

Artículo de Investigación

Ladrillo reciclado para elaboración de pavimento permeable para parqueaderos

Recycled brick for the production of permeable paving for parking lots

Florencio Madueño¹, Leopoldo Choque², Luis Clemente³

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 15491; lchoquef@ucv.edu.pe; kelvin0296@yahoo.es

*Correspondencia: fcmaduenom@ucvvirtual.edu.pe

Citación: Madueño, F., Choque, L., & Clemente, L., (2023). Ladrillo reciclado para elaboración de pavimento permeable para parqueaderos. *Novasinerгия*. 6(1). 19-35.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.11.02>

Recibido: 13 diciembre 2022

Aceptado: 12 enero 2023

Publicación: 16 enero 2023

Novasinerгия
ISSN: 2631-2654

Resumen: En la actualidad se han visto problemas sociales, como la presencia de residuos de ladrillos en las calles y fuertes lluvias, afectando a la población en general, es así como se ha visto por conveniente utilizar el ladrillo reciclado como material para la elaboración de un pavimento permeable para parqueaderos con la finalidad de mitigar el impacto producido por las lluvias. La presente investigación utilizó el diseño de experimentos factorial 2² para la optimización de los diseños, para los cuales se manipularon dos variables, el ladrillo reciclado y agregado fino. La investigación buscó mejorar la resistencia a compresión del pavimento permeable. Se consiguió mejorar la resistencia a compresión del pavimento permeable obteniendo una resistencia a compresión promedio a los 28 días de 217 kg/cm² utilizando proporciones de 4% de ladrillo reciclado molido y 8% de agregado fino, también se obtuvo un módulo de rotura de 29.97 kg/cm² y una permeabilidad de 0.241 cm/s. Con los resultados obtenidos y en concordancia con la Norma ACI 522r-10 se concluye que el ladrillo debido a su alta resistencia permite utilizar una menor proporción de agregado fino para evitar disminuir la permeabilidad y de esa manera se puede elaborar un pavimento permeable para parqueaderos.

Palabras clave: Ladrillo reciclado molido, pavimento permeable, resistencia a compresión, resistencia a flexión y permeabilidad.

Abstract: At present, social problems have been seen, such as the presence of brick residues in the streets and heavy rains, affecting the population in general, so it has been seen as convenient to use recycled brick as a material for the preparation of a pavement permeable for parking lots in order to mitigate the impact produced by the rains. The present investigation used the 2² factorial design of experiments for the optimization of the designs, for which two variables were manipulated, the recycled brick and fine aggregate. The research sought to improve the compressive strength of the pervious pavement. It was possible to improve the compressive strength of the permeable pavement, obtaining an average compressive strength at 28 days of 217 kg/cm² using proportions of 4% ground recycled brick and 8% fine aggregate, a modulus of rupture of 29.97 was also obtained. kg/cm² and a permeability of 0.241 cm/s. With the results obtained and in accordance with the ACI 522r-10 Standard, it is concluded that brick, due to its high resistance, allows the use of a lower proportion of fine aggregate to avoid reducing permeability and thus a permeable pavement for parking lots can be made.

Keywords: Ground recycled brick, pervious paving, compressive strength, flexural strength and permeability.



Copyright: 2023 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En las últimas décadas se ha podido contemplar fuertes lluvias que han causado presencia de agua en los pavimentos, ocasionando problemas a las personas y vehículos que transitan por el lugar. Rojas et al. (2019) nos hace mención que en el 2017 Perú percibió un fenómeno natural denominado el fenómeno de el Niño, las cuales se manifestó con intensas lluvias por prolongadas horas que causaron activaciones de diferentes quebradas en diferentes zonas del país originando huaicos e inundaciones. Teniendo como consecuencias impactos negativos en la infraestructura urbana y rural, de acuerdo con los informes oficiales reportados, se comunicaron que 136 personas fallecieron y 17,236 quedaron damnificados y 1,075,932 afectados. En los 30 últimos años la investigación y la aplicación del concreto permeable se viene incrementando, en los países tales como: Australia, Estados Unidos y Japón, en la actualidad su ampliación se da en calles residenciales, parques, parqueaderos, vías para peatones y bicicletas, actualmente la resistencia que brinda el concreto permeable no es lo adecuado para el uso en pavimentos de alto tránsito, es por ello que en estos últimos años se están realizando estudios para incrementar la resistencia de este material (Arango, 2022)

En los últimos años, en el mundo se generan aproximadamente 1,300 millones de toneladas de residuos sólidos cada año, que representan un aproximado de la mitad de todos los materiales, es por ello por lo que en la actualidad la necesidad de poner en práctica el reciclaje se ha venido incrementando, como es el caso del reciclaje de materiales de construcción para su posterior uso como aditivo en reemplazo de otros materiales convencionales (Mimbela, Muños y Rodríguez, 2021). El ladrillo es elaborado principalmente de arcilla que es sometido a temperaturas elevadas para adquirir sus propiedades, al estar compuesto por dicho material por su naturaleza es permeable, lo que favorece la infiltración de agua en el pavimento, con relación a la durabilidad, el ladrillo utilizado fue el ladrillo King Kong de 18 huecos que, se caracteriza por su manejo en muros portantes ya que son unidades de albañilería sólidas y que de acuerdo a las Normas Técnicas de diseño sísmico el porcentaje de vacíos no supera el límite establecido, es decir mientras menor sea el porcentaje de vacíos del ladrillo, la infiltración de agua se reduce y la durabilidad aumenta. Utilizar materiales reciclados en estos tiempos se está volviendo una exigencia para mitigar el impacto ambiental, por ello utilizar los residuos de ladrillos para reemplazar los agregados se convierte en una buena alternativa que permite disminuir los requerimientos de botaderos de residuos sólidos de construcción (Amorós, Centurión y Hoyos, 2018).

Durante las últimas décadas han aumentado la cantidad de residuos de ladrillos en el campo de la construcción y demolición, registrándose uno aproximado de 120 toneladas solo en el año 2014 en la región Lima, actualmente en dicha región existen una gran cantidad de residuos de ladrillos y de construcción, estos tipos de residuos no reciben ningún tipo de tratamiento y simplemente son arrojados a botaderos clandestinos perjudicando a los vecinos (Vilca, 2017). De acuerdo con estudios realizados en los cuales se utilizó ladrillo reciclado molido como un material de construcción se consiguieron aumentar la resistencia a compresión del concreto, es por ello que se recomienda el uso del ladrillo reciclado en diferentes aplicaciones ya que el material tiene la posibilidad de aumentar las propiedades mecánicas del concreto (Moreno, Ospina y Rodríguez, 2019). En la actualidad se han realizado una serie de investigaciones utilizando ladrillo reciclado como agregado fino para la fabricación de un concreto convencional, con la finalidad de mejorar la resistencia a compresión, consiguiendo resultados óptimos, con respecto a su utilización en la producción de un pavimento permeable, no se han encontrado investigaciones en las que se haya utilizado el ladrillo reciclado, es por ello que se propuso elaborar un pavimento permeable con una resistencia de 210 kg/cm².

El objetivo de la presente investigación fue mejorar la resistencia a compresión del pavimento permeable para parqueaderos utilizando ladrillo reciclado molido como agregado fino, para ello se realizó el ensayo de resistencia a compresión de acuerdo al método normalizado para la determinación del esfuerzo a compresión de concreto endurecido NTP 339.034-11 / ASTM C39-07, para determinar la resistencia a flexión el procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a la Norma ASTM C78 y para determinar la permeabilidad del concreto se utilizó un permeámetro de PVC elaborado de acuerdo a lo especificado en la Norma ACI 522R-10.

2. Metodología

El estudio de carácter experimental se efectuó en base a las especificaciones de la Norma ACI 522r-10, para ello se utilizaron laboratorios acreditados por el Instituto Nacional de Calidad INACAL en la ciudad de Lima.

2.1. Caracterización del ladrillo reciclado

La caracterización del ladrillo reciclado molido se realizó en el laboratorio con la ayuda de los tamices, para de esa manera cumplir con las características de un agregado fino que, de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 400.037, nos indica que en los tamices 3/8" debe pasar el 100% del material, en el Nro 4 debe pasar entre un 95% y 100%, Nro 8 entre 80% y 100%, Nro 16 de 50% a 85%, Nro 30 entre 25% y 60%, Nro 50 de 5% a 30%, Nro 100 entre 0% y 10%, y el tamiz Nro 200 el rango que pasa permitido es de 0 – 3%. El ensayo de granulometría es el proceso en lo cual se determina la distribución de tamaños de partículas por medio de los tamices, para la distribución de los tamaños, para corroborar el cumplimiento de los requerimientos se utiliza normas de acuerdo con el tipo de estudio que se quiere efectuar (Ayala y et al. 2019). El análisis granulométrico se efectuó conforme a los procedimientos establecidos en la Norma técnica peruana NTP 400.037.

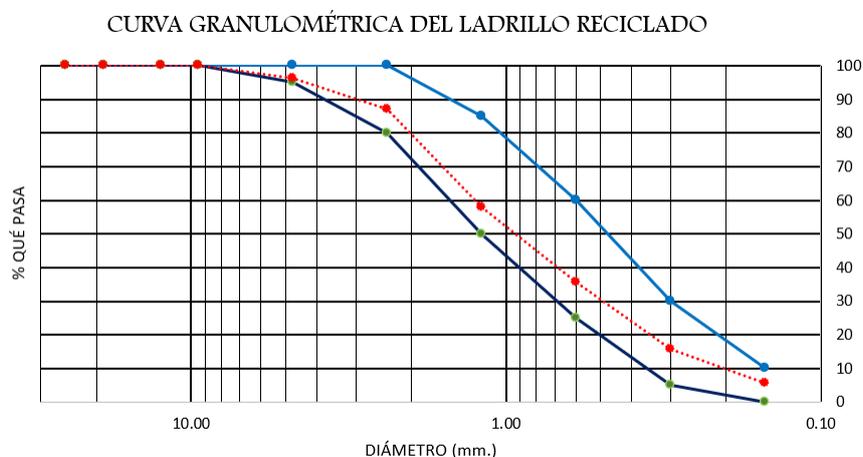


Figura 1: Curva granulométrica del ladrillo reciclado molido.

En la figura 1 se muestra la curva granulométrica del ladrillo reciclado molido, curva que resulta del graficado de abertura del tamiz y el porcentaje que pasa por los diferentes tamices, material en el cual se utilizó para la fabricación del concreto permeable en adición con diversas proporciones de ladrillo reciclado y agregado fino, que a su vez se mezclaron con el agregado grueso, cemento y aditivo superplastificante MasterEase 3010. En la figura se visualiza tres tipos de curvas, siendo la línea entrecortada (central) la granulometría ideal para ser considerado un agregado fino bien graduado, las líneas ubicadas en los extremos indican el límite establecido por la Norma Técnica Peruana (NTP 400.037) para ser considerado agregado fino, para la caracterización del ladrillo reciclado se realizó los controles necesarios, para ello se tuvo en cuenta que según la NTP 400.037

para el tamiz 3/8" debe pasar la totalidad del material y para los tamices Nro 4 y Nro 8, nos dice que el rango máximo permitido de material que pasa es el 100%, teniendo en cuenta esos criterios y con la ayuda de los tamices en mención se trituró el ladrillo de los retenidos en estos tamices, adicional a estos procedimientos también se realizó un control para no exceder el límite de finos establecido por la norma, para ello se descartó el material pasante por el tamiz Nro 100, puesto que el rango permitido de material pasante por el tamiz mencionado esta entre 0% y 10%, posterior a los procedimientos efectuados se realizó el análisis granulométrico para verificar el cumplimiento con la Norma, llegando a una conclusión de que las características del agregado fino utilizado para la producción del concreto permeable se ubicaron dentro de los parámetros aceptados por la Norma.

Tabla 1: Propiedades físicas del ladrillo reciclado.

PROPIEDADES FÍSICAS	
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	N° 4
Tamaño Máximo (TM)	3/8"
Peso Específico (Pe)	2.24
Peso Unitario Compactado (PUC) (kg/m ³)	1.317
Peso Unitario Suelto (PUS) (kg/m ³)	1.171
Porcentaje de Absorción (%)	6.4
Contenido de Humedad (%)	1.56
Módulo de fineza (MF)	3.02

En la tabla 1 se muestra las propiedades físicas del ladrillo reciclado, donde se obtuvo un módulo de fineza de 3.02, y que de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 400.037 el modulo de fineza no debe superar el límite de 3.10 para ser considerado agregado fino, el tamaño máximo estuvo situado en el tamiz 3/8", el tamaño máximo nominal se ubicó en el tamiz N° 4, el peso unitario suelto del ladrillo reciclado 1.171 kg/m³, el peso unitario compactado 1.317 kg/m³, peso específico 2.24, contenido de humedad de 1.56 y un porcentaje de absorción de 6.4 %. El tipo de suelo predominante en el lugar de estudio (Lima) son granulares de tipo arena.

2.2. Diseño factorial 2².

Es un experimento en el que consta de dos factores, cada uno de ellos con dos niveles y se utiliza cuando el número de componentes que se desea examinar es dos y la cantidad de diseños comprendidos son cuatro (Gutiérrez y de la Vara, 2007). Para ello se realizó la manipulación de dos variables, el ladrillo reciclado que estuvo en un rango de 1% a 4% y el agregado fino en proporciones de 5% a 8%. Para efectuar el diseño de las proporciones de ambos materiales se utilizó un software estadístico, en los cuales, sigue los procedimientos mostrados en la figura 2.

Tabla 2: Diseño factorial con agregado fino y ladrillo reciclado.

FACTORES	BAJO	ALTO	UNIDADES
Ladrillo Reciclado (%)	1	4	%
Agregado Fino (%)	5	8	%

En la tabla 2 se puede observar las proporciones utilizadas para desarrollar la presente investigación, las proporciones de ladrillos que se utilizaron fueron de 1% el más bajo y 4% el más alto, para el agregado fino se empleó 5% y 8% respectivamente. En relación a las proporciones y rangos utilizados para el ladrillo reciclado, se empleó de 1% a 4% porque no existía un estudio previo donde indica el efecto producido en las propiedades del concreto permeable, es por ello que se decidió experimentar entre los rangos de 1% a 4%, para el agregado fino se dispuso utilizar una proporción de 5% a 8%, esto debido a que en los estudios previos utilizar una cantidad de agregado fino inferior

al 5% se obtiene una resistencia a compresión relativamente bajas inferiores a 150 kg/cm^2 , se estableció un límite de 8% porque de acuerdo a las investigaciones no recomiendan emplear una cantidad superior al 15% ya que se reduce drásticamente la permeabilidad.

En el trabajo de titulación "Propuesta para el uso de agregado reciclado para la elaboración de concreto para estructuras aperticadas con $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ en Lima para disminuir la contaminación ambiental", se analizó el comportamiento a través de un análisis de las características mecánicas y de duración de las diferentes muestras con diversas proporciones de concreto reciclado con el propósito de obtener una relación de reemplazo adecuado de agregado natural o de cantera por el agregado reutilizado para que las propiedades del concreto se localicen dentro de los rangos detallados por las normas, llegó a una conclusión que reemplazar hasta un 50% de agregado reciclado por agregado tradicional es viable (Bazalar y Cadenillas, 2019).

Pineda y Quintero (2018) en su trabajo de investigación analizaron la incorporación de ladrillo molido en la mezcla de concreto, cuyo objetivo principal fue evaluar la incorporación de polvo de ladrillo en proporciones en la mezcla de cemento para la elaboración de concreto, el diseño de mezcla estaba compuesto por cemento, polvo de ladrillo y agua, donde se ejecutaron pruebas con proporciones de 0%, 15%, 20%, 25% y 30% de polvo de ladrillo. Se concluyó que reemplazando con 25% de incorporación de polvo de ladrillo y 75% de cemento es lo más factible en cuanto a la ganancia de la resistencia del concreto de $31,09 \text{ MPa}$.

Rosas (2018) en su trabajo de investigación evaluó la incidencia del ladrillo molido como agregado, utilizando una metodología experimental, se llegó a la conclusión que hasta un 30% de sustitución del agregado se obtiene resultados favorables, pasado el 30% las propiedades del concreto decaen. En la investigación se observó es posible utilizar el ladrillo reciclado como material de construcción hasta un 30% de sustitución por el agregado, pasando dicho límite las propiedades mecánicas del concreto decaen. En otras investigaciones Mulyono y Anisah (2019) en su artículo científico efectuó un estudio utilizando cenizas volantes, utilizando proporciones de 10% a 30%, donde se logró obtener resultados favorables empleando 10% de cenizas, en la resistencia a la compresión y flexotracción del concreto poroso.

Tabla 3: factorial 2^2 .

Orden	Ladrillo Reciclado (%)	Agregado Fino (%)
1	1	5
2	4	5
3	1	8
4	4	8

En la tabla 3 se muestra las proporciones de ladrillo reciclado molido y agregado fino utilizados en cada proporción, para el tratamiento 1 se tiene proporciones de 1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino, en el tratamiento 2 posee una proporción de 4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino, de la misma manera para los tratamientos 3 y 4, es decir el método utilizado interactúa con diferentes cantidades para cada diseño, de manera que no se repita las mismas cantidades en los diseños anteriores. Se estableció un límite máximo de 4% para el ladrillo reciclado y 8% de agregado fino, teniendo en cuenta que el ladrillo reciclado molido reemplaza en cierta medida al agregado fino y la suma de ambos materiales se obtiene un total de 12% de agregado fino, se fijó dicho límite ya que los estudios previos recomiendan utilizar una proporción de agregado fino inferior al 15% para no repercutir en la permeabilidad del concreto, las composiciones mostradas se dio gracias al uso del diseño factorial 2^2 en el que realiza las máximas combinaciones posibles y de esa manera buscar la proporción más adecuada.

Diseño de mezcla del concreto permeable

Para la fabricación del concreto permeable se utilizaron diversas dosificaciones para cada diseño, como se muestra en la tabla 2, producto del diseño factorial 2², la resistencia de diseño requerida fue de 210 kg/cm².

Tabla 4: Diseño de mezcla del concreto permeable

Proporciones	Relación a/c	Dosificación	Proporción de aditivo superplastificante (%)	Aditivo superplastificante (g)
0% L.R. + 0% A.F. (Patrón)		1.0: 0.00: 4.89		
1% L.R + 5% A.F	0.30	1.0: 0.28: 4.60	1.5	637.50
4% L.R + 5% A.F		1.0: 0.41: 4.45		
1% L.R + 8% A.F.		1.0: 0.41: 4.45		
4% L.R + 8% A. F		1.0: 0.55: 4.31		

En la tabla 4 se muestra las dosificaciones de los materiales utilizados para la elaboración del concreto permeable para cada una de las proporciones de ladrillo reciclado (L.R) y agregado fino (A.F), para la muestra patrón se tiene una dosificación 1.0: 0.00: 4.89, en los cuales 1.0 corresponde a una bolsa de cemento, 0.00 representa a cero bolsas de agregado fino y 4.89 simboliza la cantidad de bolsas de agregado grueso utilizado. Para la presente investigación se utilizó una relación agua cemento de 0.30 y según la norma ACI 522R-10 recomienda utilizar una relación agua cemento de 0.26 a 0.40, además se tuvo en consideración la relación a/cm utilizado por los antecedentes, donde en su mayoría obtienen buenos resultados con una relación a/cm de 0.30. En relación con las dosificaciones mostradas se obtienen a partir del diseño de mezcla efectuado para cada uno de los grupos, considerando las propiedades físicas de cada material, además se utilizó 1.5% de aditivo superplastificante para brindarle trabajabilidad al concreto, se empleó dicha proporción teniendo en cuenta las recomendaciones de los estudios previos. Se dispuso a reemplazar las proporciones de agregado fino por ladrillo reciclado a partir del 5% y 8% de agregado fino para poder observar con que proporción se podría obtener resultados óptimos.

Campos y Sáenz (2020) realizaron un análisis del concreto utilizando materiales reciclados, para ello elaboró mezclas con diferentes proporciones de agregado reciclado, con porcentajes 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de agregado reutilizado, para luego someter a ensayos de resistencia a la compresión y flexión, en lo cual consiguió una resistencia a la compresión de concreto de $f'c=210$ kg/cm² y $f'c=280$ kg/cm². Los resultados que se lograron obtener al reemplazar un 40% de agregado reciclado, fue que aumenta su resistencia a la compresión y tracción, pero con respecto a la resistencia a la flexión disminuye en un 28,48%.

Ensayo de permeabilidad

Permeabilidad: para Ramos (2018) es la capacidad de permitir a un fluido atravesar un material sin alterar su composición, la infiltración también depende de la compactación, mientras mayor sea la compactación disminuirá la infiltración, la permeabilidad de un concreto permeable se halla en los rangos de 0.2 cm/s a 0.54 cm/s. Para llevar a cabo la presente investigación se planteó llegar a una permeabilidad de 0.2 cm/s debido a que se utilizó el ladrillo reciclado molido como uno de los componentes.



Figura 2: Permeámetro de PVC.

Para efectuar el ensayo de permeabilidad se elaboró un permeámetro de PVC de acuerdo a lo especificado en la Norma ACI 522R-10 como se visualiza en la figura 2, para posteriormente determinar el coeficiente de permeabilidad con la fórmula de la ley de Darcy. Durante el ensayo se determinó el tiempo que tarda en atravesar el agua por toda la tubería, la altura de la muestra, área de la tubería, área de la muestra de concreto permeable, altura inicial y altura final de la tubería, para luego aplicar la formula y obtener el coeficiente de permeabilidad del concreto.

3. Resultados

Asentamiento del concreto

Tabla 5: Asentamiento del concreto permeable

Proporciones	Asentamiento (Pulgadas)	Aspecto
0% L.R. + 0% A.F. (Patrón)	1	Sin cohesión
1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	7.5	Fluido
4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	8	Fluido
1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	8.5	Fluido
4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	7.5	Fluido

En la tabla 5 se muestra el asentamiento del concreto para el diseño patrón y para los diseños con ladrillo reciclado molido y agregado fino, en el que se puede visualizar que el diseño patrón no presenta una buena consistencia, mientras que, para los diseños con ladrillo reciclado molido y agregado fino, poseen una buena trabajabilidad.

Resistencia a compresión del concreto

Para el ensayo de resistencia a compresión las muestras no serán ensayadas si en cualquier diámetro de las probetas individuales difiere por más del 2% (NTP 339.034-11, 2015). Para el ensayo de resistencia a compresión se tuvo en cuenta lo especificado en la Norma Técnica peruana.

Tabla 6: Resultado de resistencia a compresión en 7, 14 y 28 días.

Proporciones	Resistencia a compresión (kg/cm ²)		
	7 días	14 días	28 días
0% L.R. + 0% A.F. (Patrón)	42	67	78
1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	99	108	126
4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	129	163	181
1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	76	94	82
4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	157	178	217

En la tabla 6 se muestra los resultados de resistencia a compresión a los 28 días del concreto permeable para los 5 diseños, donde se observa que en el diseño con las proporciones de 1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino se logra conseguir un 39% de resistencia requerida y para el diseño con 4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino se alcanzó un 103% de resistencia requerida, es decir se superó un 3% de lo propuesto, en comparación con el diseño 4 con proporción 1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino, las diferencias presentadas son del 63%, es decir que solo por incrementar 4% de ladrillo reciclado el incremento de resistencia a compresión son muy notables. La resistencia a compresión obtenida a los 28 días para el diseño número 5 fue de 217 kg/cm², donde se puede afirmar que utilizar ladrillo reciclado molido como agregado fino en la fabricación de concreto permeable es factible.

La resistencia a compresión a los 7 días para el diseño patrón fue de 42 kg/cm² y a los 14 días de 67 kg/cm², obteniendo una ganancia de 25 kg/cm² con respecto a los 7 días, y 36 kg/cm² a los 28 días posteriormente, para el diseño con proporción 4% de ladrillo reciclado y 8% de agregado fino, a los 7 días se tenía una resistencia de 157 kg/cm², a los 14 días de 178 kg/cm² y a los 28 días 217 kg/cm², es decir a los 14 días obtuvo una ganancia de 21 kg/cm² con respecto a los 7 días y 60 kg/cm² a los 28 días.

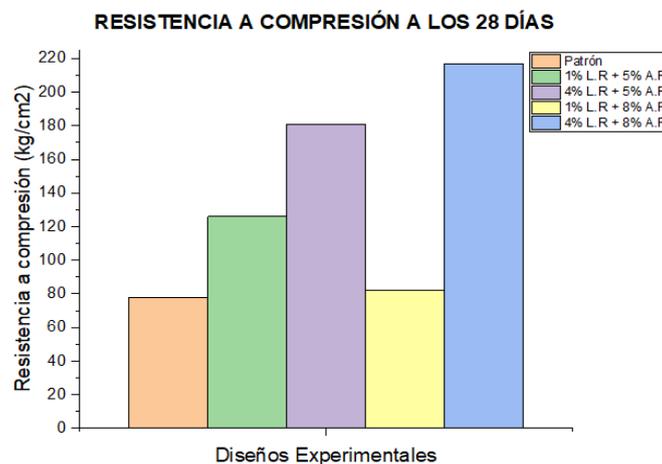


Figura 3: Resistencia a compresión por diseño a los 28 días.

En la figura 3 se visualiza el gráfico de la resistencia a compresión para el diseño patrón y los diseños experimentales con proporciones: 1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino, 4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino, 1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino y 4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino. En el diseño experimental cinco donde se utilizó 4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino se consiguió una resistencia a compresión de 217 kg/cm², consiguiendo un 103% de resistencia requerida.

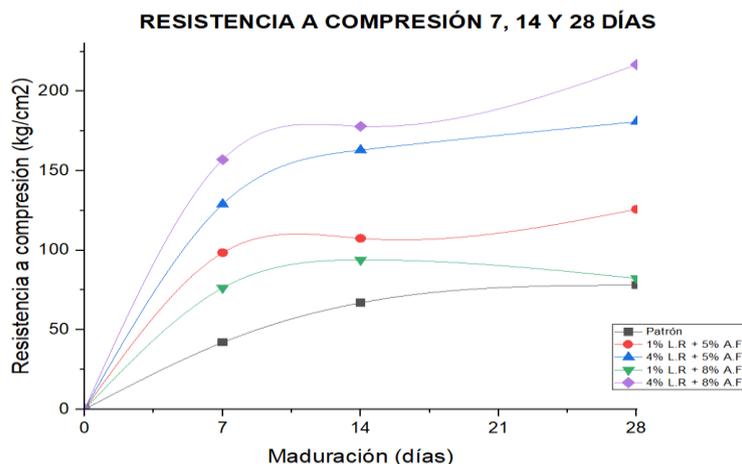


Figura 4: Resistencia a compresión 7, 14 y 28 días.

En la figura 4 se visualiza las resistencias obtenidas por los cinco diseños experimentales realizados, en los cuales se puede observar que los diseños menos favorables son los diseños experimentales 2 y 4, para el diseño 4 de acuerdo al gráfico mostrado se visualiza que la máxima resistencia adquirida se dio a los 14 días, con una resistencia a compresión de 94 kg/cm², mientras tanto en el día 28 se registró 82 kg/cm², concluyendo así que las proporciones 1% de ladrillo reciclado y 8% de agregado fino no son las adecuadas para la elaboración de un concreto permeable con una resistencia requerida de 210 kg/cm². La causa principal del incremento de la resistencia a compresión del concreto al utilizar el ladrillo es porque en su fabricación es sometido a temperaturas elevadas lo cual produce una baja absorción y una alta resistencia a compresión.

Resistencia a flexión

El método se emplea para determinar la resistencia a flexión de las muestras elaboradas y curadas de acuerdo con los métodos C42 o las prácticas C31 o C192, los resultados obtenidos se informan como el módulo de rotura (ASTM C78).

La resistencia a la flexión es un ensayo de laboratorio que se realiza con el propósito de medir la resistencia a la tracción del concreto, también es considerado como una medición que se hace para medir la resistencia a la falla por momento de una viga de concreto no reforzado. Para el ensayo de laboratorio se realiza en muestras de concreto en forma de viga, dicho elemento es fundamental en el diseño de pavimentos. De acuerdo con estudios efectuados para concreto permeable se alcanza resistencias de entre 12 kg/cm² hasta 39 kg/cm², debido a que el ladrillo reciclado molido no ha sido utilizado para elaborar concreto permeable anteriormente, se plantea llegar a un término intermedio de 25 kg/cm² (Masías, 2018).

Tabla 7. Resistencia a flexión en 7, 14 y 28 días

Proporciones	Resistencia a flexión (kg/cm ²)		
	7 días	14 días	28 días
0% L.R. + 0% A.F. (Patrón)	20.2	25.2	25.5
1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	21.7	23.5	24.9
4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	24.7	26.7	33.8
1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	21.4	25.3	21.7
4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	27.0	29.6	30.0

En la tabla 7 se aprecia el promedio de resultados de las 3 probetas tipo viga ensayados por cada diseño, en los cuales los resultados más óptimos se consiguieron con las proporciones 4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino con una resistencia a flexo-tracción promedio de 33.80 kg/cm² y el diseño menos favorable fue el diseño 4, donde se utilizó 1% de ladrillo reciclado y 8% de agregado

fino, obteniendo como resultado promedio 21.67 kg/cm². Las resistencias a flexo-tracción más apropiado conseguidas son los diseños experimentales donde se utilizaron 4% de ladrillo reciclado molido y para las resistencias más bajas obtenidas se utilizó 1% de ladrillo reciclado molido y el diseño patrón, es así que de acuerdo a los resultados obtenidos se puede afirmar que utilizar ladrillo reciclado como agregado fino en la fabricación de concreto permeable se logra optimizar la resistencia a flexo-tracción. La resistencia a flexión a los 7 días para el diseño patrón fue de 20,2 kg/cm² y a los 14 días de 25,2 kg/cm², adquiriendo una ganancia de 5 kg/cm² con relación a los 7 días, y 5,3 kg/cm² a los 28 días consecutivamente, para el diseño con proporción 4% de ladrillo reciclado y 8% de agregado fino, a los 7 días se tenía una resistencia de 27 kg/cm², a los 14 días de 29,6 kg/cm² y a los 28 días 30 kg/cm², es decir a los 14 días obtuvo una ganancia de 2,6 kg/cm² con respecto a los 7 días y 3 kg/cm² a los 28 días.

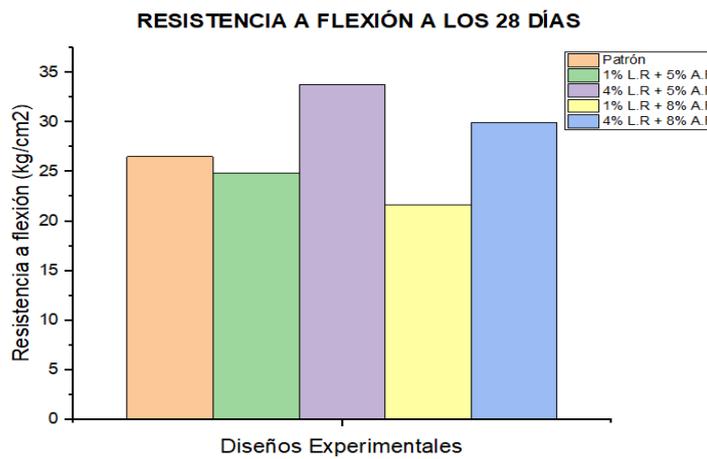


Figura 5: Variación de resistencia a flexión por diseño a los 28 días.

En la figura 5 se presenta el histograma con los resultados de resistencia a flexión a los 28 días para los 4 diseños experimentales realizados, en los cuales se puede observar que el diseño 3 donde se utilizaron las proporciones 4% de ladrillo reciclado y 5% de agregado fino, se logró obtener una resistencia a flexo-tracción de 33.80 kg/cm², siendo el más óptimo sobre todos los diseños, a comparación del diseño 4 con proporciones 1% de ladrillo reciclado y 8% de agregado fino donde se obtuvo 21.67 kg/cm² la diferencia entre la cantidad de ladrillo reciclado utilizado es significativo.

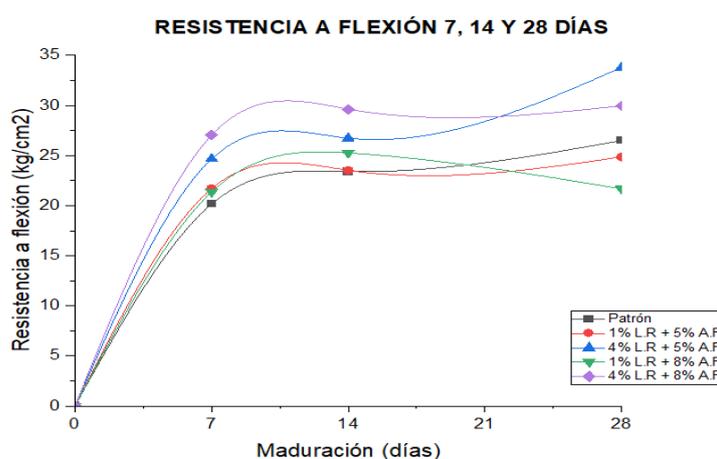


Figura 6: Resistencia a flexión 7, 14 y 28 días.

En la figura 6 se visualiza el progreso de ganancia de la resistencia a flexo-tracción del concreto permeable en 7, 14 y 28 días, en el que se puede observar que a los 7 y 14 días el diseño que sobresalía sobre los demás fue el diseño 5, con proporciones de 4% de ladrillo reciclado molido y 8% de agregado fino, pero al llegar a los 28 días el diseño más favorable fue el diseño 3 en los cuales estuvo

constituido por 4% de ladrillo reciclado y 5% agregado fino, obteniendo una resistencia a flexión de 33.80 kg/cm².

Permeabilidad del concreto a los 28 días

Para efectuar el ensayo de permeabilidad del concreto permeable previamente se elaboró un permeámetro con tuberías de PVC, donde se colocaron las probetas cilíndricas, una vez elaborado el permeámetro, se procedió a la colocación de la probeta dentro de la tubería, posteriormente al llenado de agua, luego se procedió con la medición del tiempo transcurrido cuando el agua pase por el concreto permeable.

Tabla 8: Permeabilidad del concreto a los 28 días.

PROPORCIONES	Permeabilidad (cm/s)
0% L.R. + 0% A.F. (Patrón)	0.460
1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	0.422
4% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino.	0.417
1% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	0.351
4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino.	0.241

La tabla 8 muestra la permeabilidad del concreto obtenido en el ensayo de permeabilidad del concreto, en lo cual se puede notar que el diseño 2, con proporciones de 1% de ladrillo reciclado y 5% de agregado fino se obtiene una permeabilidad alta, seguido del diseño patrón, mientras que el diseño con permeabilidad más baja corresponde a las proporciones con 4% de ladrillo reciclado y 8% de agregado fino, esto debido a que muestra mayor cantidad de agregado fino, lo cual impide el flujo del agua.

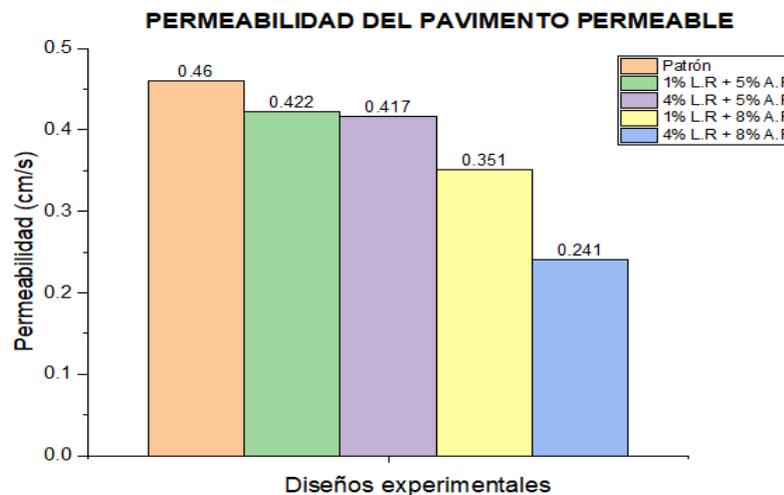


Figura 7: Permeabilidad del concreto a los 28 días.

En la figura 7 se aprecia la diferencia de permeabilidad del concreto permeable por cada diseño, los diseños 2 y 3 presentan la permeabilidad más alta seguido del patrón, ya que en su composición presentan un 6% de agregado fino (diseño 2) y 9% de agregado niño (diseño 3), y la permeabilidad menos favorable pertenece a la proporción con 12% de agregado fino (diseño 5) con un coeficiente de permeabilidad 0.241 cm/s, lo cual de acuerdo a los estudios previos realizados se encuentra en un rango aceptable.

Análisis factorial 2² para resistencia a compresión.

En esta sección se realizó el estudio de la influencia de la adición de ladrillo reciclado molido y agregado fino en diversas proporciones en la fabricación de concreto permeable.

Tabla 9: Diseño y datos para resistencia a compresión.

Orden	Ladrillo (%)	Agreg. Fino (%)	Ladrillo (%)	Agreg. Fino (%)	R1	R2	R3	Total	Nomenclatura
1	-	-	1	5	128	114	136	378	(1)
2	+	-	4	5	181	186	175	542	a
3	-	+	1	8	66	86	95	247	b
4	+	+	4	8	234	210	206	650	ab

En la tabla 9 se presenta el diseño factorial donde se estableció el orden de los diseños, las proporciones del ladrillo y agregado fino, R1, R2, R3 representan a los resultados de las 3 probetas cilíndricas roturados a los 28 días del ensayo de resistencia a compresión, en el apartado de resistencia a la compresión es la media de los resultados de las probetas 1, 2 y 3, la nomenclatura hace referencia a los diseños para el reemplazo en fórmulas que se utilizaron para el análisis estadístico.

Efectos estimados

Con relación a los datos conseguidos de los ensayos de laboratorio, los efectos causados por los materiales se calcularon de la siguiente manera:

Donde:

A: Ladrillo reciclado

B: Agregado fino

AB: Ladrillo reciclado + Agregado fino

$$A = \frac{1}{2(n)} [a + ab - b - (1)] = \frac{1}{2(3)} [542 + 650 - 247 - 378] = 94.5$$

$$B = \frac{1}{2(n)} [b + ab - a - (1)] = \frac{1}{2(3)} [247 + 650 - 542 - 378] = -3.83$$

$$AB = \frac{1}{2(n)} [ab + (1) - a - b] = \frac{1}{2(3)} [650 + 378 - 542 - 247] = 39.83$$

De la ecuación desarrollado se obtiene los efectos causados por cada material en la resistencia a compresión del concreto permeable, de acuerdo con los resultados se puede afirmar que el ladrillo reciclado es el que más aporta para la resistencia a compresión, la combinación del ladrillo reciclado y agregado fino aportan una resistencia a compresión relativamente moderada, y el agregado fino es el que poco aporoto en la resistencia a compresión del concreto permeable.

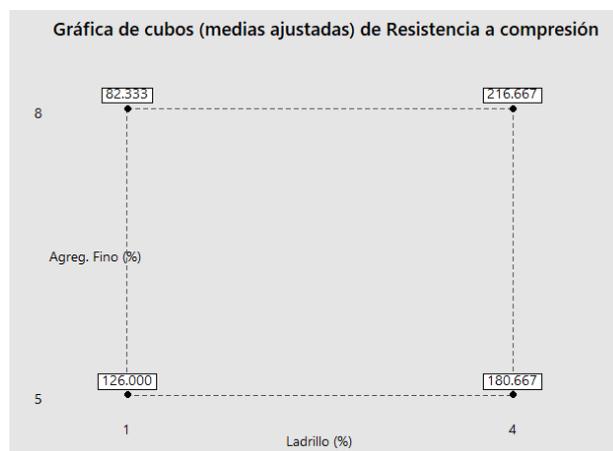


Figura 8: Esquema factorial 2² para resistencia a compresión.

En la figura 8 se muestra el esquema factorial 2² para los efectos causados por los diseños con las proporciones de ladrillo reciclado molido y agregado fino adicionados, en el que se puede observar que a más contenido de ladrillo reciclado la resistencia a compresión incrementa.

Gráfica de interacción y efectos principales

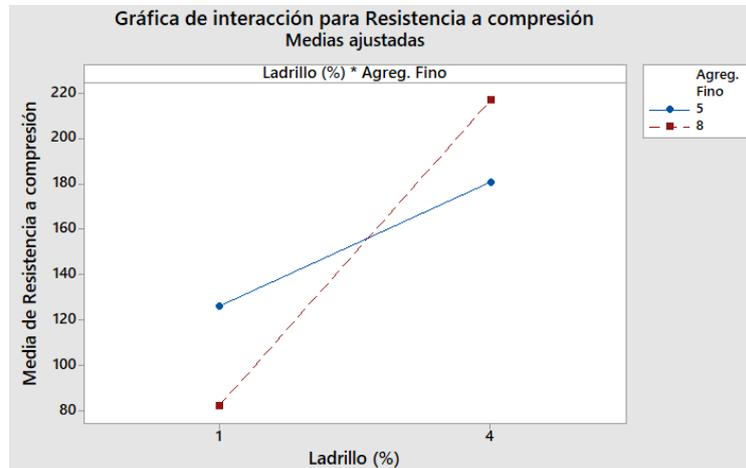


Figura 9: Interacción del ladrillo reciclado vs agregado fino.

En la figura 9 se muestra la gráfica de interacción de los efectos causados por el ladrillo reciclado molido y el agregado fino en la resistencia a compresión del concreto permeable, donde se puede visualizar que utilizar 5% de agregado fino con 1% ladrillo reciclado se obtiene resistencias que rondan los 126 kg/cm², mientras al mismo diseño aumentar la proporción de ladrillo de reciclado de 1% a 4% la resistencia del concreto permeable aumenta significativamente, para el diseño experimental 4 correspondiente al diseño con 8% de agregado fino con 4% de ladrillo reciclado las diferencias existentes son grandes. Para los efectos intermedios de los diseños, es decir 6% de agregado fino más 2% de ladrillo reciclado se obtienen resultados promedio de 150 kg/cm².

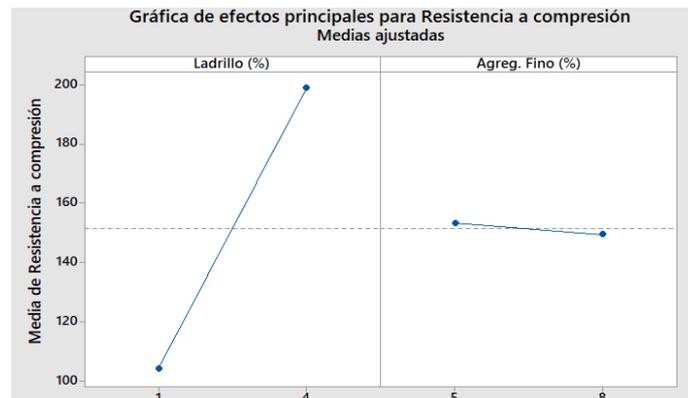


Figura 10: Efectos principales en la resistencia a compresión.

En la figura 10 se muestra el gráfico de los efectos principales causados por el ladrillo reciclado y agregado fino en la resistencia a compresión del concreto permeable. En la gráfica se puede observar los efectos de ambos materiales, para el caso del ladrillo reciclado se puede observar que a medida se va aumentando la proporción, la resistencia a compresión del concreto va en aumento, a comparación del agregado fino que de acuerdo a la gráfica su comportamiento al incrementar su proporción no tiene mucho impacto en la resistencia a compresión, es por ello que se puede afirmar que adicionar ladrillo reciclado al concreto permeable tiene resultados favorables.

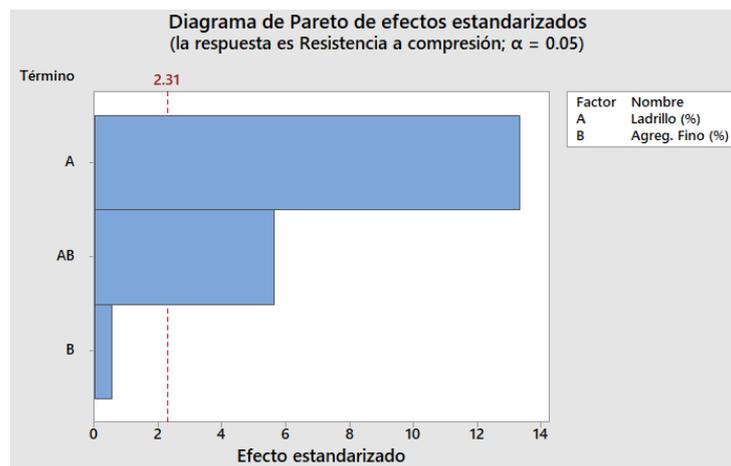


Figura 11: Diagrama de Pareto para efectos en resistencia a compresión.

La figura 11 muestra los efectos causados por el ladrillo reciclado molido, agregado fino y la interacción de ambos materiales, de acuerdo con el diagrama de Pareto se puede observar que el material con más efecto es el ladrillo reciclado molido, y el material que no produce efecto positivo es el agregado fino y la combinación del ladrillo reciclado y agregado fino aportan una resistencia a compresión relativamente moderada.

4. Discusión

Con los resultados se lograron obtener una resistencia a compresión de 78 kg/cm^2 para el diseño patrón y 126 kg/cm^2 para el diseño con proporción de 1% de ladrillo reciclado molido (L.R.M) más 5% de agregado fino (A.F), 181 kg/cm^2 en el diseño con 4% de L.R.M y 5% de A.F., 82 kg/cm^2 para el diseño 4 con 1% de L.R.M y 8% de A.F. y 217 kg/cm^2 para el diseño 5 con 4% de L.R.M y 8% de A.F. los resultados logrados guardan relación con lo mencionado por los autores Pineda y Quintero (2018) donde indican que la incorporación de ladrillo reciclado aumenta la resistencia a compresión del concreto hasta un 25%, con los resultados conseguidos para la presente investigación se logró conseguir una resistencia a compresión de 217 kg/cm^2 con el diseño conformado por 4% de ladrillo reciclado molido y 8% de agregado fino.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los resultados presentan relación con lo mencionado por Rosas (2018), quien analizó la incidencia del ladrillo molido como agregado fino, donde hace mención que utilizar ladrillo molido como agregado fino se logra incrementar la resistencia a compresión. A los 28 días el diseño con proporciones 4% de ladrillo reciclado molido y 8% de agregado fino alcanzó una resistencia a compresión promedio de 217 kg/cm^2 , el diseño con proporción 4% de ladrillo reciclado molido y 5% de agregado fino obtuvo una resistencia de 181 kg/cm^2 , mientras que el diseño con 1% de ladrillo reciclado molido se consiguió resultados de 126 kg/cm^2 para el diseño con 5% de agregado fino, y para el diseño con 8% de agregado fino se alcanzó una resistencia de 82 kg/cm^2 , mientras que en el diseño patrón se logró obtener 78 kg/cm^2 .

En la evaluación de resistencia a flexión del concreto permeable a los 28 días se alcanzó valores de resistencia a flexión de 26.50 kg/cm^2 para el diseño patrón, 24.87 kg/cm^2 en el diseño con proporción de 1% de ladrillo reciclado molido (L.R.M) más 5% de agregado fino (A.F), 33.80 kg/cm^2 en el diseño con proporciones 4% de L.R.M y 5% de A.F., 21.67 kg/cm^2 en el diseño con 1% de L.R.M y 8% de A.F., 29.97 kg/cm^2 en el diseño con 4% de L.R.M y 8% A.F. En comparación con lo afirmado por el autor Masías (2018), nos menciona que, de acuerdo a los estudios elaborados, la resistencia a flexión del concreto permeable oscila entre los rangos de 12 kg/cm^2 y 39 kg/cm^2 , para la presente

investigación los resultados conseguidos de resistencia a flexión se encuentran dentro de estos rangos.

Con los ensayos de permeabilidad efectuados a los 28 días, se obtuvieron resultados de permeabilidad de 0.460 cm/s en el diseño patrón, 0.422 cm/s para el diseño con proporción de 1% de ladrillo reciclado molido (L.R.M) más 5% de agregado fino (A.F), 0.417 cm/s en el diseño con 4% de L.R.M y 5% de A.F., 0.351 cm/s para el diseño con 1% de L.R.M y 8% de A.F. y 0.241 cm/s para el diseño con 4% de L.R.M y 8% de A.F. De acuerdo con el autor Ramos (2018) hace mención que la permeabilidad del concreto permeable se encuentra en los rangos de 0.2 cm/s y 0.54 cm/s, con respecto a los resultados obtenidos, la permeabilidad del concreto estuvo dentro de los parámetros mencionados por el autor.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión se logró mejorar la resistencia a compresión del pavimento permeable para parqueaderos utilizando ladrillo reciclado molido como agregado fino, obteniendo mayores resistencias con una proporción de 4% de ladrillo reciclado molido. A los 28 días se obtuvo una resistencia a compresión de 217 kg/cm² en el diseño con adición de 4% de ladrillo reciclado molido como agregado fino. Para la resistencia a flexotracción no se logró maximizar la resistencia a flexión del pavimento permeable para parqueaderos, obteniendo resultados de 21.67 kg/cm² con 1% de ladrillo reciclado molido y 8% de agregado fino hasta 33.80 kg/cm² utilizando 4% de ladrillo reciclado molido y 5% de agregado fino, mientras que el diseño patrón se obtuvo una resistencia a flexión de 26.50 kg/cm².

A partir del ensayo de permeabilidad con el permeámetro de caída libre, se concluye que se modifica la permeabilidad del pavimento permeable para parqueaderos de manera descendiente, obteniendo una permeabilidad mínima de 0.241 cm/s con la proporción de 4% de ladrillo reciclado más 8% de agregado fino y la permeabilidad más alta logrado pertenece al diseño patrón con 0.460 cm/s, seguidamente el diseño con proporción 1% de ladrillo reciclado más 5% de agregado fino, en los cuales se consiguió una permeabilidad de 0.422 cm/s.

De todas las propiedades mecánicas evaluados, la que más beneficio obtuvo fue la resistencia a compresión alcanzando una resistencia máxima de 217 kg/cm² a los 28 días con 4% de ladrillo reciclado y 8% de agregado fino, en comparación con la muestra patrón en el que se consiguió 78 kg/cm², la diferencia fue de 139 kg/cm².

Conflicto de interés

Los autores del presente artículo declaran que no existe ningún tipo de conflictos de intereses de ninguna naturaleza.

Contribución del autor

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus aportes en la siguiente matriz de contribuciones:

	Madueño, F.	Choque, L.	Clemente, L.
Conceptualización			
Análisis formal			
Investigación			
Metodología			
Recursos			
Validación			
Redacción – revisión y edición			

Referencias

- Arango, S. (2022). Concreto permeable: desarrollo urbano de bajo impacto. Obtenido de <https://bit.ly/3LjmdWe>
- Ayala, Y. et al. (2019). Agregados para mezclas asfálticas. Manual de ensayos para laboratorio Obtenido de <https://bit.ly/3fKL9df>
- Amorós, J. O., Centurión Vargas, M. A., & Hoyos, M. W. (2019). Uso de material reciclado en la fabricación de concreto. *Revista Caxamarca*. Vo 16, n° 2. Pp. 37-43. URI: <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3098>
- Bazalar, L. R., & Cadenillas, M. A. J. (2019). Propuesta de agregado reciclado para la elaboración de concreto estructural con $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ en estructuras aporticadas en la ciudad de Lima para reducir la contaminación ambiental. (Tesis de grado). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Obtenido de <https://bit.ly/3S5h06K>
- Campos, E. & Sáenz, J. (2020). Hormigón estructural con agregados reciclados para la construcción de viviendas. (Tesis de grado). Lima: Universidad Ricardo Palma. Obtenido de <https://bit.ly/3PHhOxe>
- Gutiérrez, H. & Vara, R (2012). Análisis y diseño de experimentos. Obtenido de: <https://bit.ly/3ULuaq7>
- Masías, K. (2018). Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso. (Tesis de grado). Piura: Universidad de Piura. Obtenido de: <https://bit.ly/3cW6mA9>
- NTP 339.034-11 (2015). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Obtenido de <https://bit.ly/3gIdnGF>
- ASTM C78. Método de prueba estándar para resistencia a la flexión del concreto. Obtenido de <https://bit.ly/3AZ7lbk>
- Mimbela-Orderique, F., Muñoz-Pérez, S. P., & Rodríguez-Lafitte, E. D. (2021). Uso de ladrillos triturados en concreto: una revisión literaria. *Revista Politécnica*, 17(34), 82-100. DOI: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n34a6>

- Mulyono, T. (2019). Properties of pervious concrete with various types and sizes of aggregate. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 276, p. 01025). EDP Sciences. DOI : <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927601025>
- Moreno, L. Á., Ospina, M. Á., & Rodríguez, K. A. (2019). Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27(4), 635-642. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000400635>
- NTP 400 037 (2014). Especificaciones-agregados. Obtenido de <https://bit.ly/3EPaJa1>
- NTP 339.034 (2015). Método de Ensayo Normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión. Obtenido de <https://bit.ly/3UkgvpF>
- Pineda, J. N., & Quintero, G. A. (2018). Evaluación de la adición de polvo de ladrillo en la mezcla de cemento, para la producción de prefabricados de concreto en la empresa Reciclados Industriales de Colombia (Tesis de Grado). Bogotá, Fundación Universidad de América. Obtenido de <https://bit.ly/3SCEtMF>
- Ramos, C. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmerica*. Vo 9 n° 3. pp 1-5. Disponible en: <https://bit.ly/3LlBwxm>
- Ramos, P. (2018). Comportamiento del concreto permeable con 20% de vacíos utilizando agregado grueso de tres canteras - Huaraz (Tesis de grado). Perú: Universidad San Pedro. Obtenido de <https://bit.ly/3ECFTmm>
- Rojas, W. K., Hidalgo, B., Moya, C. A., Castro, F., & Barboza, M. (2019). Percepción de riesgo ante las inundaciones en personas que habitan en zonas vulnerables de Lima, Perú. *Revista Cubana de Salud Pública*, 45, e1190. Obtenido de <https://bit.ly/3BcVcPj>
- Rosas, H. A. (2018). Uso de ladrillo de arcilla con exceso de cocción como agregado grueso en concretos hidráulicos. (Tesis de grado). Perú: Universidad de Piura. Obtenido de <https://bit.ly/3rqn1iZ>
- Vilca, K. G. (2017). Influencia del porcentaje de ladrillo reciclado como agregado fino sobre el asentamiento, peso unitario y resistencia a la compresión de un concreto elaborado con cemento Tipo MS. (Tesis de grado). Perú: Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de <https://bit.ly/3BKr5zc>