, pueden utilizarse como enmiendas del suelo o fertilizantes orgánicos. Sin embargo, es esencial realizar una adecuada caracterización de los lodos y monitoreo para evitar la acumulación de metales pesados y compuestos tóxicos en el suelo y, por ende, en los cultivos. Asimismo, se deben seguir las regulaciones establecidas para garantizar la seguridad de esta práctica y proteger tanto la salud humana como el medio ambiente Velázquez et al. (2019).

2.15.3. Valorización energética de lodos residuales

La valorización energética de lodos residuales busca aprovechar la materia orgánica presente en los lodos como fuente de energía renovable. Dos de los métodos más utilizados son la incineración y la pirolisis. La incineración implica la quema controlada de los lodos, generando calor que puede ser utilizado para generar electricidad o calor. La pirolisis, por otro lado, descompone los lodos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, produciendo biocombustibles y otros productos químicos. Estos métodos no solo reducen significativamente el volumen de lodos, sino que también pueden contribuir a la generación de energía limpia y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero Alarcón y Carranza (2021).

2.16. Riesgos asociados con la gestión inadecuada de los lodos residuales

La gestión inadecuada de los lodos residuales puede tener graves consecuencias ambientales, sanitarias y sociales. Los lodos mal tratados o dispuestos incorrectamente pueden contaminar suelos y cuerpos de agua, afectando negativamente la biodiversidad y la salud humana. Además, la liberación de gases de efecto invernadero y malos olores puede generar conflictos en las comunidades cercanas a las instalaciones de tratamiento. Es crucial reconocer y abordar estos riesgos, implementando medidas adecuadas de control y prevención para garantizar una gestión responsable y segura de los lodos residuales Rebolledo (2018).

3. Materiales y Métodos

3.1. Diseño de la Investigación

3.1.1. Tipo de investigación

El tema de "Elaboración de adoquines aprovechando los lodos de un sistema de tratamiento primario en una industria papelera" es una investigación experimental debido a que busca establecer una relación causal entre dos variables principales: la elaboración de adoquines y el aprovechamiento de los lodos residuales de un sistema de tratamiento primario en una industria papelera. En esta investigación, se llevó a cabo un proceso de recolección de lodos de dicho sistema de tratamiento primario para posteriormente emplearlos en la fabricación de adoquines. A través de un diseño experimental riguroso, se varia distintas condiciones de composición y preparación de los adoquines utilizando los lodos obtenidos. Dónde, se midió y comparó la calidad, resistencia y propiedades físicas de los adoquines resultantes en función de las diferentes variables manipuladas. Este enfoque experimental permite obtener datos cuantificables y fiables, lo que contribuirá a determinar el impacto y viabilidad de este nuevo proceso en términos de sostenibilidad ambiental y eficiencia en el aprovechamiento de residuos industriales.

Las papeleras generan grandes cantidades de lodos en sus sistemas de tratamiento primario, los cuales, en muchos casos, son desechados sin un adecuado aprovechamiento. Esta investigación busca abordar este problema medioambiental al proponer una solución innovadora para el manejo de estos residuos. Al emplear los lodos en la elaboración de adoquines, se busca no solo reducir la carga contaminante en los vertederos y cuerpos de agua, sino también generar un producto útil y funcional para la construcción. A través de la experimentación rigurosa, se explorarán diferentes formulaciones de adoquines que incorporen los lodos, evaluando su resistencia, durabilidad y características físicas. Los resultados de esta investigación tienen el potencial de ofrecer una alternativa sostenible y económicamente viable para el tratamiento de los residuos de las papeleras industriales, promoviendo así una industria más eco amigable y respetuosa con el medio ambiente.

3.2. Población y Muestra

La población en este caso está compuesta por los lodos generados en el sistema de tratamiento primario de la industria papelera. La muestra sería una selección

representativa de estos lodos, tomados de manera aleatoria o siguiendo criterios específicos de inclusión y exclusión, dependiendo de la disponibilidad y características de los lodos. Es importante mencionar que la muestra también puede incluir otros elementos, como los materiales utilizados en la elaboración de los adoquines, los diferentes aditivos o componentes que se agreguen para mejorar sus propiedades, así como los propios adoquines resultantes del proceso. Además, si la investigación implica pruebas físicas o mecánicas de los adoquines, la muestra también puede incluir aquellos que sean sometidos a dichas pruebas para obtener resultados estadísticamente significativos. En resumen, la muestra estaría compuesta por una selección representativa de lodos de la industria papelera y otros elementos relacionados con el proceso de elaboración de los adoquines, con el objetivo de realizar un estudio exhaustivo y confiable que permita obtener conclusiones sólidas sobre la viabilidad y beneficios del aprovechamiento de los lodos en la fabricación de adoquines.

3.3. Descripción de variables

En esta investigación experimental, las variables independientes son aquellas que se manipulan o controlan para evaluar su efecto en otras variables. Por otro lado, las variables dependientes son aquellas que se miden para determinar si hay algún cambio o efecto causado por la manipulación de las variables independientes. A continuación, se identifican las variables independientes y dependientes relevantes:

3.3.1. Variables independientes

Composición de los adoquines:

Esta variable se refiere a los diferentes componentes y proporciones utilizadas para fabricar los adoquines, incluyendo los lodos generados en el sistema de tratamiento primario y otros posibles materiales o aditivos empleados en la mezcla como (lodos del clarificador, material poliuretano, piedra (lastre) y polvillo (cartón)).

Método de elaboración de los adoquines:

Esta variable incluye las distintas técnicas o procesos utilizados en la fabricación de los adoquines, como el tipo de molde, el tiempo de secado y la temperatura de curado, entre otros.

3.3.2. Variables dependientes

Resistencia de los adoquines:

Esta variable mide la capacidad de los adoquines para soportar cargas y fuerzas externas sin sufrir daños o roturas. Se evaluará la resistencia en función de la composición y el método de elaboración.

Durabilidad de los adoquines:

Esta variable se refiere a la capacidad de los adoquines para mantener su calidad y aspecto a lo largo del tiempo, especialmente en condiciones ambientales adversas.

Propiedades físicas de los adoquines:

Se incluyen aquí características como el color, textura, absorción de agua y porosidad de los adoquines, que pueden variar en función de los distintos materiales y procesos utilizados en su elaboración.

Impacto ambiental:

Esta variable busca medir el impacto ambiental generado por el uso de los lodos en la fabricación de adoquines, considerando aspectos como la reducción de residuos, la huella de carbono y la sostenibilidad del proceso.

3.4. Instrumentos de recopilación de datos

En la presente investigación fue fundamental que los instrumentos de recopilación de datos sean adecuadamente seleccionados, calibrados y utilizados para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos durante la investigación. Además, se debe asegurar la consistencia en la recopilación de datos entre las diferentes muestras o grupos experimentales para permitir una comparación válida y significativa. Detallándolos a continuación:

Registro de datos sobre los lodos: Para obtener información sobre las características físicas y químicas de los lodos generados en el sistema de tratamiento primario de la industria papelera, se puede utilizar un formulario estructurado o una hoja

de cálculo para registrar los datos obtenidos mediante análisis de laboratorio u otras técnicas de medición.

Cuestionario o entrevista: Para obtener información adicional sobre el proceso de tratamiento primario, la generación de los lodos y su disposición actual en la industria papelera, se puede diseñar un cuestionario o realizar entrevistas a los responsables del sistema de tratamiento o personal de la empresa.

Molde o forma para adoquines: Durante el proceso de fabricación de los adoquines utilizando los lodos, se requerirá un molde o una forma específica para darles la forma deseada. Este molde también puede ayudar a medir dimensiones clave de los adoquines.

Balanzas: Será necesario utilizar balanzas de precisión para medir las cantidades exactas de los materiales utilizados en la elaboración de los adoquines, como los lodos, agregados y otros aditivos.

Máquina de ensayo: Si se realizan pruebas de resistencia o durabilidad de los adoquines, se requerirá una máquina de ensayo, como una máquina de compresión, para aplicar cargas y medir la resistencia de los adoquines bajo diferentes condiciones.

Equipos de laboratorio: Si se realizan análisis detallados de los materiales, se utilizarán equipos de laboratorio para evaluar las propiedades físicas y químicas de los lodos y los adoquines resultantes.

Medidores y sensores: Dependiendo de las variables que se deseen medir, pueden requerirse medidores y sensores específicos para registrar datos en tiempo real sobre aspectos como la absorción de agua, resistencia, porosidad, entre otros.

3.4.1. Proceso de elaboración

El proceso de elaboración de adoquines utilizando los materiales mencionados sería un procedimiento técnico y cuidadosamente diseñado. A continuación, se presenta una descripción general del proceso:

Preparación de los lodos del clarificador:

Los lodos generados en el sistema de tratamiento primario de la industria papelera deben ser recolectados y almacenados en un área designada para su posterior utilización. Es importante asegurar que los lodos estén limpios y libres de impurezas.

Selección y preparación de materiales adicionales:

El poliuretano, la piedra (lastre) y el polvillo de cartón deben ser seleccionados y preparados adecuadamente. El poliuretano se puede obtener en forma de chips o fragmentos, mientras que la piedra se utilizará como agregado para aportar resistencia y durabilidad. El polvillo de cartón, por otro lado, puede servir como aditivo para mejorar ciertas propiedades del producto final.

Diseño de la mezcla:

Con base en pruebas previas y considerando las propiedades deseadas para los adoquines, se determinará una fórmula o diseño de mezcla que incluya las proporciones adecuadas de los materiales mencionados. La fórmula debe asegurar que se aprovechen al máximo los lodos del clarificador y que se logren las características físicas y mecánicas requeridas para los adoquines.

Mezclado de los materiales:

En una planta o área de producción, los lodos del clarificador, el poliuretano, la piedra y el polvillo de cartón se mezclarán en una máquina mezcladora. Esta máquina asegura una distribución uniforme de los materiales y garantiza que la mezcla sea homogénea.

Moldeado de los adoquines:

La mezcla resultante se vierte en moldes diseñados específicamente para la forma de los adoquines. Los moldes pueden ser de diferentes tamaños y formas, según los requerimientos de diseño.

Compactación y curado:

Una vez que los moldes están llenos, se compacta la mezcla para eliminar espacios vacíos y garantizar una mayor densidad en los adoquines. Luego, los adoquines se dejan reposar y curar durante un período determinado, donde adquirirán sus propiedades físicas y mecánicas finales.

Pruebas y calidad:

Se seleccionarán muestras de los adoquines fabricados para realizar pruebas de resistencia, absorción de agua, durabilidad y otras características importantes. Estas pruebas se realizarán en un laboratorio o utilizando equipos específicos para garantizar que los adoquines cumplan con los estándares de calidad y sean aptos para su uso en la construcción.

Empaque y distribución:

Una vez que los adoquines han pasado las pruebas de calidad, se empacarán adecuadamente y estarán listos para ser distribuidos y utilizados en proyectos de construcción.

Además, se debe considerar los siguientes factores:

Lodo del sistema primario: Los lodos de sistema primario tienen como características especiales de dureza cuando se deja secar al aire ambiente, esto produce una rigidez en el lodo, por lo cual estudios realizados expresan que los lodos provenientes del sistema primario o también conocido como clarificador, se puede producir materiales de construcción, como es el caso de adoquines a base de lodos.

Los materiales con más uso en la investigación tienen varias características especiales, como son los lodos del clarificador su principal componente es la celulosa del papel reciclado, una vez que se lo deja secar por varios días, este tiene una composición de resistencia persistente, el lodo deshidratado llega a perder hasta 8 % de su humedad inicial, por medio de pruebas de humedad realizadas, el lodo utilizado para los adoquines no llega a deshidratarse ya que se tiene que poder manipular la mezcla por lo cual se llega a utilizar hasta el 24 % de lodo en las primeras pruebas donde se establece una relación

que el lodo debe de utilizarle si deshidratar y en otras fórmulas como en la número 5 y hasta la fórmula número 10, se utiliza solo el 20 % de este residuo.

Polvillo terceros procesos: Este material proviene de terceros procesos, es el resultante del papel pulverizado su composición es una partícula fina que también se la utiliza como antiderrame.

Zapata (poliuretano): La composición de este material es rígida, proviene de fieltros de cartonera de papel corrugado,

Lastre: Este compuesto de arena fina y de piedras de 2 mm que son especialmente adecuadas para la elaboración de adoquines, sirve para que los adoquines tengan dureza.

Cemento: Es la materia prima con lo que se produce los adoquines, este material composición polvo este se activa cuando se agrega agua. Nota (mejorar el concepto del cemento).

3.4.2. Formulación

La formulación utilizada en la elaboración de los adoquines es de suma importancia en esta investigación por varias razones:

Influencia en las propiedades físicas: La composición de la mezcla utilizada para fabricar los adoquines, que incluye los lodos generados en el sistema de tratamiento primario de la industria papelera y otros materiales, tiene un impacto directo en las propiedades físicas del producto final. La cantidad y tipo de componentes determinarán características como la resistencia, la durabilidad, la absorción de agua y la porosidad de los adoquines.

Optimización del aprovechamiento de los lodos: Mediante una formulación adecuada, se busca maximizar el aprovechamiento de los lodos generados en el proceso de tratamiento primario. Al determinar las proporciones óptimas y los aditivos necesarios, se puede lograr una mezcla que aproveche al máximo las cualidades de los lodos para obtener adoquines de alta calidad.

Reducción de impacto ambiental: La utilización de los lodos en la formulación de adoquines puede representar una alternativa sostenible para el manejo de residuos

industriales. Al convertir estos lodos en un producto útil, se reduce su disposición en vertederos y su posible impacto negativo en el medio ambiente.

Eficiencia y economía: Una formulación adecuada puede mejorar la eficiencia del proceso de fabricación, reduciendo costos y tiempo de producción. Al encontrar la combinación óptima de materiales, se puede lograr una producción más rentable y competitiva en el mercado.

Calidad del producto final: La formulación influye directamente en la calidad del producto final. Una mezcla bien diseñada garantiza que los adoquines cumplan con los estándares requeridos para su uso en la construcción, asegurando que sean resistentes, duraderos y estéticamente atractivos.

Replicabilidad y escalabilidad: Una formulación precisa y bien documentada permite que el proceso de fabricación sea replicable en diferentes lotes y condiciones, lo que facilita la escalabilidad de la producción si se pretende implementar esta técnica en mayor escala.

La formulación de los adoquines es un aspecto esencial en esta investigación, ya que afecta directamente la calidad del producto, el aprovechamiento de los lodos residuales y el impacto ambiental. Un enfoque adecuado en la formulación contribuye a obtener adoquines de alta calidad y sostenibles, lo que promueve una gestión más responsable de los residuos industriales y una construcción más amigable con el medio ambiente. En base a lo expuesto se detalla la formulación en cada uno de los ensayos.

Tabla 1. Formulación de adoquines

Formulación de adoquines										
Lodo % (Clarificador)	22%	15,00%	22%	24%	24%	20%	21%	20%	20%	20%
Cemento%	11%	33,00%	25%	35%	40%	35%	40%	50%	50%	60%
Piedra% (Lastre)	45%	34,00%	30%	25%	20%	30%	20%	20%	20%	15%
Poliuretano % (Zapata)	11%	33,00%	12%	12%	12%	15%	9%	10%	–	10%
Polvillo % (Cartón)	11%	11,00%	11%	4%	4%	–	–	–	–	–
Humedad (Lodo)	65%	62,41%	64%	65%	63,42%	63,70%	64,32%	64,35%	62,35%	64,00%

Muñoz, 2023

3.4. Análisis de datos

En esta investigación, el análisis de datos ha sido llevado a cabo para evaluar el efecto de la formulación empleada en la producción de adoquines. Se ha puesto especial atención en la influencia de los lodos del clarificador y otros componentes mencionados, como el poliuretano, la piedra y el polvillo de cartón. A continuación, se presentan las etapas fundamentales del proceso de análisis de datos:

Estadísticas descriptivas

Se realizaron análisis estadísticos descriptivos para resumir las características físicas y químicas de los lodos del clarificador, así como de los otros materiales utilizados en la formulación de los adoquines. Esto incluyó cálculos de promedio, desviación estándar, mínimo, máximo.

Análisis comparativo

Se compararon las propiedades físicas y mecánicas de los adoquines fabricados con diferentes formulaciones, con énfasis en las variaciones entre los grupos que utilizan distintas proporciones de los materiales, incluyendo los lodos.

Evaluación de la resistencia y durabilidad

Se llevó a cabo pruebas de resistencia mecánica de los adoquines, como pruebas de compresión, para determinar su capacidad para soportar cargas y fuerzas externas. Además, se evaluó la durabilidad de los adoquines sometiéndolos a condiciones ambientales desafiantes y midiendo su resistencia a la intemperie y desgaste.

Propiedades físicas y estéticas

Se analizó propiedades físicas de los adoquines, como su absorción de agua, porosidad, color y textura, para evaluar su idoneidad y funcionalidad para su uso en proyectos de construcción.

Análisis cualitativo

Además de los análisis cuantitativos, se podrían realizar análisis cualitativos para

recopilar opiniones y percepciones de los usuarios o expertos en el campo de la construcción sobre la calidad, el aspecto y la funcionalidad de los adoquines fabricados.

3.4.1. Métodos estadísticos

En esta investigación, se aplicaron diversos métodos estadísticos para analizar los datos recopilados. Es importante seleccionar los métodos estadísticos adecuados en función de la naturaleza de los datos y los objetivos de la investigación. Además, se deben considerar las suposiciones y limitaciones asociadas con cada método estadístico para garantizar resultados válidos y confiables. Un análisis estadístico riguroso permitió obtener conclusiones fundamentadas y respaldadas por evidencia sólida para esta investigación sobre la elaboración de adoquines aprovechando los lodos de un sistema de tratamiento primario en una industria papelera. Además se realizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con la finalidad de verificar si los lodos provenientes del clarificador satisfacen las especificaciones técnicas necesarias para elaboración de adoquines destinados al tránsito liviano, a ello se suma la prueba de Tukey al 5% de probabilidad en el tratamiento de las medias resultantes como indicadores de la mejor muestra.

3.4.2. Software estadístico

Es importante seleccionar el software adecuado para garantizar que el análisis de datos se realice de manera precisa y efectiva. Para llevar a cabo el análisis estadístico en esta investigación, se pueden utilizar diferentes programas o software estadísticos. Por se utilizará Rstudio para analizar los datos recolectados a lo largo de la investigación. RStudio es una herramienta poderosa y versátil para el análisis estadístico, especialmente si se utiliza el lenguaje de programación R. Es una opción popular y recomendada para investigadores y analistas de datos que deseen llevar a cabo análisis estadísticos complejos y reproducibles. Además se utilizó InfoStat para el DCA.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis y presentación de los datos

Se realizó un análisis estadístico por medio de la metodología del Diseño Completamente al Azar – DCA, el cual junto a prueba Tukey al 5% de probabilidad, ayudaron a identificar la muestra que presentó mejor comportamiento en las propiedades físicas de los lodos del clarificador, teniendo los siguientes resultados.

Tabla 2. ANOVA de las propiedades físicas en lodos del clarificador

Lodos	pH	Humedad	ST	CST	STV	CSTV	Fibra
Sin deshidratar	7,15	69	22,35	103,4	73,45	72,59	19,74
Deshidratados	7,14	63,74	12,44	99,29	57	58,94	15,32
CV	3,65	1,83	16,46	2,49	15,89	13,21	17,06
R ²	0,0061	88	82	50	49	48	45

*Coeficiente de variación (CV %); coeficiente de determinación (R² %); humedad (%); sólidos totales (ST mg/L); concentración de sólidos totales (CST mg/L); sólidos totales volátiles (STV mg/L); concentración de sólidos totales volátiles (CSTV mg/L) y fibra (%).

Muñoz, 2023

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de varianza de las pruebas físicas realizadas en los lodos deshidratados y sin deshidratar. Respecto al pH, se debe considerar que su adecuación varía según el tratamiento, el proceso industrial y el uso previsto para los lodos. En términos generales, se espera que los lodos tengan un pH cercano a la neutralidad, entre 6.5 y 7.5. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un p-valor de 0.9883, indicando que no existen diferencias significativas en los valores de pH entre los grupos. El coeficiente de determinación (R²) es muy bajo (6.1E-05), lo cual sugiere que el modelo explica una pequeña fracción de la variabilidad en los datos. Al realizar la prueba de Tukey para comparar las medias de los grupos, se obtuvo un valor de DMS de 0.59130. El cálculo de un error de 0.0680 con 4 grados de libertad en el error muestra que las medias de "Sin deshidratar" y "Deshidratados" son prácticamente idénticas. Las letras "A" indican que las medias no difieren significativamente entre sí ($p > 0.05$). En conclusión, tanto el bajo coeficiente de determinación como el elevado p-valor sugieren que el pH no varía de manera significativa entre los grupos analizados.

En relación con la variable de humedad, se realizaron pruebas y análisis en un conjunto de 6 observaciones. El coeficiente de determinación (R^2) es de 0.88, lo que señala que aproximadamente el 88% de la variabilidad en los datos puede explicarse mediante el modelo. El análisis de varianza (ANOVA) indicó un p-valor de 0.0061, evidenciando diferencias significativas en los valores de humedad entre los grupos. La prueba de Tukey, con un DMS de 2.75602, mostró un error de 1.4780 con 4 grados de libertad en el error. Los resultados de Tukey revelaron que las medias de "Sin deshidratar" y "Deshidratados" difieren significativamente, representadas por las letras "A" y "B" respectivamente. En resumen, el análisis refleja diferencias significativas en la humedad entre ambos grupos, y el coeficiente de determinación alto sugiere un buen ajuste del modelo a los datos.

En cuanto a los sólidos totales, el coeficiente de determinación (R^2) es 0.82, indicando que aproximadamente el 82% de la variabilidad en los datos puede ser explicada por el modelo. El análisis de varianza (ANOVA) resultó en un p-valor de 0.0133, lo cual apunta a diferencias significativas en los valores de sólidos totales entre los grupos. La prueba de Tukey arrojó un DMS de 6.49241, y el cálculo de un error de 8.2020 con 4 grados de libertad en el error. Según Tukey, las medias de "Sin deshidratar" y "Deshidratados" tienen letras diferentes asignadas, "A" y "B" respectivamente, lo que implica diferencias significativas ($p \leq 0.05$). En síntesis, se constata la existencia de diferencias significativas en los sólidos totales entre los grupos, respaldadas por el coeficiente de determinación y el análisis de Tukey.

Respecto a la concentración de sólidos totales, el coeficiente de determinación (R^2) es 0.50, lo que sugiere que el modelo explica aproximadamente el 50% de la variabilidad en los datos de concentración de sólidos totales. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un p-valor de 0.1161, indicando que no existen diferencias significativas en los valores de concentración de sólidos totales entre los grupos. La prueba de Tukey, con un DMS de 5.71025, resultó en un error de 6.3448 con 4 grados de libertad en el error. La conclusión de Tukey es que las medias de "Deshidratados" y "Sin deshidratar" comparten la misma letra "A", lo que sugiere que las medias no difieren significativamente ($p > 0.05$). Aunque el coeficiente de determinación es moderado y el p-valor del ANOVA indica la ausencia de diferencias significativas, el análisis de Tukey

respalda la similitud estadística entre las concentraciones de sólidos totales en ambos grupos.

Se realizó un análisis estadístico para examinar la variable "Sólidos Totales Volátiles" en un conjunto de seis observaciones. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.49 sugiere que el modelo aplicado puede explicar aproximadamente el 49% de la variabilidad en los datos de sólidos totales volátiles. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un p-valor de 0.1238, indicando que no existen diferencias significativas en los valores de sólidos totales volátiles entre los grupos analizados. El coeficiente de variación (CV), a 15.89, refleja la dispersión relativa de los datos. La prueba de Tukey, con un DMS de 23.49458, evidencia que las medias de los grupos "Sin deshidratar" y "Deshidratados" comparten la misma letra "A", lo cual sugiere ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$). A pesar de que el coeficiente de determinación no es alto y el p-valor del ANOVA no apunta a diferencias significativas, el análisis de Tukey respalda la similitud estadística en los valores de sólidos totales volátiles entre los grupos.

En esta misma línea, se llevó a cabo un análisis semejante para la variable "Concentración Sólidos Totales Volátiles" en un conjunto de seis observaciones. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.48 sugiere que el modelo puede explicar cerca del 48% de la variabilidad en los datos de concentración de sólidos totales volátiles. El análisis de varianza (ANOVA) resultó en un p-valor de 0.1267, indicando que no existen diferencias significativas en los valores de concentración de sólidos totales volátiles entre los grupos. El coeficiente de variación (CV) a 13.21 representa la dispersión relativa de los datos. La prueba de Tukey, con un DMS de 19.69107, refleja un error de 75.4481 con cuatro grados de libertad en el error. Las medias de los grupos "Sin deshidratar" y "Deshidratados" comparten la misma letra "A", lo cual sugiere que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$). Aunque el coeficiente de determinación y el p-valor no indican diferencias significativas, el análisis de Tukey respalda la similitud estadística en las concentraciones de sólidos totales volátiles entre los grupos.

Respecto a la variable "Fibra", se realizó un análisis con seis observaciones. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.45 sugiere que el modelo puede explicar aproximadamente el 45% de la variabilidad en los datos de fibra. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un p-valor de 0.1448, indicando que no existen diferencias significativas en los valores de fibra entre los grupos analizados. El coeficiente de

exactamente con el umbral de la norma y se consideró "Conformidad"; la prueba 8 excedió el umbral y mostró "No conformidad"; mientras que las pruebas 9 y 10, con valores inferiores al 6%, cumplieron con los requisitos y obtuvieron la calificación de "Conformidad". Estas evaluaciones se basan en la suposición de que la NTE INEN 3040 establece un umbral máximo del 6% para la absorción de agua en adoquines. En la siguiente gráfica se refleja el comportamiento de los antes mencionado.

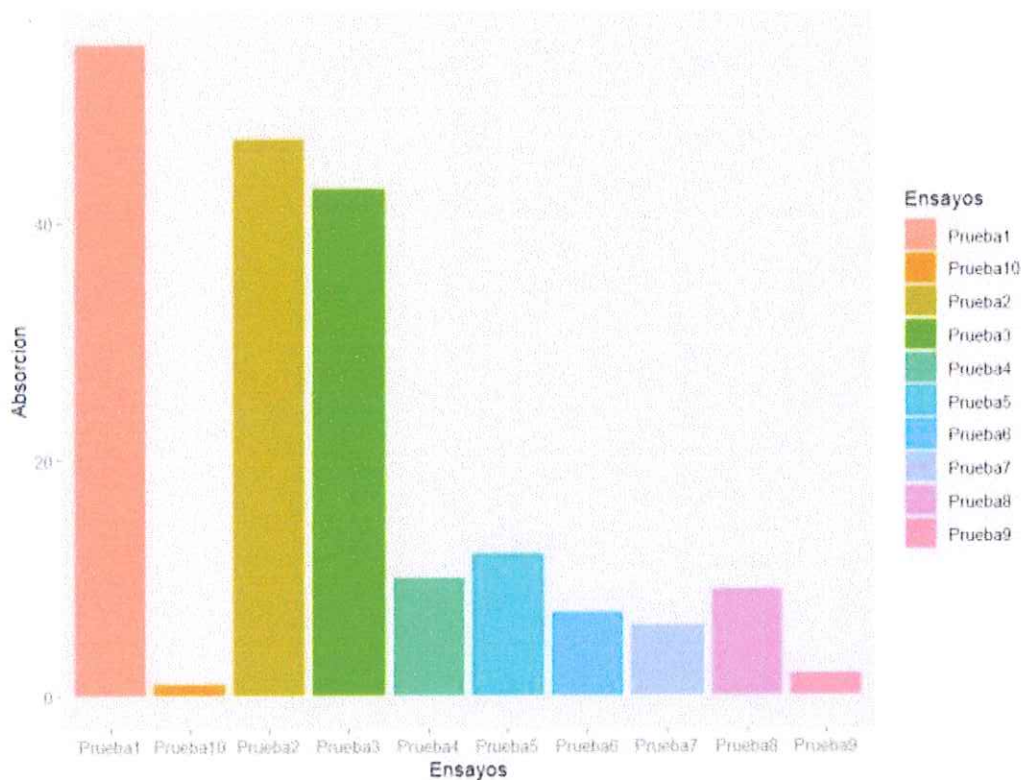


Figura 1. Comportamiento de la Absorción W_a en adoquines a partir de lodos residuales Muñoz, 2023

Ahora bien, por otro lado, se realizó la prueba de compresión al producto propuesto, donde la prueba de compresión se convierte en un factor crítico en la evaluación de la calidad y la funcionalidad de los adoquines derivados de lodos residuales de una industria papelera. Estas pruebas permiten comprender cómo los adoquines responden a las cargas aplicadas y su capacidad para soportar el estrés mecánico al que pueden estar sometidos en aplicaciones del mundo real. La resistencia característica debe ser igual o superior a los 3.6 Mpa, según lo expuesto por NTE INEN 3040 - ADOQUINES DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO. A continuación, se muestra la tabla de resultados obtenidos durante la experimentación:

Tabla 4. Prueba de compresión en adoquines a partir de lodos residuales

Ensayos	Compresión (Mpa)	Cumplimiento
Prueba1	3,2886	No conformidad
Prueba2	0,0583	No conformidad
Prueba3	0,0471	No conformidad
Prueba4	6,7223	Conformidad
Prueba5	0,0089	No conformidad
Prueba6	0,0089	No conformidad
Prueba7	0,1160	No conformidad
Prueba8	0,0590	No conformidad
Prueba9	1,1472	No conformidad
Prueba10	108,0000	Conformidad

*El cumplimiento de este parámetro ha sido comparado bajo la NTE INEN 3040 - ADOQUINES DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO; UNE-EN 1338; Británica BS 6717. Muñoz, 2023

La tabla 4, presenta los resultados de ensayos de compresión realizados en una serie de adoquines. La resistencia a la compresión se mide en megapascuales (Mpa). Según los requisitos establecidos por la norma NTE INEN 3040 para adoquines de hormigón, la resistencia característica debe ser igual o superior a 3.6 Mpa para cumplir con las especificaciones. En la tabla, se puede observar que los resultados de las pruebas varían significativamente. Algunas pruebas no cumplen con el requisito mínimo de resistencia de 3.6 Mpa y se clasifican como "No conformidad". Por ejemplo, en las Pruebas 2, 3, 5, 6, 7, 8 y 9, los valores de resistencia son considerablemente inferiores a 3.6 Mpa, lo que indica que estos adoquines no cumplen con el estándar establecido. Por otro lado, la Prueba 1 presenta una resistencia de 3.2886 Mpa, que también está por debajo del valor requerido, lo que resulta en una calificación de "No conformidad". Sin embargo, la Prueba 4 muestra una resistencia de 6.7223 Mpa, que supera el valor mínimo requerido de 3.6 Mpa, lo que indica que este adoquín específico cumple con las especificaciones establecidas y se clasifica como "Conformidad". Es importante considerar que la resistencia a la compresión es un factor esencial en la calidad y durabilidad de los adoquines de hormigón, ya que afecta su capacidad para soportar cargas y condiciones de uso. Los resultados de estas pruebas deben guiar decisiones sobre la aceptación o rechazo

de los adoquines en función de su cumplimiento con los requisitos de resistencia establecidos por la norma. Los gráficamente se representa en la siguiente figura.

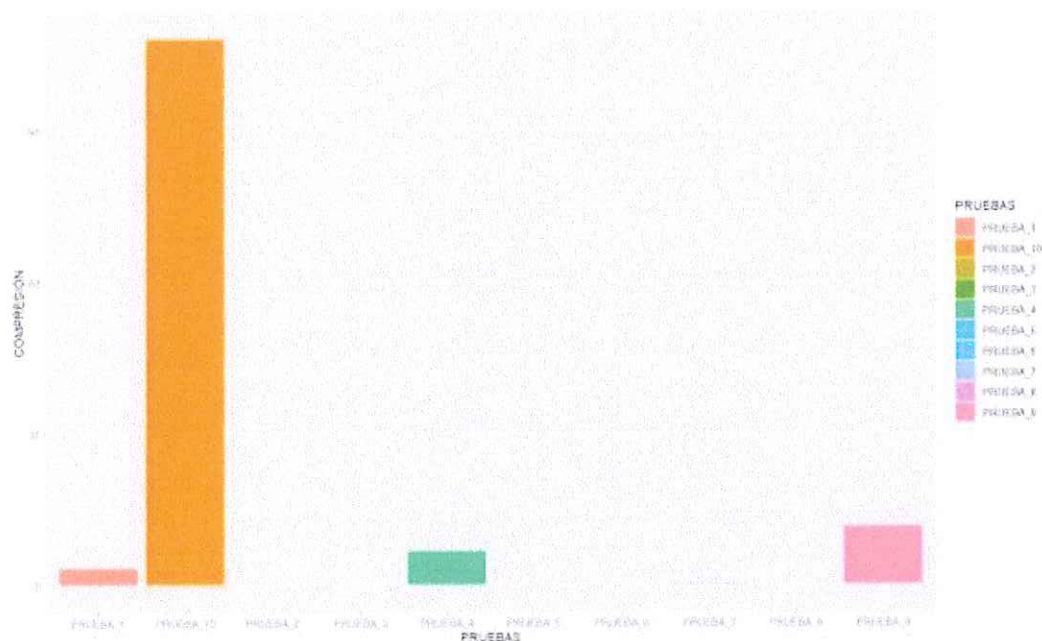


Figura 2. Comportamiento de la compresión en adoquines a partir de lodos residuales Muñoz, 2023

4.2. Discusión

Los resultados presentados en este estudio proporcionan una visión profunda sobre las características de los lodos en relación con diferentes variables analizadas. En primer lugar, en cuanto al pH, se destaca la importancia de considerar el contexto en el que se aplicarán los lodos, ya que su adecuación varía según el tratamiento, proceso industrial y uso previsto. Aunque se esperaría que los lodos mantuvieran un pH cercano a la neutralidad, entre 6.5 y 7.5, los análisis de varianza y las pruebas de Tukey no indicaron diferencias significativas en los valores de pH entre los grupos. Sin embargo, es crucial notar que el coeficiente de determinación (R^2) fue excepcionalmente bajo ($6.1E-05$), lo que sugiere que el modelo empleado solo explica una mínima fracción de la variabilidad en los datos. Por lo tanto, aunque no se encuentren diferencias estadísticas en los valores de pH, la capacidad del modelo para predecir estas variaciones es limitada. La ausencia de diferencias significativas en el análisis puede deberse a la naturaleza de los datos o a la falta de sensibilidad del modelo, lo que indica la necesidad de considerar enfoques alternativos o más detallados en futuras investigaciones.

En relación con la variable de humedad, los hallazgos subrayan un alto nivel de relevancia en el proceso de deshidratación de los lodos. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.88 revela que el modelo aplicado tiene un excelente ajuste a los datos, explicando aproximadamente el 88% de la variabilidad en la humedad. El análisis de varianza y la prueba de Tukey respaldan la existencia de diferencias significativas en los valores de humedad entre los grupos, resaltando la influencia del proceso de deshidratación. Estos resultados sugieren que la deshidratación tiene un impacto significativo en la humedad de los lodos, lo que podría tener implicaciones importantes en su manejo y aplicaciones futuras. Sin embargo, es fundamental considerar otros factores que puedan afectar la humedad, como las condiciones ambientales y el almacenamiento.

En cuanto a los sólidos totales, los resultados indican que la deshidratación también influye en esta variable. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.82 sugiere que el modelo utilizado puede explicar aproximadamente el 82% de la variabilidad en los sólidos totales. El análisis de varianza y las pruebas de Tukey confirman la existencia de diferencias significativas en los valores de sólidos totales entre los grupos. Este hallazgo refuerza la importancia de considerar el proceso de deshidratación en la gestión de los sólidos totales en los lodos. Además, el análisis de Tukey proporciona detalles sobre las diferencias específicas entre las medias de los grupos "Sin deshidratar" y "Deshidratados". Estos resultados pueden tener implicaciones prácticas en la optimización de los procesos de deshidratación y el manejo de los lodos en general.

En el caso de la concentración de sólidos totales, los resultados revelan que, aunque el modelo explica solo aproximadamente el 50% de la variabilidad en los datos, no se encontraron diferencias significativas en los valores de concentración entre los grupos. Este hallazgo contrasta con los resultados observados en los sólidos totales, donde se identificaron diferencias significativas. Esta discrepancia podría deberse a diferencias en las características intrínsecas de las muestras o a la sensibilidad del modelo utilizado. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que, aunque no se observaron diferencias estadísticas, el análisis de Tukey respalda la similitud estadística entre las concentraciones de sólidos totales en los grupos "Deshidratados" y "Sin deshidratar".

Los resultados de las pruebas de absorción de agua en muestras de adoquines en conformidad con la norma NTE INEN 3040 desencadenan una discusión crucial sobre la

calidad y la adecuación de los productos. La absorción de agua es un factor crítico que puede afectar la durabilidad y la resistencia de los adoquines en aplicaciones de pavimentación. En este contexto, los valores de absorción de agua obtenidos en las pruebas se compararon con el límite máximo del 6% establecido por la normativa. La observación de que la mayoría de las muestras (pruebas 1 a 6) excedieron este umbral plantea interrogantes sobre la calidad y la conformidad de estos adoquines en términos de su capacidad para resistir la penetración de agua. Es fundamental considerar las posibles implicaciones de una absorción de agua excesiva en términos de deterioro prematuro, congelamiento y deshielo, y otros problemas que podrían comprometer la integridad de los adoquines y su rendimiento a largo plazo en diversas condiciones climáticas.

Los resultados de las pruebas de compresión realizadas en los adoquines derivados de lodos residuales de una industria papelera plantean una discusión crucial sobre su calidad y su capacidad para soportar cargas mecánicas en aplicaciones del mundo real. La resistencia a la compresión se convierte en un indicador esencial de la idoneidad de los adoquines, ya que afecta directamente su durabilidad y funcionalidad en pavimentación. Los resultados de estas pruebas se compararon con el requisito mínimo de resistencia de 3.6 Mpa establecido por la norma técnica NTE INEN 3040. Observamos una variabilidad significativa en los resultados de las pruebas, lo que plantea interrogantes sobre la homogeneidad de los productos y su capacidad para cumplir con los estándares.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

En resumen, este estudio ha proporcionado una evaluación detallada de las variables pH, humedad, sólidos totales y concentración de sólidos totales en lodos deshidratados y sin deshidratar. Los resultados muestran la importancia de considerar el contexto y el proceso de deshidratación al interpretar estos datos. En relación con el pH, aunque no se encontraron diferencias estadísticas, el coeficiente de determinación extremadamente bajo sugiere que el modelo tiene limitaciones en la predicción de las variaciones. La variable de humedad destaca la influencia significativa del proceso de deshidratación, con un alto coeficiente de determinación y diferencias estadísticas respaldadas por el análisis de varianza y Tukey. En cuanto a los sólidos totales, tanto los resultados de ANOVA como de Tukey confirman la importancia de la deshidratación en esta variable, lo que puede tener implicaciones en la gestión de lodos. La concentración de sólidos totales, aunque no muestra diferencias estadísticas, resalta la necesidad de considerar otras variables que puedan estar afectando los resultados.

En conclusión, los resultados de las pruebas de absorción de agua en los adoquines muestran un panorama diverso en cuanto a su cumplimiento con los requisitos de la norma técnica. La variabilidad en los valores de absorción subraya la importancia de mantener un estricto control de calidad en la producción de adoquines para asegurarse de que cumplan con las especificaciones establecidas. Las muestras que excedieron el límite del 6% no se ajustan a los estándares establecidos y plantean preocupaciones sobre su resistencia y durabilidad en situaciones del mundo real. Sin embargo, los adoquines que cumplieron con el umbral de la norma demuestran la posibilidad de producir productos de alta calidad que sean capaces de resistir la absorción de agua y los desafíos ambientales. Esto resalta la importancia de implementar rigurosos procesos de control de calidad y seguir las directrices normativas para garantizar que los adoquines utilizados en proyectos de pavimentación alcancen los niveles adecuados de rendimiento y durabilidad.

En conclusión, los resultados de las pruebas de compresión de los adoquines muestran una amplia gama de valores de resistencia. Esta variabilidad destaca la necesidad de una atención rigurosa a la calidad y la consistencia en la producción de estos productos. Es preocupante que varios adoquines (Pruebas 2, 3, 5, 6, 7, 8 y 9) no cumplan con el requisito mínimo de resistencia de 3.6 Mpa y sean clasificados como "No conformidad". Estos resultados plantean cuestiones sobre la adecuación de los materiales, los procesos de fabricación y la calidad general de los adoquines. Sin embargo, la existencia de adoquines que superan el umbral requerido (Prueba 4) demuestra que es posible lograr la resistencia adecuada mediante un enfoque cuidadoso en la producción y el cumplimiento de los estándares.

5.2. Recomendaciones

Basándonos en los resultados obtenidos, se recomienda adoptar un enfoque más amplio y detallado para comprender las variaciones en las propiedades de los lodos. Es crucial explorar las razones detrás del bajo coeficiente de determinación en el análisis del pH, considerando la inclusión de variables contextualizadoras como el origen y el proceso de producción de los lodos. Además, se sugiere explorar enfoques analíticos más sensibles a las variaciones sutiles en el pH. Para abordar la humedad y los sólidos totales, se aconseja una investigación exhaustiva en los métodos de deshidratación, con el fin de optimizar los procesos y mejorar la calidad y propiedades de los lodos resultantes. La consideración de factores externos como las condiciones ambientales y de almacenamiento también es relevante. En investigaciones futuras, es esencial considerar múltiples variables y factores, dado que las propiedades de los lodos surgen de interacciones complejas. Ampliar los análisis a más variables podría proporcionar una comprensión completa y práctica de las propiedades de los lodos, mientras que replicar el estudio en muestras más grandes y diversos contextos permitiría obtener resultados más robustos y generalizables. Estas recomendaciones buscan mejorar la comprensión y aplicabilidad de los resultados, así como fomentar un enfoque riguroso en futuras investigaciones relacionadas con las propiedades de los lodos.

Basado en los hallazgos de las pruebas de absorción de agua en adoquines, se sugiere una serie de recomendaciones para mejorar la calidad y la conformidad de estos productos. En primer lugar, es esencial que los fabricantes realicen un seguimiento constante y riguroso de los procesos de producción para garantizar que los adoquines se ajusten a los límites de absorción establecidos por la norma técnica. Esto podría involucrar la optimización de las mezclas de concreto utilizadas y la implementación de prácticas de curado adecuadas para reducir la porosidad y mejorar la resistencia al agua. Además, se recomienda una mayor investigación y desarrollo en tecnologías

y tratamientos de superficie que puedan ayudar a reducir la absorción de agua en adoquines. Por último, es fundamental promover la conciencia entre los diseñadores, ingenieros y profesionales del sector de la construcción sobre la importancia de utilizar adoquines que cumplan con las especificaciones normativas y las implicaciones de la absorción de agua en el rendimiento a largo plazo de los pavimentos. En conjunto, estas recomendaciones tienen como objetivo mejorar la calidad, la durabilidad y la resistencia de los adoquines utilizados en proyectos de pavimentación y garantizar un entorno construido sostenible y confiable.

Se ofrecen recomendaciones para mejorar la calidad y la confiabilidad de los adoquines derivados de lodos residuales. En primer lugar, se insta a los fabricantes a realizar una evaluación exhaustiva de sus procesos de producción, desde la selección de materiales hasta las técnicas de mezcla y compactación. Esto podría ayudar a identificar áreas de mejora que permitan lograr la resistencia requerida y la homogeneidad en todos los productos. Además, se recomienda considerar la incorporación de técnicas avanzadas de control de calidad, como el monitoreo en tiempo real de los parámetros de fabricación y la implementación de pruebas de resistencia de manera sistemática. También es importante brindar capacitación a los trabajadores involucrados en la producción para garantizar la coherencia en la ejecución de procesos críticos.

En última instancia, es esencial fomentar la conciencia sobre la importancia de la resistencia a la compresión en adoquines entre los profesionales de la construcción y los encargados de proyectos. Esto puede lograrse mediante la difusión de información educativa y la promoción del cumplimiento de las normas técnicas. La colaboración entre la industria, los reguladores y los expertos en pavimentación es fundamental para abordar las preocupaciones planteadas por los resultados de las pruebas y garantizar que los adoquines utilizados en proyectos de pavimentación cumplan con los estándares requeridos, garantizando así la seguridad y durabilidad en las infraestructuras construidas.

6. Bibliografía

- Aguilar, J. M. (2018). *Evaluación de la calidad del biosólido obtenido mediante el proceso de digestión anaerobia termofílica, de los lodos residuales de la laguna de estabilización de la ciudad de Juliaca.*
- Alarcón, J. E. E., & Carranza, C. F. C. (2021). Valoración energética de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas–Lima. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 229–233.
- Alattabi, A. W., Harris, C., Alkhaddar, R., Alzeyadi, A., & Hashim, K. (2017). Treatment of residential complexes' wastewater using environmentally friendly technology. *Procedia Engineering*, 196, 792–799.
- Aller Díaz, A. (2023). *Alternativas de gestión de lodos de una estación depuradora de aguas residuales industriales.*
- Alpírez, J., Avilés, K., Castillo, H., Pinzón, I., Poveda, R. M., & Vallester, E. (2017). Evaluación de un sistema biológico de lodos activados a escala de laboratorio. *Revista de Iniciación Científica*, 3(1), 50–57.
- Alvarez Agredo, J. C., Avila Moreno, Y. L., Guacheta Jimenez, J. A., & Vinasco Martínez, C. A. (2020). *Diseño de una propuesta para disminuir la disposición de lodos resultantes del proceso de desfibrado mediante la elaboración de una estrategia para su reutilización en la empresa Empacor SA.*
- Álvarez Soria, B. A., & Guachamín Hurtado, S. J. (2020). *Correlación entre la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia climática (absorción de agua) en adoquines de hormigón en la ciudad de Quito.*
- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, 26.
- Araujo, L., Molina, S., & Noguera, L. (2018). Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en

- la industria de la construcción: revisión bibliográfica. *Revista Agunkuyâa*, 8(1), 21–28.
- Arrieta Goyes, R. A., & Chica Santos, K. A. (2019). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología de lodos activos, para la parroquia de San José de Ayora, Cayambe*.
- Ayala Garibay, E. A. (2020). *Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de las PTAR para la reducción del impacto ambiental*.
- Buitrago, S. Y. M., & Coca, J. A. R. (2018). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 26(1), 113–124.
- Camargo Gaona, L. E., & Yambay Santamaría, B. D. (2020). *Elaboración de ladrillos artesanales mediante el aprovechamiento de lodos resultantes del proceso de depuración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Quitumbe*. Quito: UCE.
- Castillo Abad, C. A. (2022). *Reutilización de los lodos de perforación residuales base agua, en las operaciones Nor-Oeste Talara*.
- Chaparro Montenegro, D. A., & Zorro Millán, J. D. (2017). *Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso co-compostaje, a partir de de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado*.
- Cristina, P. A. A. (2021). *Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal. Portoviejo*.
- Cruz Zhou, K. P. (2019). *Diseño de un sistema de tratamiento de lodos residuales para el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Colta*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Cupe Flores, B. E., & Juscamaita Morales, J. G. (2018). Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico. *Ecología Aplicada*, 17(1), 107–118.
- Devia Clavijo, N. T., & Yate Trujillo, M. C. (2022). *Análisis de la disposición final para el aprovechamiento de lodos en la planta de asfalto de la empresa Mavi*

Pavimentaciones SAS en el municipio del Carmen de Apicalá, identificando una alterrenativa de implementación.

- Espinoza Eche, J. J. (2022). *Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú.*
- Espinoza Quiñones, J. A., Florez Ccama, L. G., Lucas Barrera, E. J. C., Molina Añazco, J. F., & Villarreal Montes, M. A. (2020). *Estudio de pre-factibilidad para la elaboración de adoquines ecológicos utilizando lodos residuales provenientes de la industria papelera.*
- Falconi Garay, E. V. (2017). *Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales y su reusó en la agricultura en la Ciudad de Pisco, Región Ica_ 2016.*
- Garcia Garcia, A. (2021). *Co-Digestión anaeróbica de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales para producir biogás. Revisión sistemática, 2021.*
- González Cedeño, G. A., & Prado Pincay, L. E. (2019). *Elaboración de equipo piloto a escala para el tratamiento de lodos residuales para determinar el porcentaje de humedad y la eficiencia del método.* Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas
- Granados, M. G. F., Rodríguez, G. C., & Sanchez, G. G. (2019). Comparación de un biorreactor con membranas sumergidas con un sistema convencional de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35, 57–64.
- Güven, H., Ersahin, M. E., Dereli, R. K., Özgün, H., Sancar, D., & Öztürk, I. (2017). Effect of hydraulic retention time on the performance of high-rate activated sludge system: a pilot-scale study. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 1–10.
- Hualpa Pinto, A. E. (2019). *Mejoramiento de lodos deshidratados del proceso biorreactor de membrana (MBR) mediante la técnica del Bokashi.*
- Huamán Alfaro, J. D., & Huamán Campos, H. M. (2020). *Análisis y tratamiento de lodos residuales generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cajabamba para la obtención de compost y ladrillos combustibles.*
- Iyare, P. U., Ouki, S. K., & Bond, T. (2020). Microplastics removal in wastewater treatment plants: a critical review. *Environmental Science: Water Research &*

- Ebenopsis ebano (Berl.) Barneby para la remoción de As, Cd y Zn de lodos residuales por extracción de gas shale en Tamaulipas. *Nova Scientia*, 12(25), 3.
- Ramírez, M. B. R., & Alcocer, J. L. S. (2018). COMPARACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS DE SECADO (3) PARA LODOS, DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE SN JERÓNIMO, DEL MUNICIPIO DE PURÍSIMA DEL RINCÓN, GTO. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 4, 350–356.
- Razo Maya, E. M. (2020). *Reutilización de lodos del proceso de anodizado de aluminio como materia prima para la elaboración de materiales para la construcción*. Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi UTC.
- Rebolledo Lozano, G. A. (2018). *Identificación del potencial de aprovechamiento de lodos industriales y municipales en la fabricación de pegante cerámico gris para pisos*.
- Rice, E., Baird, R., & Eaton, A. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed-23rd*. Washington DC: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF).
- Sabri, N. A., Van Holst, S., Schmitt, H., Van der Zaan, B. M., Gerritsen, H. W., Rijnaarts, H. H. M., & Langenhoff, A. A. M. (2020). Fate of antibiotics and antibiotic resistance genes during conventional and additional treatment technologies in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 741, 140199.
- Salameh, J., Marcia, R., & Hargraves, W. (2020). Desempeño del Proceso de Bioconversión en Lodos Anaerobios Deshidratados de Plantas de Recuperación de Aguas Residuales. *Acta Microscopica*, 29(6).
- Sánchez, J. G. C., Saltos, L. D. B., Obando, M. B. V., & Rizo, H. A. Z. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 5(1), 23–27.
- Sanz Vera, F. (2018). *Eficiencia energética en plantas depuradoras de aguas residuales urbanas: valorización de lodos por incineración*.

- Suárez Alvites, A. (2017). *Método de superficies de respuesta (MSR) para procesos de optimización aplicado a la filtración de lodos provenientes del sedimentador primario de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*.
- Tito Sánchez, M. (2022). *Influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara-Lima 2021*.
- Toasa Cordero, M. I. (2018). *Estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante digestión anaerobia*. Quito: Universidad de las Américas, 2018.
- Valderrama Pedraza, M. L. (2013). *Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá)*.
- Velázquez Machuca, M. A., Equihua Soriano, J. R., Venegas González, J., Montañez Soto, J. L., Pimentel Equihua, J. L., & Muñoz Navia, M. (2019). Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 243–251.
- Yue, C., Li, L. Y., & Johnston, C. (2018). Exploratory study on modification of sludge-based activated carbon for nutrient removal from stormwater runoff. *Journal of Environmental Management*, 226, 37–45.

7. Anexos

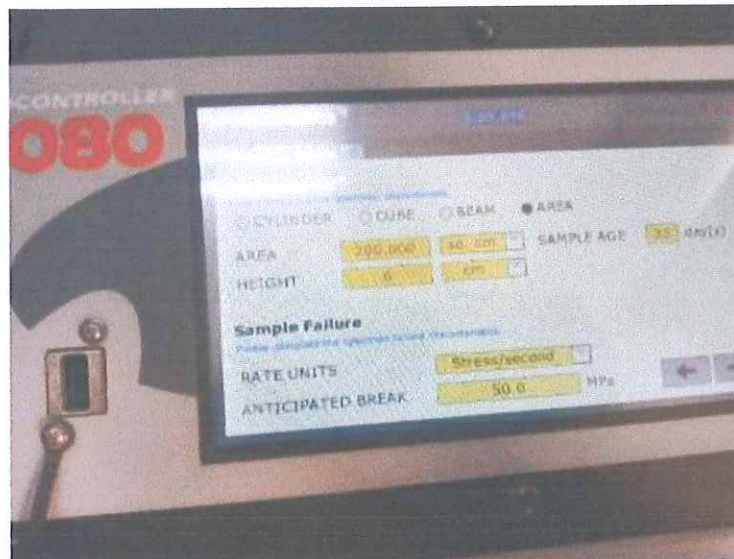


Figura 3. Pruebas en adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 4. Compresión de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023

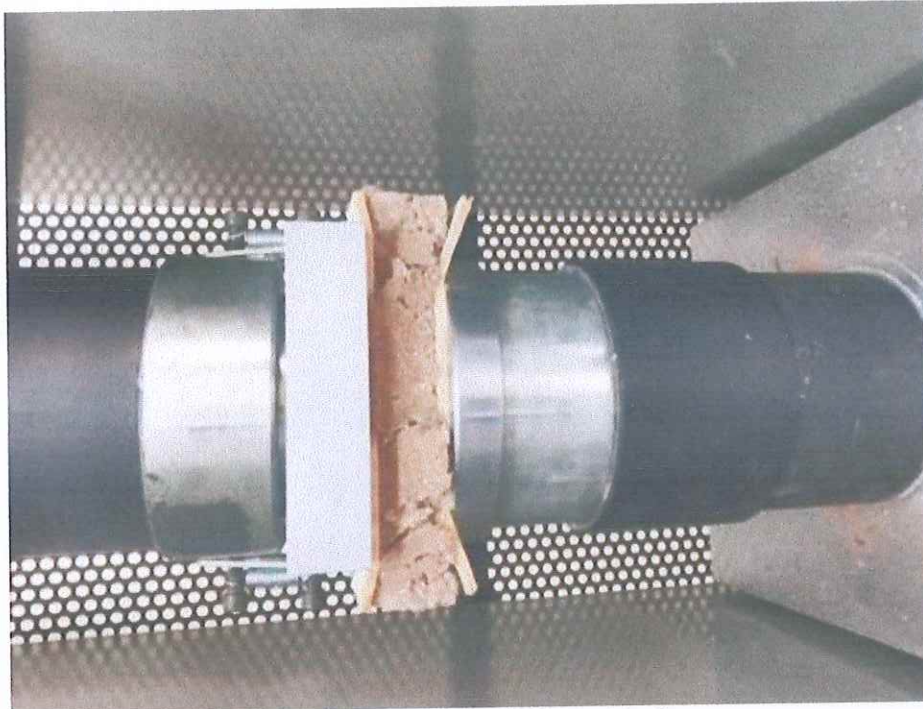


Figura 5. Compresión de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023

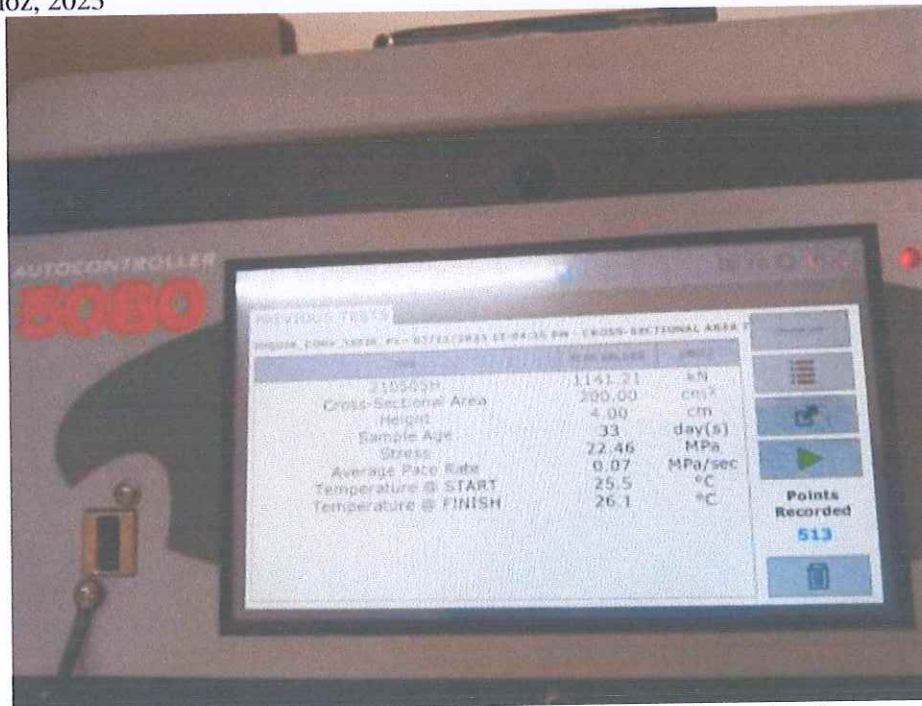


Figura 6. Evaluación de parámetros en adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 7. Control de calidad de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 8. Control de calidad de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 9. Moldeado de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 10. Mezclado de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 11. Pruebas de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Figura 12. Mezclas de adoquines a partir de lodos residuales
Muñoz, 2023



Servicio Ecuatoriano de Normalización

Quito – Ecuador

**NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA**

NTE INEN 3040
2016-04

**ADOQUINES DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y MÉTODOS DE
ENSAYO**

CONCRETE PAVING BLOCKS. REQUIREMENTS AND TEST METHODS

DESCRIPTORES: Adoquines, terminología, clasificación, requisitos, métodos de ensayo
ICS: 91.100.30

40
Páginas

Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	ADOQUINES DE HORMIGÓN REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO	NTE INEN 3040:2016 2016-04
---	---	----------------------------------

1. OBJETO

Esta norma técnica ecuatoriana especifica los materiales, propiedades, requisitos y métodos de ensayo de los adoquines prefabricados de hormigón no armados y sus accesorios complementarios, para ser instalados en cubiertas o áreas sometidas a tránsito de personas y vehículos; en espacios residenciales, comerciales o industriales; de carácter privado o público; ya sea a la intemperie o bajo cubierta.

Esta norma no trata la visibilidad o la tactibilidad de los adoquines.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

Se aplica tanto a adoquines normales como a adoquines permeables.

Para la aplicación de esta norma los adoquines deben satisfacer las siguientes condiciones:

- a) cualquier sección transversal a una distancia de 50 mm de cualquiera de los bordes del adoquín, tiene una dimensión horizontal igual o superior a 50 mm.
- b) su longitud total dividida por su espesor es menor o igual que cuatro.

NOTA. Estas dos condiciones no son aplicables a los accesorios complementarios.

Los elementos fabricados de manera similar a los adoquines y que no cumplan con las características geométricas señaladas, pueden ser sometidos a esta norma; de común acuerdo entre el cliente y el fabricante. Sin embargo, debe asegurarse de que estos elementos trabajen a compresión.

3. REFERENCIAS NORMATIVAS

Los siguientes documentos, en su totalidad o en parte, son referidos y son indispensables para su aplicación. Para las referencias fechadas, aplica solamente la edición citada. Para el caso de referencias sin fecha, aplica la última edición del documento de referencia (incluyendo cualquier enmienda).

NTE INEN-ISO 4288, *Especificación geométrica de producto (GPS) – Calidad superficial: Método del perfil – Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial (ISO 4288:1996, IDT)*

NTE INEN-ISO 6506-1, *Materiales metálicos – Ensayo de dureza Brinell – Parte 1: Método de ensayo (ISO 6506-1:2005, IDT)*

NTE INEN-ISO 6506-2, *Materiales metálicos – Ensayo de dureza Brinell – Parte 2: Verificación y calibración de máquinas de ensayo (ISO 6506-2:2005, IDT)*

NTE INEN-ISO 6506-3, *Materiales metálicos – Ensayo de dureza Brinell – Parte 3: Calibración de bloques de referencia (ISO 6506-3:2005, IDT)*

NTE INEN-ISO 48, *Elastómeros, vulcanizados o termoplásticos – Determinación de la dureza (dureza entre 10 IRHD y 100 IRHD)*

NTE INEN 3040

2016-04

NTE INEN-ISO 2859-1, *Procedimientos de muestreo para inspección por atributos – Parte 1: Programas de muestreo clasificados por el nivel aceptable de calidad (AQL) para inspección lote a lote*

NTE INEN-ISO 8422, *Planes de muestreo secuencial para inspección por atributos*

NTE INEN-ISO 3951-2, *Procedimientos de muestreo para la inspección por variables – Parte 2: Especificación general para los planes de muestreo simples tabulados según el nivel de calidad aceptable (NCA) para la inspección lote por lote de características de calidad independientes (ISO 3951-2;2006)*

NTE INEN-ISO 8423, *Planes de muestreo secuencial para inspección por variables para porcentaje no conforme (desviación estándar conocida) (ISO 8423:2008, IDT)*

ISO 4682, *Caucho – Determinación de la resiliencia reflejada de los vulcanizados*

ISO 7819, *Caucho – Determinación de la dureza de indentación por métodos de medida de la dureza portátiles*

ISO 7873, *Diagramas de control para la media aritmética con límites de aviso*

ISO 7986, *Diagramas de control de aceptación*

ISO 8486-1:1996, *Abrasivos de adherencia – Determinación y designación de la distribución del tamaño de grano – Macrogranos de F4 a F220*

UNE-EN 10083-2, *Aceros para temple y revenido – Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de aceros de calidad no aleados*

UNE-EN 13369, *Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón*

4. DEFINICIONES

Para los efectos de esta norma se adoptan las definiciones que a continuación se detallan:

4.1 Adoquín de hormigón. Unidad prefabricada de hormigón, utilizada como parte del pavimento.

4.2 Accesorio complementario. Unidad, a veces parte de un adoquín y de la misma calidad que éste; utilizado como remate para completar el área del pavimento.

4.3 Adoquín permeable. Unidad prefabricada de hormigón, diseñada con pasos verticales para permitir el flujo de agua a través de estos o entre adoquines.

4.4 Ancho total. Lado menor del rectángulo de menor área capaz de abarcar la superficie vista del adoquín, excluyendo cualquier espaciador.

4.5 Arista. Parte de un adoquín donde se encuentran dos de sus caras. Puede ser viva, biselada, redondeada o achaflanada.

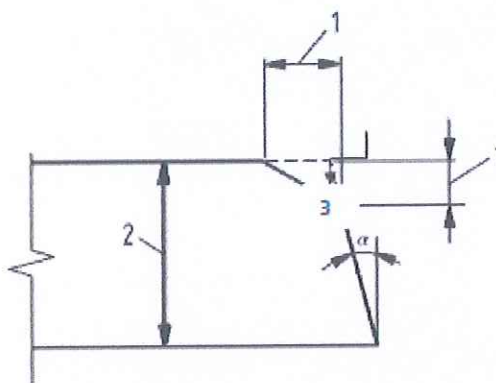
4.6 Capa de limpieza. Mortero fino o lechada de cemento aplicado a la superficie del adoquín.

4.7 Capa superficial (doble capa). Capa de hormigón en la superficie del adoquín de diferentes materiales o propiedades respecto a la estructura principal o capa de apoyo.

NOTA. Ha de distinguirse de la capa de limpieza, que consiste en un mortero de cemento fino o lechada de cemento aplicado a la superficie del adoquín.

- 4.8 Cara base.** Superficie inferior del adoquín, paralela a la cara vista, que está en contacto con el suelo después de su colocación.
- 4.9 Cara lateral ranurada.** Cara lateral de un adoquín cuyo perfil tiene acanaladuras.
- 4.10 Cara vista.** Es la superficie del adoquín que queda a la vista en condiciones de uso del adoquín.
- 4.11 Chaffán o bisel.** Cara larga y estrecha, que resulta en un sólido de cortar por un plano una esquina, según la figura 1.
- 4.12 Conicidad perimetral.** Ángulo previsto en la cara lateral respecto al plano vertical sobre toda la altura o superficie lateral de un adoquín, tal como se muestra en la figura 1.
- 4.13 Delaminación.** Defecto producido por la separación entre la capa superficial y la estructura principal o capa de apoyo.
- 4.14 Dimensión nominal.** Dimensión de un adoquín especificada por su fabricante, a la cual debe ajustarse su dimensión real dentro de las tolerancias admisibles especificadas.
- 4.15 Dimensión real.** Dimensión de un adoquín obtenida de su medición.
- 4.16 Espaciador.** Perfil saliente, situado en la cara lateral de un adoquín.
- 4.17 Espesor.** Distancia entre la cara base y la cara vista del adoquín.
- 4.18 Formato.** Dimensiones nominales de un adoquín, especificadas de acuerdo a su longitud total, ancho total y espesor.
- 4.19 Hormigón.** Material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante en el que están embebidos partículas y fragmentos de áridos; en el hormigón de cemento hidráulico, el aglutinante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua.
- El hormigón puede ser fabricado con o sin la inclusión de aditivos.
- 4.20 Longitud total.** Lado mayor del rectángulo de menor área, capaz de abarcar la superficie vista del adoquín, excluyendo cualquier espaciador.
- 4.21 Lote.** Cualquier cantidad de producto, de características similares, provenientes de una fuente común.
- 4.22 Pavimento.** Elemento estructural y funcional que permite transmitir las cargas generadas por el tránsito de personas y vehículos a la subrasante. Este elemento está conformado por el paquete estructural y la capa de rodadura.
- 4.23 Resistencia al deslizamiento.** Capacidad de resistir un movimiento relativo entre el neumático de un vehículo y la cara vista del adoquín.
- 4.24 Resistencia al resbalamiento.** Capacidad de resistir un movimiento relativo entre el pie de un peatón y la cara vista del adoquín.
- 4.25 Tratamiento secundario.** Proceso de fabricación para dar textura a cualquiera de las superficies del adoquín, llevado a cabo después del proceso básico de fabricación y antes o después del endurecimiento.
- 4.26 USRV.** (Unpolished Slip Resistance Value). Unidad de medida de la resistencia al deslizamiento/resbalamiento de superficies, que se obtiene por medio del método de ensayo del péndulo de fricción.

FIGURA 1. Ejemplo de chafán o bisel y de conicidad perimetral



Leyenda:

1. proyecciones del chafán o bisel,
2. espesor,
3. chafán o bisel,
- α. conicidad perimetral.

5. REQUISITOS

5.1 Requisitos de los materiales

5.1.1 Generalidades

En la fabricación de adoquines de hormigón solamente se deben utilizar materiales cuyas propiedades y características sean las adecuadas para ello.

Los requisitos de idoneidad de los materiales utilizados deben recogerse en la documentación de control de producción del fabricante.

En el anexo A se indica un esquema de inspección de referencia.

5.1.2 Amianto

Para la fabricación de adoquines, no debe utilizarse amianto o materiales que contengan amianto.

5.2 Requisitos de los productos

5.2.1 Generalidades

Los adoquines pueden ser monocapa, con un solo tipo de hormigón, o doble capa, con diferentes tipos de hormigón en su capa superficial y de apoyo.

Cuando los adoquines sean fabricados con capa superficial, o doble capa, ésta, debe tener un espesor mínimo de 4 mm sobre el área declarada por el fabricante cuando se mida de acuerdo con el anexo C.

Se deben ignorar las partículas aisladas de áridos de su estructura principal que puedan quedar introducidas en la parte interior de la capa superficial. La capa superficial debe considerarse como

NTE INEN 3040

2016-04

parte integrante del adoquín.

Una arista puede considerarse biselada; cuando sus proyecciones verticales u horizontales no superen los 2 mm.

Una arista biselada, cuyas proyecciones verticales u horizontales excedan los 2 mm debe considerarse como achaflanada. Las dimensiones deben ser declaradas por el fabricante, ver figura 1.

Los adoquines pueden ser fabricados con perfiles funcionales o decorativos, pero estos no deben ser incluidos en las dimensiones nominales del adoquín.

La superficie de los adoquines puede ser texturizada, ser sometida a un tratamiento secundario o ser tratada químicamente; estos acabados o tratamientos deben ser declarados y descritos por el fabricante.

5.2.2 Forma y dimensiones

5.2.2.1 Generalidades

Todas las referencias dimensionales en esta sección toman en consideración a las dimensiones nominales.

Las dimensiones y desviaciones deben ser medidas de acuerdo con el anexo C.

5.2.2.2 Dimensiones nominales

Las dimensiones nominales deben ser declaradas por el fabricante, en una ficha técnica.

5.2.2.3 Espaciadores, caras laterales y aristas

Los adoquines pueden ser fabricados con espaciadores, caras laterales con conicidad perimetral, con aristas biseladas o achaflanadas con filos redondeados o filos vivos. En estos casos, el fabricante debe declarar sus dimensiones nominales.

El tamaño de espacio donde irá colocado el adoquín debe incluir un margen para juntas y tolerancias.

5.2.2.4 Tolerancias admisibles

Las tolerancias admisibles sobre las dimensiones nominales declaradas por el fabricante se indican en la tabla 1.

TABLA 1. Tolerancias admisibles

Espesor del adoquín mm	Longitud mm	Ancho mm	Espesor mm
< 100	± 2	± 2	± 3
≥ 100	± 3	± 3	± 4

La diferencia entre dos medidas del espesor de un mismo adoquín debe ser ≤ 3 mm.

En el caso de adoquines no rectangulares, el fabricante debe declarar las tolerancias de las restantes dimensiones.

La diferencia máxima admisible entre las medidas de las diagonales de un adoquín rectangular, cuando la longitud de las diagonales supere los 300 mm, no debe exceder de 5 mm.

2016-268

5 de 40

Las desviaciones máximas de planeidad y curvatura indicadas en la tabla 2 deben ser aplicadas a la cara vista plana cuando la dimensión máxima del adoquín supere los 300 mm. Cuando la cara vista no sea plana, el fabricante debe suministrar la información sobre las desviaciones admisibles.

TABLA 2. Desviaciones sobre planeidad y curvatura

Longitud del dispositivo de medida mm	Convexidad máxima mm	Concavidad máxima mm
300	1,5	1,0
400	2,0	1,5

Para aplicaciones especiales tales como aeropuertos pueden ser requeridas otras desviaciones.

5.2.3 Propiedades físicas y mecánicas

5.2.3.1 Generalidades

Los adoquines deben cumplir los siguientes requisitos para ser declarados conformes para el uso por el fabricante.

Cuando los accesorios complementarios no puedan ser ensayados de acuerdo con esta norma, se considerarán conformes con ella siempre que se demuestre que el hormigón utilizado en su fabricación tiene la misma calidad que el empleado en adoquines que cumplan con esta norma.

5.2.3.2 Resistencia climática por absorción total de agua

5.2.3.2.1 Método de ensayo

La resistencia climática se determina mediante el ensayo de absorción total de agua, de acuerdo con el anexo D.

5.2.3.2.2 Características

Los adoquines deben cumplir con un índice de absorción inferior o igual a 6 %.

5.2.3.3 Resistencia a la rotura por tracción indirecta

5.2.3.3.1 Método de ensayo

La resistencia a la rotura (T), se debe determinar mediante el ensayo de tracción indirecta descrito en el anexo E.

5.2.3.3.2 Características

La resistencia característica a la tracción indirecta (T) debe ser superior o igual a 3,6 MPa. Ningún valor individual debe ser inferior a 2,9 MPa ni tener una carga de tracción indirecta por unidad de longitud (F) inferior a 250 N/mm.

5.2.3.3.3 Durabilidad de la resistencia

En condiciones normales de uso, los adoquines prefabricados de hormigón mantendrán una resistencia satisfactoria siempre y cuando cumplan con lo establecido en el subcapítulo 5.2.3.3.2 y estén sometidos a un mantenimiento normal.

NTE INEN 3040

2016-04

5.2.4 Aspectos visuales

5.2.4.1 Generalidades

Los adoquines deben estar libres de porciones de materia sobrante que sobresalga irregularmente en bordes y superficies (rebabas).

5.2.4.2 Apariencia

Cuando se examinen de acuerdo con anexo I, la cara vista de los adoquines no debe tener defectos tales como fisuras o descamaciones.

En el caso de los adoquines de doble capa, cuando se examinen de acuerdo con el anexo I, no debe existir delaminación (es decir, separación) entre las dos capas.

Cuando aparezcan eflorescencias, estas no son perjudiciales para el comportamiento de los adoquines en uso, y no se consideran significativas.

5.2.4.3 Textura

En el caso de adoquines fabricados con una textura superficial especial, esta debe ser descrita por el fabricante.

Examinada la textura de acuerdo con el anexo H, la no existencia de diferencias significativas en la textura respecto a cualquier muestra facilitada por el fabricante y aprobada por el comprador, permite considerar la textura como conforme.

Las variaciones en la consistencia de la textura de los adoquines pueden ser causadas por variaciones inevitables de las propiedades de las materias primas y variaciones en el proceso de curado, y no se consideran significativas.

5.2.4.4 Color

Según el criterio del fabricante puede colorearse la capa superficial o toda la unidad.

Si se comprueba el color de acuerdo con el anexo H debe establecerse la conformidad siempre que no haya diferencias significativas en el color, respecto a cualquier muestra facilitada por el fabricante y aprobada por el comprador.

Las variaciones en la consistencia del color de los adoquines pueden ser causadas por variaciones inevitables en el tono y características de las materias primas y por variaciones en el proceso de curado, y no se consideran significativas.

6. MUESTREO

El plan de muestreo dependerá del acuerdo entre el productor y la persona que adquiere el producto. Planes secuenciales.

- por atributos NTE INEN-ISO 2859-1 y NTE INEN-ISO 8422.
- por variables NTE INEN-ISO 3951-2 y NTE INEN-ISO 8423.

El número de adoquines a ensayar debe ser el indicado en la tabla 3 según la propiedad seleccionada.

2016-268

8 de 40

Figura 13. NTE INEN 3040
INEN, 2016

Tabla 8. Análisis de varianza de la concentración de sólidos totales**Concetración ST**

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Concetración ST	6	0,50	0,38	2,49	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	25,38	1	25,38	4,00	0,1161
Lodos	25,38	1	25,38	4,00	0,1161
Error	25,38	4	6,34		
Total	50,76	5			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=5,71025

Error: 6,3448 gl: 4

Lodos	Medias	n	E.E.
Deshidratados	103,40	3	1,45 A
Sin deshidratar	99,29	3	1,45 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Muñoz, 2023

Tabla 9. Análisis de varianza de los sólidos totales volátiles**Sólidos Totales Volátiles**

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Sólidos Totales Volátiles	6	0,49	0,36	15,89	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	405,90	1	405,90	3,78	0,1238
Lodos	405,90	1	405,90	3,78	0,1238
Error	429,64	4	107,41		
Total	835,54	5			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=23,49458

Error: 107,4100 gl: 4

Lodos	Medias	n	E.E.
Sin deshidratar	73,45	3	5,98 A
Deshidratados	57,00	3	5,98 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Muñoz, 2023

Tabla 10. Análisis de varianza de la concentración de los sólidos totales volátiles**Concentración Sólidos Totales Volátiles**

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Concetración Sólidos Tot..	6	0,48	0,35	13,21	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	279,35	1	279,35	3,70	0,1267
Lodos	279,35	1	279,35	3,70	0,1267
Error	301,79	4	75,45		
Total	581,14	5			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=19,69107

Error: 75,4481 gl: 4

Lodos	Medias	n	E.E.
Sin deshidratar	72,59	3	5,01 A
Deshidratados	58,94	3	5,01 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Muñoz, 2023

Tabla 11. Análisis de varianza de la fibra**Fibra**

Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Fibra	6	0,45	0,31	17,06	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	29,26	1	29,26	3,27	0,1448
Lodos	29,26	1	29,26	3,27	0,1448
Error	35,78	4	8,94		
Total	65,04	5			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=6,77976

Error: 8,9441 gl: 4

	Lodos	Medias	n	E.E.
Sin deshidratar	19,74	3	1,73	A
Deshidratados	15,32	3	1,73	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Muñoz, 2023

Tabla 12. Parámetros de dispersión a las muestras de lodos deshidratados

Estadísticos	pH	% H	% S.T	Conc. S.T (g/l)	% S.V.T	Conc. S.V.T (g/l)	% Fibra
\bar{x}	7,143	63,740	12,443	103,400	57,000	58,938	15,320
s^2	0,123	1,981	6,260	0,000	0,000	0,000	0,000
S	0,350	1,408	2,502	0,000	0,000	0,000	0,000

Muñoz, 2023

a) Resistencia Climática, (Absorción de agua)		
	Norma	Especificación
Europa	UNE-EN 1338.	Clase B, % de absorción de agua ≤ 6 (ADECUADA)
Latinoamérica (Ecuador)	NTE INEN 3040	% absorción de agua ≤ 6
Latinoamérica (Chile)	ICH Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón	% absorción de agua ≤ 6
Latinoamérica (Argentina)	NORMA IRAM 11656:	% absorción de agua promedio ≤ 5 , % absorción de agua individual ≤ 7
Latinoamérica (México)	NMX-C-314-ONNCCE-2014	% absorción de agua ≤ 5
Latinoamérica (Colombia)	NORMA NTC-2017	% absorción de agua promedio ≤ 7
b) Resistencia a la tracción indirecta		
	Norma	Especificación
Europa	UNE-EN 1338.	No considera como requisito
	Británica BS 6717	Valores individuales mínimo de 2.9 MPA y valores promedios mínimo 3,9 MPA
Latinoamérica (Ecuador)	NTE INEN 3040	La resistencia característica debe ser igual o superior a los 3.6 Mpa.
		El valor individual no debe ser menor a 2.9 MPa, ni tener una carga de tracción indirecta por unidad de longitud (F) inferior a 250 N/mm.

Figura 14: Especificación de valores de resistencia climática (absorción de agua) y resistencia a la tracción indirecta.

Fuente: Álvarez y Guachamín (2020)