

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos
elaborados con lodos residuales de plantas de tratamiento de agua
potable y plantas de tratamiento de aguas residuales**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Bach. Nicool Betsabe Orostegui Melendrez

Bach. Ingri Tatiana Godos Malca

Asesor:

Mg. Leonel Chahuares Paucar

Lima, octubre 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Leonel Chahuares Paucar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LADRILLOS ELABORADOS CON LODOS RESIDUALES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”** de los autores Nicool Betsabe Orostegui Melendrez e Ingri Tatiana Godos Malca tiene un índice de similitud de 15 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 21 días del mes de octubre del año 2024.



Mg. Leonel Chahuares Paucar



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a 11 día(s) del mes de octubre del año 2024, siendo las 09:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mg. Reymundo Jaulis Palomino Garamendi, el (la) secretario(a): Ing. David Diaz Rojas y los demás miembros: Ing. Ferrer Canaza Paucar y el (la) asesor(a) Mg. Leonel Chahuares

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: 'Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos elaborados con lodos residuales de plantas de tratamiento de agua potable y plantas de tratamiento de aguas residuales del(los) bachiller(es): a) Nicol Betsabe Orostegui Melendrez b) Ingri Tatiana Godos Malca c)'

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil (Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente: Bachiller (a): Nicol Betsabe Orostegui Melendrez

Table with columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Mérito. Row 1: Aprobado, 16, B, Bueno, Muy bueno

Table with columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Mérito. Row 1: Aprobado, 16, B, Bueno, Muy bueno

Table with columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Mérito. Row 1: Empty

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidentes/a, Asesor/a, Bachiller (a)

Miembro, Bachiller (b)

Secretary signature, Miembro, Bachiller (c)

Índice

| | |
|----------------------------------|----|
| Resumen | 6 |
| Abstract | 6 |
| Introducción | 7 |
| Materiales | 11 |
| Resultados | 13 |
| Discusiones y conclusiones | 20 |
| Referencias | 23 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Informe de barrido de metales en ladrillo pulverizado..... | 11 |
| Tabla 2. Informe de barrido de metales en lodos residuales | 12 |
| Tabla 3. Informe microbiológico de los ladrillos pulverizados..... | 12 |
| Tabla 4. Informe microbiológico de lodos residuales | 13 |
| Tabla 5. Diferencia entre ladrillo tradicional y formado con 50% lodo..... | 16 |
| Tabla 6. Diferencias emparejadas | 17 |
| Tabla 7. Alabeo en ladrillos Tradicional (pirámide) | 18 |
| Tabla 8. Alabeo en ladrillos lodo | 18 |
| Tabla 9. Comparación de ladrillo según características básicas..... | 18 |
| Tabla 10. Comparación de ladrillo según propiedades mecánicas y físicas..... | 19 |

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos elaborados con lodos residuales de plantas de tratamiento de agua potable y plantas de tratamiento de aguas residuales

Nicool Betsabe Orostegui Melendrez

nicoolorostegui@upeu.edu.pe

Ingri Tatiana Godos Malca

ingrigodos@upeu.edu.pe

Leonel Chahuares Paucar

Leonel_cp@upeu.edu.pe

Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima 15102, Perú

Resumen

La gestión sostenible y reutilización son acciones que contribuyen a la preservación del medio ambiente, mediante propuestas adecuadas para reducir la cantidad de desechos generados a fin de reducir su impacto en el entorno. En este estudio se realizó la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos utilizando lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de agua potable y de tratamiento de aguas residuales, esto con el objetivo de determinar si estos lodos podrían ser utilizados para la fabricación de ladrillo a fin de evaluar sus propiedades en el producto final. Para tal efecto se hizo un estudio cuasiexperimental y comparativo donde se seleccionaron como muestra 20 ladrillos elaborados con 50% de lodos residuales, los mismos que fueron comparados con 20 ladrillos tradicionales (Pirámide 18H). Según los resultados, se ha identificado que la resistencia a la compresión en los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) corresponde a 14.73 Mpa; estando dentro del tipo IV y tipo V; en tanto, la resistencia en los ladrillos con lodo (Toby) corresponde a 7.11 Mpa, los mismos que están considerados en los ladrillos tipo I y II. Estos valores conllevan a afirmar que cuando un ladrillo es elaborado con 50% de lodo, se emplearía en el uso de las edificaciones de cercos, y además no contiene coliformes, E. coli y salmonella; esto quiere decir que garantiza la eliminación de patógenos dañinos; por lo tanto, su uso contribuye exclusivamente a la salud pública y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: propiedades físicas, propiedades mecánicas, lodos residuales, ladrillos.

Abstract

Sustainable management and reuse are actions that contribute to the preservation of the environment, through appropriate proposals to reduce the amount of waste generated in order to

reduce its impact on the environment. In this study, the evaluation of the physical and mechanical properties of bricks was carried out using residual sludge from drinking water treatment plants and wastewater treatment plants, with the objective of determining if these sludge could be used for brick manufacturing. in order to evaluate its properties in the final product. For this purpose, a quasi-experimental and comparative study was carried out where 50% of residual sludge was added. The results show that this 50% does not correspond to a brick that complies with the physical and mechanical properties established in the Peruvian technical standards.

Keywords: physical properties, mechanical properties, residual sludge.

Introducción

Los ladrillos son ampliamente utilizados en el campo de la construcción, su antigüedad y versatilidad han permitido que este material forme parte de una gran cantidad de estructuras, como casas, edificios, puentes y otros. Estos poseen alto potencial para ser utilizados en la construcción sostenible debido a su durabilidad e impacto positivo en la preservación del medio ambiente, pues no implica un cambio de material; pese a ello, este así como otros que son utilizados en el sector de la construcción, además son considerados como los más contaminantes en el planeta y también uno de los más importantes dentro de la economía [1] [2]. Bajo este contexto, los países en desarrollo han tomado la iniciativa de reducir aquellas huellas ambientales ocasionadas por las actividades de la construcción, esto mediante acciones de tratamiento y reciclaje de residuos, asegurando así la conservación de prácticas de construcción sostenible [3]

En un país en desarrollo, como el Perú, aún queda abierta la brecha del empleo de materiales reciclados o tratados destinados para la construcción, aun así, se ha evidenciado que la industria de la construcción ha adoptado un papel preponderante en la economía peruana, su alcance ha permitido que esta se convierta en un elemento clave dentro de la industria que apoya al crecimiento económico; en cifras esta representa el 7% del PBI a nivel mundial y respecto al empleo, genera aproximadamente el 10% de empleos a nivel mundial [4]. Siendo así, se destaca que la construcción no solo aporta de manera económica en términos de inversión; sino que también genera empleos. Según los reportes de impacto ambiental, la industria de la construcción tiene una responsabilidad amplia del 40% al 50% del consumo global de los recursos naturales, y el 25% al 40% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [5].

Para sustentar lo descrito en el párrafo anterior, es importante recalcar que con el pasar del tiempo se ha notado un alto crecimiento industrial y con ello también la capacidad de productividad en el

Perú, simbolizando esto un desarrollo positivo, pero a la vez ha generado nuevos problemas: el aumento de los residuos industriales [6]. Respecto a los residuos, se encuentran en los lodos residuales y/o industriales, los cuales provienen de las plantas de tratamiento de aguas; siendo una de las principales causas con gran potencial contaminante. Bajo este contexto, [7] identificaron un total de 2537.85 T/día de lodos industriales en las 7 plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, ubicadas en los diferentes distritos de Lima Metropolitana; teniendo así un total de 926315.19 T/Año; en tanto, el INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática) refiere que la producción promedio de lodos de PTAP y PTAR en Lima Metropolitana es de 1.280.400 toneladas por año [8].

Si bien, en los últimos años, ha surgido un interés creciente en la reutilización y valorización de los lodos residuales para reducir los impactos ambientales y promover la sostenibilidad [9], en el caso peruano, la gestión adecuada de los lodos residuales generados en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales siguen siendo un desafío importante para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública [7], [10]; por lo tanto, es necesario llevar a cabo una evaluación que conlleve a identificar la idoneidad de los lodos residuales como una alternativa viable y sostenible para la producción de ladrillos, además de establecer la calidad de los ladrillos resultantes y su posible aplicación en la construcción de edificios, lo cual podría tener beneficios ambientales, económicos y sociales [11].

Según la realidad palpada y basados en los antecedentes encontrados, se afirma que el crecimiento demográfico es cada vez mayor y está yendo de la mano con la escasez de los recursos naturales; por lo tanto, para mitigar esta situación se sugiere dar uso de las materias primas secundarias, que independientemente a cubrir una necesidad, contribuya también con aportar, en cierta medida, con el desarrollo sostenible [12] [13]. De este modo, emerge la necesidad evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos elaborados con lodos residuales, a fin de determinar su viabilidad como material de construcción, siendo así, esta investigación tiene como objetivo principal analizar y comparar las características de estos ladrillos en términos de resistencia mecánica, porosidad, durabilidad y otras propiedades relevantes. Los resultados contribuirán al conocimiento científico existente en el campo de la gestión de lodos residuales y la valorización de subproductos, permitiendo se utilizados además por investigadores, ingenieros y profesionales en el desarrollo de tecnologías y estrategias para la reutilización de lodos residuales en la industria de la construcción.

Las investigaciones direccionadas a estudiar los lodos extraídos de las plantas de tratamiento de agua, demuestran que es posible hacer uso de materiales alternativos para usar arcilla [14]; de esta manera, [15][16] confirman que la resistencia a la compresión y flexión es mejor cada vez que existe un incremento del nivel de reemplazo de lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales, siempre que no exceda del 20% por peso de arcilla, lo que permite reducir la absorción del agua. Al respecto [17] manifiestan que agregar 10 o 15% de lodo generaría una resistencia mayor a comparación del material tradicional, teniendo así resultados más sostenibles en el campo de la ingeniería [18]. En contraste, el estudio de [19] refieren que la dosis ideal para obtener ladrillos resistentes es de 5%. Y es que el incremento de los lodos residuales es hoy en día un serio problema dentro de la salud pública e impacto ambiental, alcanzando una cantidad de 43.800 T/año; frente a ello, los investigadores [6] tomaron ventaja de la situación referida como una oportunidad para apoyar la gestión ambiental para lo cual realizaron un estudio experimental haciendo uso de 4 diferentes tipos de mezcla a los que se administraron diferentes proporciones de cemento, en la prueba donde se mezclaron el lodo y el cemento con proporciones de alúminas superiores a los que se coloca en el cemento convencional, se usó el lodo como material de repuesto, este hecho constituyó la modificación de las características iniciales, acelerando los tiempos de fragua y reduciendo la resistencia y asumiendo un rol de aislante.

Si bien, el aprovechamiento de lodos residuales forma parte de un impacto positivo en el medio ambiente, y representa un paso importante en la reducción del impacto ambiental, la elaboración de ladrillos que utiliza este componente tiene la capacidad de contribuir en este sentido [20], [21]. Esto teniendo en cuenta que, un ladrillo no estructural es un tipo de ladrillo que se utiliza en la construcción; sin embargo, este no cuenta con la función de soportar cargas estructurales significativas, a diferencia de los ladrillos estructurales, que deben ser fuertes y duraderos para sostener el peso de una estructura (como una pared de carga, columnas, etc.), los ladrillos no estructurales se utilizan principalmente para crear particiones, cerramientos, o acabados que no contribuyen a la estabilidad general de la edificación. Para garantizar lo referido, es necesario medir la calidad y durabilidad de este pues según información obtenida, las elevadas cantidades de lodos pueden ser aprovechadas no solo para incrementar las características físicas y químicas del cemento y mortero, si no también reducen de manera oportuna los costos vinculados a la producción de materiales de construcción [22]. Siendo así, el uso de los lodos PTAR y PTAP pueden ser

utilizados para la elaboración de los ladrillos; sin embargo, el uso de los mismos puede variar dependiendo del proceso de tratamiento que se pueda tener y de las características del agua residual tratada, pues de esto dependerá también la estabilidad y resistencia de los ladrillos, en el caso de que los lodos tengan un alto contenido de materia orgánica, podría conducir a problemas de estabilidad e incluso de malos olores durante el proceso de secado y curado de los ladrillos.

En líneas generales se afirma que si bien, la construcción es una actividad de donde se obtiene crecimiento económico, esta genera a la vez la mayor cantidad de contaminantes en recursos naturales. Por lo que esta actividad económica no puede detenerse; aun cuando los recursos económicos son un limitante debido a los altos costos de los materiales de construcción; por tal motivo, considerando que las construcciones resistentes y duraderas depende en gran manera de las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos, esta investigación plantea realizar un estudio que presente una alternativa de material de construcción que mitigue la contaminación ambiental, reduzca costos y sean resistentes; bajo este contexto, se propone mediante este estudio realizar un análisis comparativo entre el ladrillo con lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y el ladrillo tradicional a fin de identificar la mejor alternativa de uso que permita mayor accesibilidad a la población y con menor impacto en el ambiente. Siendo así, se plantea como objetivo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos elaborados con lodos residuales de plantas de tratamiento de agua potable y plantas de tratamiento de aguas residuales, determinando así la viabilidad de su uso según el porcentaje establecido en este estudio. Además, se plantea como objetivos de investigación valorar las propiedades físicas (alabeo, absorción) de los ladrillos con lodos residuales PTAP y PTAR para ser comparados con ladrillos tradicionales; valorar las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) de los ladrillos con lodos residuales PTAP y PTAR para ser comparados con ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) y evaluar la composición biológica del ladrillo fabricado con lodo residual PTAP y PTAR. A partir de ello, se desglosan las siguientes hipótesis: existe diferencia significativa entre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los ladrillos elaborados con lodos residuales PTAP y PTAR.

Metodología

La presente investigación es de tipo cuantitativa al tener información numérica que permite el procesamiento de información estadística, para este caso, se empleó el software SPSS para el

procesamiento de datos y contrastación de hipótesis, así como medir las diferencias significativas [23]; para este caso, entre los ladrillos elaborados a base de residuos sólidos. Además, se trata también de una investigación cuasiexperimental y comparativo pues se intervino y manipuló la composición de los ladrillos para luego ser comparados con el ladrillo tradicional [24].

Cabe resaltar que los ladrillos evaluados estaban conformados por 0% de lodo, 50% de arcilla y 50% de caolín, en tanto los ladrillos conformados por lodos residuales tenían 50% de lodos y 50% de caolín. Además, el proceso se realizó tomando en cuenta las siguientes actividades:

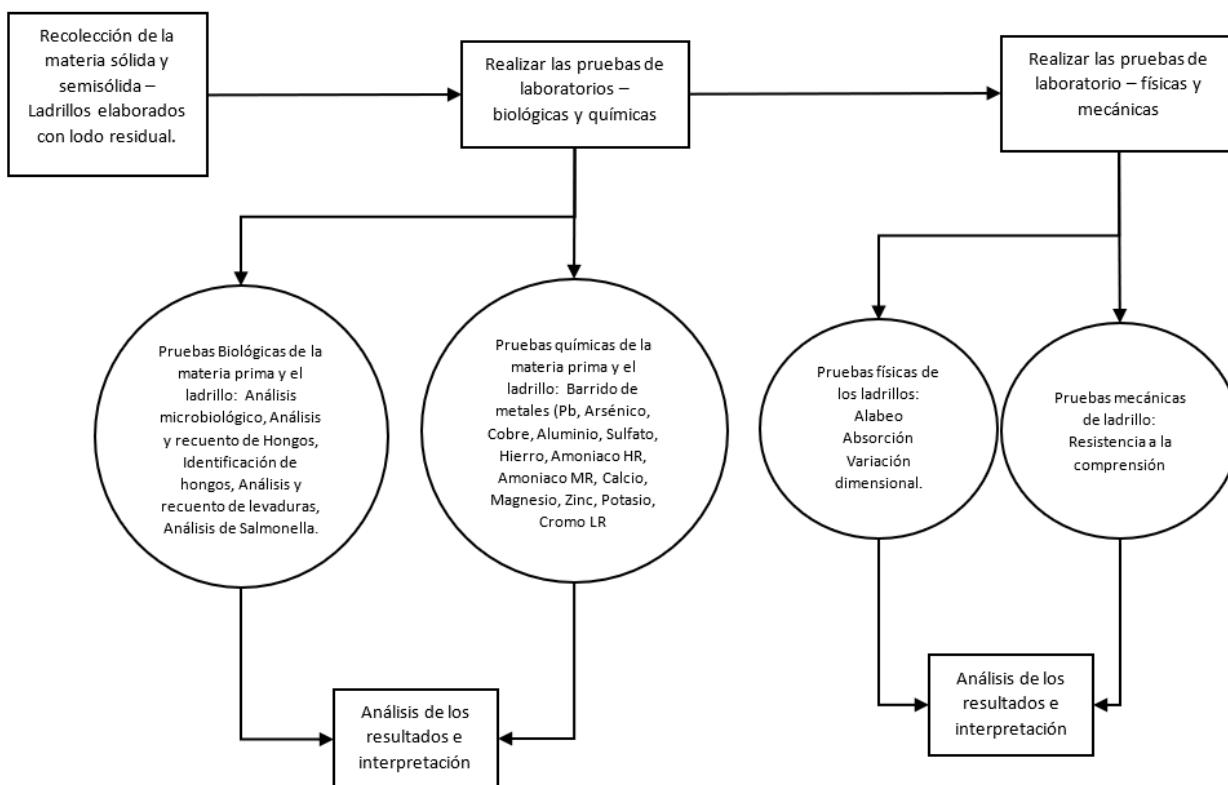


Figura 1. Proceso para análisis comparativo

Materiales

Según el informe de barrido de metales, se encontró que los ladrillos pulverizados hechos con lodos no tenían presencia de plomo, arsénico, aluminio ni hierro; sin embargo, se encontraron otros compuestos, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Informe de barrido de metales en ladrillo pulverizado

| N° | Parámetro | Resultado | Unidad (mg/L) |
|----|-----------|-----------|---------------|
| 1 | Aluminio | 0.0 | mg/l |
| 2 | Hierro | 0.0 | mg/l |
| 3 | Magnesio | 550 | mg/l |
| 4 | Sulfato | 1700 | mg/l |

| | | | |
|----|-------------|------|------|
| 5 | Cromo | 12.9 | mg/l |
| 6 | Zinc | 3 | mg/l |
| 7 | Cobre | 3 | mg/l |
| 8 | Amoniaco | 30 | mg/l |
| 9 | Amoniaco MR | 70 | mg/l |
| 10 | Calcio | 7500 | mg/l |
| 11 | Plomo | 0.0 | mg/l |
| 12 | Arsénico | 0.0 | mg/l |

Así también se hizo análisis de metales para poder detectar la presencia de estos en los lodos residuales empleados para este estudio, resaltando la ausencia de plomo y arsénico, así como la presencia de otros compuestos tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Informe de barrido de metales en lodos residuales

| N° | Componente | Resultado | Parámetro permisible | Interpretación |
|----|-------------|-----------|----------------------|----------------|
| 1 | Aluminio | 0.50 mg/l | 587 mg/l | Óptimo |
| 2 | Hierro | 1600 mg/l | 978 mg/l | Medio |
| 3 | Magnesio | 297 mg/l | 293 mg/l | Medio |
| 4 | Sulfato | 3100 mg/l | 1957 mg/l | Malo |
| 5 | Cromo | 0.1 mg/l | 195 mg/l | Óptimo |
| 6 | Zinc | 36 mg/l | 195 mg/l | Óptimo |
| 7 | Cobre | 3.2 mg/l | 97 mg/l | Óptimo |
| 8 | Amoniaco | 400 mg/l | 97 mg/l | Malo |
| 9 | Amoniaco MR | 696 mg/l | 39 mg/l | Malo |
| 10 | Calcio | 8600 mg/l | 3914 mg/l | Malo |
| 11 | Plomo | 0.0 mg/l | 97 mg/l | Óptimo |
| 12 | Arsénico | 0.0 mg/l | 19 mg/l | Óptimo |

Por otro lado, se realizó también un análisis microbiológico de los ladrillos, donde se denota, según informe, la ausencia de coliformes, E. coli y salmonella; con estos resultados, se garantiza que los ladrillos no presentan riesgos para la salud humana pues hay ausencia de bacterias patógenas y contaminación fecal, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Informe microbiológico de los ladrillos pulverizados

| N° | Parámetro | Microorganismos | |
|---------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| | | Resultado | Unidad (organismos/ml) |
| 1 | Coliformes | 0 | UFC/gr |
| 2 | E. Coli | 0 | UFC/gr |
| 3 | Salmonella | 0 | UFC/gr |
| Hongos | | | |
| 1 | Penicilium digitatum | 5.5 x 10 ² | UFC/gr |
| 2 | Penicilium italicum | 10.5 x 10 ³ | UFC/gr |

| | | | |
|----|-----------------------------|-------------------|--------|
| 3 | Aspergillus sp. | 5.5×10^3 | UFC/gr |
| 4 | Aspergillus flavus | 5×10^3 | UFC/gr |
| 5 | Cladosporium sphaerospermum | 8.4×10^3 | UFC/gr |
| 6 | Penicillium commune | 1.2×10^4 | UFC/gr |
| 7 | Nannizzia gypsea | 5.9×10^4 | UFC/gr |
| 8 | Penicilium sp. | 11×10^4 | UFC/gr |
| 9 | Trichophyton mentagrophytes | 5×10^2 | UFC/gr |
| 10 | Microsporum canis | 5×10^2 | UFC/gr |

Además, se evaluaron también la presencia de microorganismos y hongos en términos de unidades formadoras de colonias por gramo (UFC/gr), tal como se especifica en la tabla 4 y se evidencia en la figura 2.

Tabla 4. Informe microbiológico de lodos residuales

| N° | Componente | Microorganismos Resultado | Parámetro permisible |
|---------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 | Coliformes | 2.51×10^7 UFC/gr | 1.000 UFC/gr |
| 2 | E.Coli | 1.37×10^8 UFC/gr | No hay límite específico |
| 3 | Salmonella | 0 | UFC/gr |
| Hongos | | | |
| 1 | Penicilium sp. | 8×10^3 UFC/gr | No hay límite específico |
| 2 | Cladosporium sphaerospermum | 5.3×10^4 UFC/gr | No hay límite específico |
| 3 | Nannizzia gypsea | 3.5×10^3 UFC/gr | No hay límite específico |
| 4 | Penicillium sp. | 3.5×10^3 UFC/gr | No hay límite específico |
| 5 | Aspergillus sp. | 7.33×10^4 UFC/gr | No hay límite específico |
| 6 | Paecilomyces sp. | 6.7×10^3 UFC/gr | No hay límite específico |
| 7 | Miselinium sp. | 5.9×10^4 UFC/gr | No hay límite específico |



Figura 2. Ensayo microbiológico al ladrillo con lodo residual (coliformes, E Coli y Salmonella)

Resultados

La figura 3 y 4 muestran la resistencia a la compresión (f'_b) de los ladrillos que contienen lodo, en la tabla referida se destaca que la muestra 9 posee la mayor carga que corresponde a 198.80 kN así como el mayor esfuerzo de compresión de 7.11 Mpa o 72.53 kg/cm²; en tanto la carga más baja y esfuerzo de compresión más bajo se encuentra en la muestra número 8 con 4.67 Mpa o 47.63 kg/cm². Respecto a los promedios, el esfuerzo es de 5.61 Mpa ó 57.20 kg/cm².

Del mismo modo al evaluar la resistencia de los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H), se identificó un mayor promedio respecto al esfuerzo que corresponde a 14.7 Mpa ó 150.2 kg/cm²; esto quiere decir que los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) poseen una resistencia a la compresión muy notable a comparación de los ladrillos que contienen lodo. Frente a ello, se destaca que los ladrillos tradicionales pueden soportar mayores cargas y presiones altas a comparación del ladrillo elaborado con lodo, más aún tomando en cuenta que para el presente estudio se ha consignado el ladrillo tipo I y tipo II que establece que la resistencia asciende de 50 kg/cm² a 70 kg/cm² lo que se traduce en 5.61 Mpa.

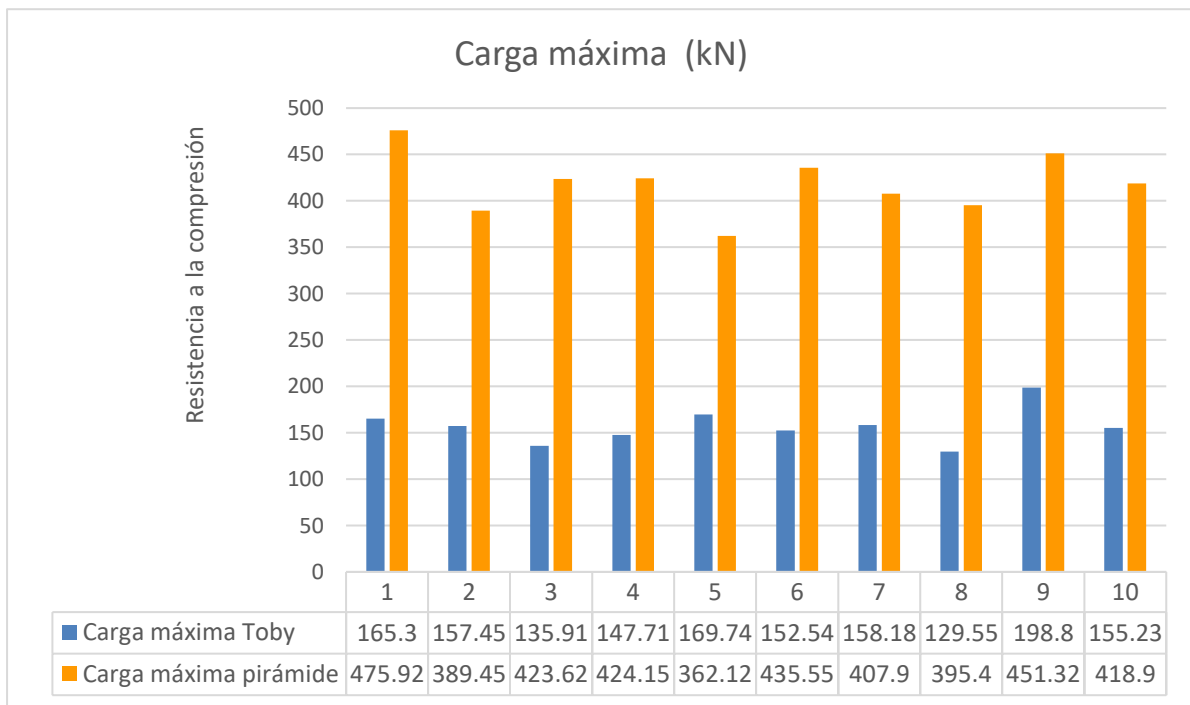


Figura 3. Resistencia a la compresión

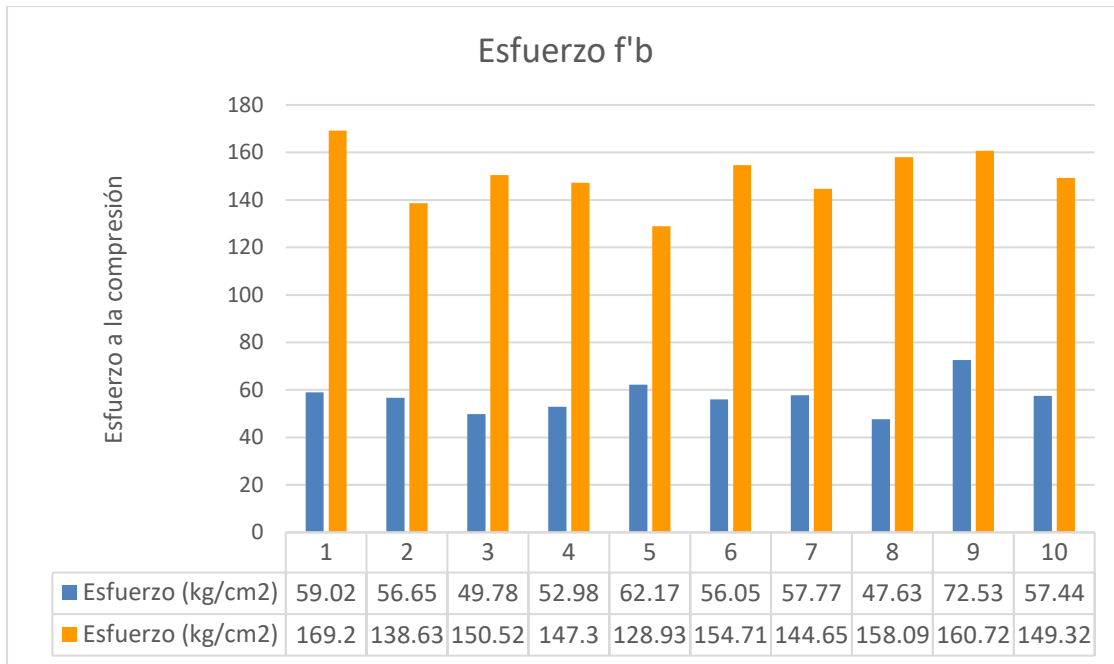


Figura 4. Resistencia a la compresión



Figura 5. Proceso de evaluación de resistencia a la compresión

Luego de tener los resultados, se procedió a analizar mediante la prueba de muestras emparejadas para identificar si existen diferencias significativas, la tabla 5 muestra estas diferencias, siendo altamente significativas con un valor p menor a 0.05 en casi todas las cualidades, excepto en largo y área.

Tabla 5. Diferencia entre ladrillo tradicional y formado con 50% lodo

| | | Diferencias emparejadas | | | | | |
|-------|-----------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|--|----|---------|
| | | Media | Desv. estándar | Media de error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | |
| | | | | | T | gl | P valor |
| Par 1 | Alto (L) – alto (T) | 0.83000 | 0.84334 | 0.26669 | 3.112 | 9 | 0.006 |
| Par 2 | Ancho (L) – ancho (T) | -1.26300 | 1.02372 | .32373 | -3.901 | 9 | 0.002 |
| Par 3 | Largo (L) – largo (T) | 9.53400 | 22.17947 | 7.01376 | 1.359 | 9 | 0.104 |
| Par 4 | Área (L) – área (T) | -4.30000 | 9.83000 | 3.10852 | -1.383 | 9 | 0.100 |
| Par 5 | Carga (L) – carga (T) | -261.39200 | 32.78951 | 10.36895 | -25.209 | 9 | <.001 |
| Par 6 | Esfuerzo (L) – esfuerzo (T) | -9.12000 | 1.29262 | .40876 | -22.311 | 9 | <.001 |
| Par 7 | Esfuerzo (L)– esfuerzo (T) | -93.00500 | 13.18885 | 4.17068 | -22.300 | 9 | <.001 |

Así también, se evaluó la absorción de los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H), en la figura 3 se muestra que el promedio de absorción corresponde a 10.5, siendo este un indicador que afecta la durabilidad y resistencia en los ladrillos. Esto quiere decir que, el ladrillo tradicional presenta un indicador que establece una mayor resistencia a la intemperie, heladas o incluso es resistente ante las fisuras, esto debido a que se ha evidenciado que el ladrillo posee baja capacidad de retener agua. De la misma manera, se ha evaluado las mismas características en ladrillos elaborados con lodos residuales, donde se denota que el promedio de absorción corresponde a 12.7%; siendo este valor mayor al del ladrillo tradicional; esto quiere decir que la capacidad de absorción es mayor. Por lo tanto, se hace referencia que los ladrillos con lodos residuales tienen a ser susceptibles a la penetración de agua.



Figura 3. Absorción y densidad de ladrillos

Por otro lado, se procesó la información compilada para identificar si existen diferencias entre grupos, encontrando que el p valor supera el indicador 0.05; por lo tanto, se asume que no existen diferencias significativas respecto a la absorción y densidad de los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) y los ladrillo con lodo (Toby). Además, según los resultados se muestra que el grupo de ladrillos con lodo poseen valores más altos a comparación del ladrillo tradicional. E incluso los indicadores p son mayores a 0.05 lo que quiere decir que no hay diferencia significativa.

Tabla 6. Diferencias emparejadas

| | Diferencias emparejadas | | | Gl | P |
|--|-------------------------|-----------|----------|----|------|
| Masa_saturada_T - Masa_saturada_L | 5.80000 | 37.98289 | 16.98647 | 4 | .375 |
| Masa_sumergida_T - Masa_sumergida_L | 8.08000 | 60.04358 | 26.85231 | 4 | .389 |
| Masa_seca_T - Masa_seca_L | 22.92000 | 56.28083 | 25.16955 | 4 | .207 |
| Densidad_T - Densidad_L | 47.58000 | 121.87527 | 54.50428 | 4 | .216 |
| Absorción_T - Absorción_L | 28.74000 | 73.65112 | 32.93778 | 4 | .216 |

Además, en este estudio se realizó también el análisis de alabeo, a fin de identificar la deformación que podría afectar a los elementos estructurales, en este caso particular, el ladrillo. Aquí se resalta que el alabeo en los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) posee mediciones uniformes, con mayor

consistencia y menor variación a comparación de los ladrillos hechos con lodos residuales, tal como se evidencia en la tabla 7 y 8. Tomando en consideración que según la NTP 339.316 establece que el máximo permitido de alabeo oscila entre 8 – 12 milímetros (mm)

Tabla 7. Alabeo en ladrillos Tradicional (pirámide)

| Código | CARA 1 | | | CARA 2 | | |
|--------|---------------|------------|------------------|---------------|------------|------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | Promedio (mm) | D1 (mm) | D2 (mm) | Promedio (mm) |
| 1 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 3 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 4 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 5 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | Promedio (mm) | | 1.40 | Promedio (mm) | | 2.00 |

Tabla 8. Alabeo en ladrillos lodo (Toby)

| Código | CARA 1 | | | CARA 2 | | |
|--------|---------------|------------|------------------|---------------|------------|------------------|
| | D1 (mm) | D2 (mm) | Promedio (mm) | D1 (mm) | D2 (mm) | Promedio (mm) |
| 1 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| 2 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 3 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.00 | 3.00 | 4.00 |
| 5 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| | Promedio (mm) | | 1.60 | Promedio (mm) | | 2.40 |

En líneas generales, al realizar un análisis teórico de antecedentes de este estudio y un análisis comparativo mediante información numérica, se ha encontrado diferencias significativas entre el uso de un ladrillo tradicional y uno elaborado con 50% de lodos residuales de plantas de tratamiento de agua potable y residuales, a continuación se establecen algunas diferencias según sus características, las mismas que se ven reflejadas en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación de ladrillo según características básicas

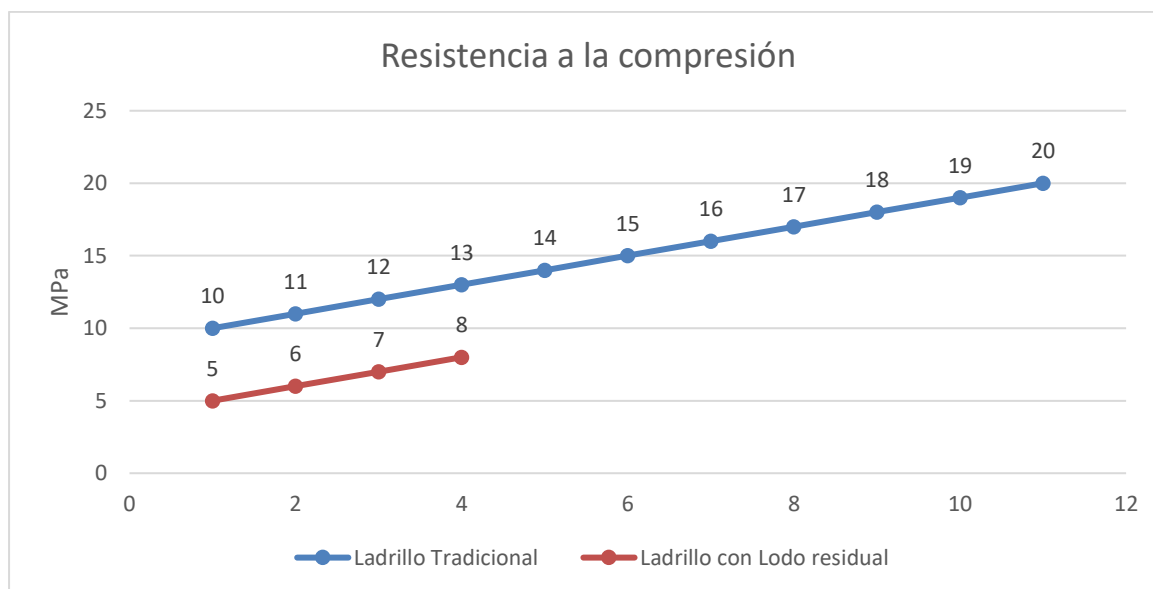
| Característica | Ladrillo Tradicional | Ladrillo con Lodo residual |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|
| Resistencia a la Compresión | 10-20 MPa | 5-8 MPa |

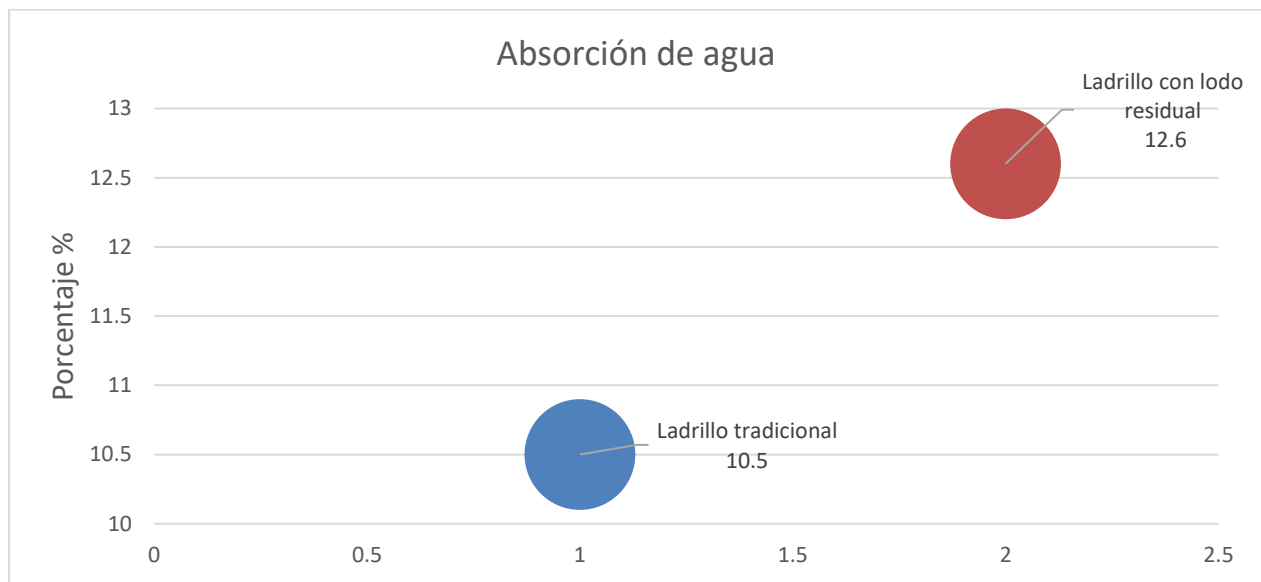
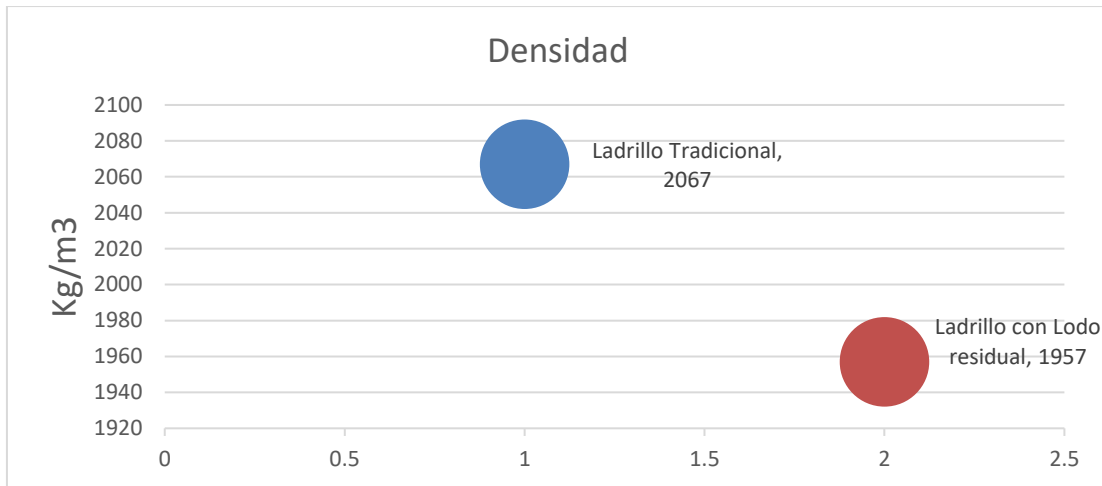
| | | |
|-----------------------------|--|--|
| Impacto Ambiental | Alto (Cocción a altas temperaturas, mayor uso de materiales) | Bajo (menos energía, menos materiales) |
| Costo | Moderado o alto | Bajo a moderado |
| Eficiencia Energética | Moderada | Alto |
| Durabilidad y Mantenimiento | Alto durabilidad, bajo mantenimiento | Moderada a alta |
| Proceso de Fabricación | Extracción, moldeado, secado, cocción | Comprensión, secado al sol y cocción |

La Tabla 10 compara las propiedades mecánicas y físicas de los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) con los ladrillos que contienen lodo residual, donde se denota la diferencia entre ambos ladrillos, de la tabla presentada, se destaca que los ladrillos con lodo residual (Toby) no cumplen con los estándares de resistencia mecánica de los ladrillos tradicionales, lo que sugiere que su uso podría estar limitado a aplicaciones no estructurales o que requieren una menor capacidad de carga.

Tabla 10. Comparación de ladrillo según propiedades mecánicas y físicas

| Característica | Ladrillo Tradicional | Ladrillo con Lodo residual |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| Resistencia a la compresión (Mpa) | 10-20 MPa | 5-8 MPa |
| Densidad (kg/m ³) | 2067 | 1957 |
| Absorción de agua (%) | 10.5 | 12.6 |





Discusiones

Esta investigación planteó como objetivo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos tradicionales (Pirámide 18H) a fin de ser comparados con los ladrillos fabricados con 50% de lodos residuales. Los hallazgos demuestran que si bien, se requiere que los profesionales tomen acciones que puedan contribuir con el cuidado del medio ambiente, es necesario también tener en cuenta que existen normas de construcción que deben cumplirse como símbolo de garantía respecto a la seguridad y durabilidad de las estructuras; en el caso de este estudio, no se recomienda usar ladrillos que contenga 50% de lodos residuales pues estos no cumplen lo establecido en las

normas técnicas peruanas. Un antecedente que apoya los hallazgos referidos establecen que el uso de lodos combinado con arcillas de cerámicas es una alternativa viable y acertada; sin embargo, la dosificación necesita ser probada pues al hacer un estudio similar, encontró que el hecho de aplicar 50% de lodo incrementa la absorción de la humedad, representando esto un impacto negativo en la resistencia de los ladrillos [20].

Por otro lado, [25] al realizar una evaluación del uso del lodo residual para la elaboración de ladrillos, aplicó los porcentajes de lodo en 25%, 50% y 100%, los resultados arrojaron que los porcentajes 50 y 100 presentan fallas y deformaciones que no garantizan su uso estructural por no cumplir con los valores límites establecidos en la norma técnica. En tanto, [26] empleó 35% de lodos residuales, consiguiendo un valor por debajo de los estándares establecidos; de este modo, se afirma que la proporción de lodos residuales en los ladrillos que forman parte de las estructuras construidas debe ser cuidadosamente seleccionado y puesto a prueba, pues independientemente a mantener prácticas de innovación ambiental, se debe cumplir con las normas establecidas.

Finalmente, se encontró también que la elaboración de ladrillos puede contener lodos residuales, siempre que estos estén elaborados en un rango de 10% a 20%, siendo esta proporción una cantidad ideal para no perder ni poner en riesgo la resistencia y durabilidad del mismo [27]. Así también, queda al descubierto que los ladrillos ecológicos con un 50% de lodos residuales muestran una significativa disminución en la resistencia a la compresión y un aumento en la porosidad y absorción de agua, en comparación con los ladrillos comunes. La presencia de metales pesados, aunque baja, sugiere la necesidad de estudios adicionales para evaluar su impacto ambiental y la viabilidad a largo plazo de estos ladrillos, aunque la reutilización de lodos residuales en la fabricación de ladrillos presenta un potencial ecológico, los resultados indican que la proporción de lodos debe ser ajustada para cumplir con las normas técnicas y garantizar la calidad y seguridad del producto final. Lo descrito anteriormente es una prueba empírica que pone al descubierto que la proporción del lodo para la elaboración de ladrillos, no puede ser ni exceder el 50% debido a que perdería los límites que establece la norma técnica peruana y el reglamento nacional de edificaciones; es decir, utilizar el porcentaje referido anula la viabilidad de su uso.

Conclusiones y recomendaciones

Los ladrillos ecológicos representan una innovadora solución en la industria de la construcción, enfocada en la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental. A pesar de sus múltiples beneficios, como el uso de materiales reciclados y la disminución de residuos sólidos, este estudio concluye con lo siguiente según la evaluación realizada:

Resistencia Mecánica: Los ladrillos ecológicos no cumplen con los estándares de resistencia establecidos, indicando que la proporción de lodos residuales debe ser reducida o complementada con otros materiales estabilizantes.

Propiedades Físicas: La mayor porosidad y absorción de agua afectan negativamente la durabilidad de los ladrillos ecológicos.

Impacto Ambiental: Aunque se reduce la cantidad de desechos, es esencial garantizar que los ladrillos no liberen contaminantes peligrosos.

Finalmente, se reafirma que la resistencia a la compresión de los ladrillos elaborados en base al 50% de lodo, se encuentra dentro del tipo I y II, esto según lo estipula la Norma Técnica Peruana E070 de la albañilería, donde se establece que la resistencia mínima para el tipo I corresponde a 50 kg/cm² (4.9 Mpa) y para el tipo II una resistencia mínima de 70 kg/cm² (6.9 Mpa).

Frente a lo encontrado, se recomienda: a) **Optimización de Mezclas:** Investigar la reducción del porcentaje de lodos residuales o la combinación con otros materiales para mejorar las propiedades mecánicas y físicas. b) **Evaluaciones Ambientales:** Realizar estudios a largo plazo para asegurar la seguridad ambiental del uso de lodos residuales en la fabricación de ladrillos. c) **Normativas y Estándares:** Ajustar las normativas técnicas para incluir directrices específicas sobre el uso de materiales reciclados en la construcción.

Financiamiento

Esta investigación ha sido autofinanciada por los investigadores.

Conflicto de intereses

Los autores especifican no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Sustento teórico y antecedentes N.O.M; metodología, análisis estadístico, recopilación de información I.T.G.M; L.CH.P tutor académico y supervisor de investigación.

Referencias

- [1] S. P. Muñoz-Pérez, F. Mimbela-Orderique, and E. D. Rodríguez-Lafitte, “Uso de ladrillos triturados en concreto: una revisión literaria,” *Rev. Politécnica*, vol. 17, no. 34, pp. 82–100, 2021, doi: 10.33571/rpolitec.v17n34a6.
- [2] N. Serres, S. Braymand, and F. Feugeas, “Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment,” *J. Build. Eng.*, vol. 5, pp. 24–33, 2016, doi: 10.1016/j.jobbe.2015.11.004.
- [3] N. Roz-Ud-Din and S. Parviz, “Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>.
- [4] R. Global forum capacity building, “Developing capacities in times of COVID-19,” 2021. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/tax/transparency/documents/capacity-building-report-2021.htm>
- [5] I. Andersen, “Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente,” *UNEP*, 2020. https://unsdg.un.org/sites/default/files/2020-07/UNEP_Working-with-the-environment-to-protect-people.pdf
- [6] M. Vargas Camareno and M. Montero Villalobos, “Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S. A. como material alternativo en la fabricación de cementos especiales,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 19, no. 3, pp. 17–26, 2006.
- [7] J. Espinoza and E. Santos, “Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú,” *Rev. del Inst. Investig. la Fac. minas, Metal. y ciencias geográficas*, vol. 24, no. 48, pp. 205–215, 2021, doi: 10.15381/iigeo.v24i48.21773.
- [8] INEI, “Producción de agua potable en Lima Metropolitana disminuyó en 6.8%,” 2021. <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/produccion-de-agua-potable-en-lima-metropolitana-disminuyo-en-68-12804/>
- [9] D. Zawal and A. M. Grabiec, “Influence of selected mineral additives on properties of recycled aggregate concrete (RAC) considering eco-efficiency coefficients,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, no. September 2021, p. e01405, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01405.
- [10] H. Ahmed, M. Tiznobaik, S. Huda, M. . Islam, and M. . Alam, “Recycled aggregate

- concrete from large-scale production to sustainable field application,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 119979, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119979.
- [11] M. Souad, D. Messaouda, and N. Ammar, “The potential of sludge from wastewater treatment plants to improve the mechanical properties of bricks,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 25, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01752-2>.
- [12] A. Bubalo, D. Vouk, L. Ćurković, M. Rogošić, D. Nakić, and C. Cheeseman, “Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary material in manufacturing bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 404, no. August, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133126.
- [13] H. Gao, K. Zhou, D. Su, B. Zhang, and F. Cheng, “Sludge-based baking-free brick prepared by sewage sludge with high moisture content: Influence of process parameters and environmental risk assessment,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.108576.
- [14] N. T. Minh Trang, N. A. Dao Ho, and S. Babel, “Reuse of waste sludge from water treatment plants and fly ash for manufacturing of adobe bricks,” *Chemosphere*, vol. 284, no. June, p. 131367, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131367.
- [15] J. Mora and Z. Mariscal, “Correlación entre la satisfacción laboral y desempeño laboral,” *Rev. dilemas Contemp. Educ. política y valores*, vol. 9, no. 1, pp. 148–162, 2019, [Online]. Available: <https://www.dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/index.php/dilemas/article/view/1307/123>
- [16] M. Al-hashem *et al.*, “Predicting the compressive strength of concrete containing,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. November, 2022, doi: 10.3390/ma15217713.
- [17] N. Cangussu, L. Silva, and L. Maia, “Incorporation of the Sludge of Sewage Treatment Plant on Ceramic Bricks Manufacture: An Exploratory Study,” *U.Porto J. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 10–19, 2022, doi: 10.24840/2183-6493_008.002_0002.
- [18] J. D. dos S. S. Silva, R. L. Lopes, D. M. Torres, and R. D. R. da Silva, “Uso do lodo de ETE na produção de tijolos cerâmicos: Uma revisão sistemática de literatura,” *Res. Soc. Dev.*, vol. 10, no. 8, p. e22010817200, 2021, doi: 10.33448/rsd-v10i8.17200.
- [19] A. H. Noruzman, N. Palil, R. Ahmad, and K. S. Baharudin, “Application of waste treatment sludge from water treatment in brick production,” *Int. J. Technol. Innov.*

Humanit., vol. 1, no. 1, pp. 33–40, 2020, doi: 10.29210/881101.

- [20] L. Araujo, S. Molina, and L. Noguera, “Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: Revisión bibliográfica,” *Rev. Agunkuyáa*, vol. 1, pp. 21–28, 2018.
- [21] C. Salazar *et al.*, “Uso de los lodos generados en los decantadores de una planta de tratamiento de agua potable como materia prima para la elaboración de ladrillos de construcción,” 2014.
- [22] V. B. Gutiérrez Gonzales, “Tutoría académica y formación científica en estudiantes universitarios de Economía de la Universidad Nacional ‘San Cristóbal de Huamanga’-Perú, 2016,” Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, 2017.
- [23] F. Sandoval, A. del Cid, and R. Méndez, *Investigacion Fundamentos Y Metodologia*. 2011.
- [24] I. M. Baas Chable, M. G. Barceló Méndez, and G. R. de Fátima Herrera Garnica, *Metodología De La Investigación*. 2012.
- [25] M. P. Cachago, C. D. Caguano, and L. P. Viera, *Utilización De Lodos De La Planta De Tratamiento De Agua Residual De La Empresa Franz Viegner F.V.-Área Andina S.a. Para La Elaboración De Ladrillos Artesanales*. 2016. [Online]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/6928>
- [26] D. Parra, “Diseño de sistema automatizado para el aprovechamiento de lodos residuales en PTAR y PTAP de Veolia Tunja,” 2023. [Online]. Available: http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/8491/1/2023_DavidSantiagoParraCubides.pdf
- [27] L. Rincón, “Aprovechamiento de los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en empresa Láctea, Municipio de Cogua,” 2019.