

Efectos del Cartón y Cerámica Reciclada en las Propiedades del Concreto Hidráulico

Carpio, Bryan^{1*} ; Muñoz, Abel² 

¹Universidad César Vallejo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Lima, Perú

²Universidad César Vallejo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Lima, Perú

Resumen: El problema del concreto hidráulico en canales abiertos se deriva de factores de diseño, construcción deficiente y condiciones climatológicas adversas que hacen que el concreto sea menos duradero y propenso a desarrollar defectos superficiales que debilitan su resistencia física y mecánica. El estudio analizó el efecto de la ceniza de cartón (CC) y cerámica reciclada (RC) en las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico. La investigación fue de diseño experimental, que incluyó ensayos de absorción de agua, permeabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Se utilizaron diferentes combinaciones para sustituir el cemento en proporciones de CC 1,5 % + RC 1 %, CC 3 % + RC 2 %, CC 4,5 % + RC 3 %, y CC 6 % + RC 4 %, que luego se compararon con la norma ASTM y una muestra control. Los resultados indicaron una absorción de agua de 0,061 g/s y una permeabilidad de 297,09 g/m², ambas inferiores. Las mayores resistencias mecánicas a los 7, 14 y 28 días alcanzaron resistencias a compresión de 191,75 ± 1,22 kg/cm², 274,38 ± 3,06 kg/cm², 323,34 ± 6,85 kg/cm², y resistencias a flexión de 31,32 ± 0,04 kg/cm², 33,23 ± 0,16 kg/cm² y 35,76 ± 0,31 kg/cm². Se concluye que la combinación óptima para los ensayos físicos y mecánicos se consigue con la combinación de CC 3 % y RC 2 %; para una mayor cantidad de CC y RC respecto a la muestra óptima, el concreto tiende a deteriorarse y perder resistencia.

Palabras clave: Concreto hidráulico, ceniza de cartón, cerámico reciclado, resistencia física y mecánica

Effects of cardboard and recycled ceramics on the properties of hydraulic concrete

Abstract: The problem of hydraulic concrete in open channels stems from design factors, poor construction, and adverse weather conditions that make the concrete less durable and prone to developing surface defects that weaken its physical and mechanical strength. The study looked at the effect of cardboard ash (CC) and recycled ceramic (RC) on the physical and mechanical properties of hydraulic concrete. The research was of experimental design, which included tests of water absorption, permeability, compressive strength and flexural strength. Different combinations were used to replace cement in proportions of CC 1.5 % + RC 1 %, CC 3 % + RC 2 %, CC 4.5 % + RC 3 %, and CC 6 % + RC 4 %, which were then compared to the ASTM standard and a control sample. The results indicated a water absorption of 0.061 g/s and a permeability of 297.09 g/m², both lower and lower. The highest mechanical strength at 7, 14 and 28 days reached compressive strengths of 191.75 ± 1.22 kg/cm², 274.38 ± 3.06 kg/cm², 323.34 ± 6.85 kg/cm², and flexural resistance of 31.32 ± 0.04 kg/cm², 33.23 ± 0.16 kg/cm² and 35.76 ± 0.31 kg/cm². It is concluded that the optimal combination for physical and mechanical tests is achieved with the combination of CC 3 % and CR 2 %; for a greater amount of CC and CR with respect to the optimal sample, the concrete tends to deteriorate and lose strength.

Keywords: Hydraulic concrete, cardboard ash, recycled ceramic, physical and mechanical resistance

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de las estructuras hidráulicas es regular el flujo de agua en los canales tanto en ecosistemas naturales como artificiales. Por ello, varios estudios han identificado retos y técnicas para controlar las estructuras hidráulicas que puedan

cumplir con éxito y eficacia su propósito (Abubakar et al., 2020). El problema del concreto hidráulico en canales abiertos se deriva de factores de diseño, construcción deficiente y condiciones climatológicas adversas que hacen que el concreto sea menos duradero y propenso a desarrollar defectos superficiales que debilitan su resistencia física y mecánica.

*bdcarpio@ucvvirtual.edu.pe

Recibido: 23/11/2023

Aceptado: 19/07/2024

Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/tp.vol54n1.10

CC 4.0

Los aditivos que se utilizan en los materiales cementosos modernos para mejorar sus características mecánicas y de durabilidad, su uso generalizado en la fabricación del concreto los hace notoriamente muy costosos (Paul et al., 2022). El concreto ha encontrado un amplio uso en aplicaciones de construcción, por lo que analizar el reciclaje y la reutilización del polvo de cerámico procedente de los escombros de construcción como material cementante suplementario en la fabricación del concreto es una muy buena opción (Zhang et al., 2023). En comparación con el uso de agregados naturales, la utilización de residuos de construcción y demolición en la producción de concreto y mortero tiene un impacto medioambiental reducido (Barrios et al., 2021).

Las actividades industriales, construcción y demolición producen grandes cantidades de residuos, como los residuos de ladrillos, cerámicas, el papel y el cartón (de Matos et al., 2021). Los restos de papel y cartón contribuyen en gran medida a la contaminación de los vertederos y los centros de producción. El sector manufacturero produce cada año más de estos residuos que contribuyen a la contaminación y la demanda de ampliación de vertederos van en aumento, al igual que el consumo de energía y recursos naturales que son de preocupación mundial (Solahuddin & Yahaya, 2021).

A nivel mundial existe un movimiento creciente para reciclar y reutilizar los residuos de construcción y demolición, se calcula un aproximado del 35 % de la cantidad producida se trasladan a vertederos sin ningún tratamiento posterior (Menegaki & Damigos, 2018). En consecuencia, la sostenibilidad de la construcción y el reciclado de los residuos se están convirtiendo en preocupaciones medioambientales de primer orden (Amin et al., 2023).

Los materiales reciclados procedentes de demoliciones de construcciones con bajas emisiones de carbono podrían producirse para sustituir al Clinker Portland como polvo de cemento endurecido y pueden ofrecer una forma de reducir el CO₂ y la carbonatación mineral en los materiales cementosos. Su aplicación como tecnología de producción de cemento contribuiría a contrarrestar las consecuencias del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Li et al., 2022). Por ello, varios investigadores han empezado a explorar materiales de construcción cementosos alternativos que puedan utilizarse como sustitutos parciales del cemento Portland (Demissew, 2022).

A medida que aumenta la necesidad del concreto de alta resistencia en diversos contextos, ganan popularidad productos como los compuestos de concreto hidráulicos fabricados a partir de residuos industriales o reciclados. Además de su resistencia, los compuestos tienen otras propiedades deseables, como baja contracción por secado, baja permeabilidad y resistencia a productos químicos y altas temperaturas (Alhazmi et al., 2021).

Brahimi et al. (2022) estudiaron el uso de residuos con material de Polietileno Tereftalato para sustituir al cemento, utilizaron porcentajes de 3,0 g, 1,75 g, 1,0 g y 2,25 g. Los resultados revelaron que los geo polímeros preparados contienen un gran porcentaje de cuarzo en forma de sílice, presentando una mejor

resistencia a las acciones externas debido a la dureza del material.

Por su parte, Fernández-Torrez et al. (2022) compararon concretos fabricados con residuos de caucho de neumáticos (RCN); utilizaron porcentajes de 5 %, 10 % y 20 % a las edades de 7 y 14 días. Los resultados muestran que los RCN superiores al 5 % reducen considerablemente la mala absorción en un 70 %, pero pierde resistencia a compresión y flexión en relación con la muestra sin contenido de RCN.

Salih et al. (2022), en su investigación, sustituyeron parcialmente el Cemento Portland Ordinario hasta en un 71 %, utilizando cenizas volantes, escoria granulada de alto horno (GGBS) y microsílce para producir concreto autocompactante duraderos y de alta resistencia. Se diseñaron dos grupos de mezclas. El primero contenía 14 %, 23,4 % y 32,77 % de cenizas volantes y 6,4 % de microsílce. El segundo contenía 32,77 %, 46,81 % y 65,5 % de GGBS y 6,4 % de microsílce. La mayoría de las pruebas reveló una alta resistencia a la compresión y durabilidad, la permeabilidad y la absorción al agua presentó un efecto significativo.

Saad et al. (2020), en su estudio evaluaron el comportamiento del uso de nuevos materiales en pavimentos de concreto rígido a las edades de 7 y 14 días. Ellos utilizaron dosificaciones de humo de sílice (0 % + 20 %) y caucho (0 % + 25 %). Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión simple disminuía hasta un 20 % cuando se añadía caucho granulado al 25 %. La adición de humo de sílice aumentó la resistencia a la compresión y a la flexión.

Según Sadagopan et al. (2023), en su investigación se utilizaron agregados de concreto triturado (ACT) y GGBS en reemplazo de parcial del cemento en relaciones a/c de 0,42 y 0,48. Los agregados resultantes muestran una mayor densidad, lo que contribuye a un aumento en la resistencia a la compresión del concreto. Por tanto, el preprocesamiento mecánico se puede mejorar para producir ACT, lo que favorece a un comportamiento del concreto más dúctil.

El estudio unió los agregados para que actúen como adhesivo y den la resistencia deseada al concreto, al sustituir el cemento por combinaciones de CC y RC en proporciones específicas mediante el análisis de los efectos al utilizar materiales reciclados. De este modo, se reducen los daños causados por el cemento al medio ambiente y, al mismo tiempo, los costos excesivos generados por los proyectos de construcción. Las combinaciones utilizadas en el estudio se prepararon en proporciones variables de CC y RC, concretamente CC 1,5 % + RC 1 %, CC 3 % + RC 2 %, CC 4,5 % + RC 3 %, y CC 6 % + RC 4 %. Asimismo, se compararon con la norma ASTM y con una muestra control sin contenido de CC y RC.

El objetivo principal de este estudio es analizar el efecto de la ceniza de cartón (CC) y cerámica reciclada (RC) en las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico. Los materiales proceden de vertederos y demoliciones de obras de construcción a escala mundial, materiales que contribuyen a la descontaminación medioambiental y mejoras de las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto.

La importancia del estudio es especialmente relevante, porque con frecuencia se desechan cantidades sustanciales de estos materiales, que acaban en vertederos o escombreras. Esta investigación abordó la importancia de utilizar materiales reciclables en el concreto hidráulico mediante el diseño de mezclas y la realización de ensayos de resistencia física y mecánica que aportaron en la mitigación de los efectos perjudiciales del deterioro en el concreto hidráulico.

2. METODOLOGÍA

La investigación se clasificó como aplicada, porque resolvió los problemas asociados al concreto hidráulico. Esta disciplina académica se caracterizó por su énfasis en la aplicación práctica de la información adquirida. Además, el estudio utilizó un diseño experimental, porque varió la variable independiente mediante una manipulación deliberada para ver su impacto en la variable dependiente.

La población la conformaron 240 probetas cilíndricas de 300 mm x 15 mm de diámetro y 60 probetas rectangulares de 42 cm x 15 cm x 12 cm, las mismas que se dividieron en una muestra de 180 probetas para ensayos de resistencia mecánica (compresión y flexión) y una muestra de 60 probetas para ensayos de resistencia física (absorción y permeabilidad).

La investigación utilizó la técnica de observación directa, porque los investigadores participaron activamente en todas las fases de elaboración de las muestras y en las pruebas de laboratorio, incluidas las evaluaciones físicas y mecánicas. El método de muestreo empleado fue no probabilístico, es decir, basado en el juicio, tras considerar detenidamente las características tanto de la población como de la muestra, teniendo en cuenta las directrices de la Norma Técnica Peruana (NTP) y la norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

2.1. Estudios de Campo:

En el presente estudio, los investigadores supervisaron minuciosamente cada uno de los procedimientos de la recolección de material reciclado, agregados pétreos naturales y los ensayos de laboratorio, que se llevaron a cabo en cuatro fases, las cuales se detallan a continuación.

Fase uno: consistió en la puesta en marcha del procedimiento de recogida de cartón por parte de la organización "Pro-Ecología". Esta empresa se encarga de la selección y recuperación sistemática de materiales de papel y cartón en diversos puntos de la ciudad del Cusco. El material de cartón se sometió a combustión para crear cenizas, que luego se refinaron hasta convertirlas en polvo. El peso específico del polvo resultante fue evaluado mediante ensayos de laboratorio, lo cual arrojó un valor de 2,22 g/cm³.

Fase dos: consistió en la recuperación de los residuos de cerámica generada durante la construcción del Pabellón "B" en el campus Cusco de la Universidad Continental. Posteriormente, la sustancia fue sometida a pulverización y posteriormente a medición de densidad, alcanzando una gravedad específica de 2,62 g/cm³.

Fase tres: consistió en la recogida de agregados pétreos. Se eligió la cantera de Vicho ubicada en la región Cusco como fuente de agregados gruesos (AG), mientras que la cantera de Huambutio fue seleccionada para los agregados finos (AF). Estas canteras se consideraron óptimas para la producción de concreto por ofrecer materias primas de alta calidad, cumplir las normas técnicas aplicables y ser fácilmente accesibles por carretera. Este factor de accesibilidad contribuye a reducir el costo por m³ de material entregado en la obra.

Fase cuatro: consistió en la producción de probetas cilíndricas y rectangulares, que posteriormente, se sometieron a curado de intervalos de tiempo específicos de 7, 14 y 28 días naturales para la resistencia mecánica. Asimismo, las pruebas de absorción de agua y de permeabilidad se realizaron con probetas en edad de 28 días, debido a que este es el tiempo necesario para determinar su máxima capilaridad y resistencia.

2.2. Estudios de laboratorio:

En esta sección, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión, absorción de agua, y permeabilidad mediante ensayos de laboratorio estandarizados por las normas internacionales y nacionales como son:

- ASTM C33/CMMM-18 (2018)
- ASTM D854-14 (2023)
- ASTM C1585-20 (2020)
- ACI PRC-522 R-10 (2011)
- IRAM1871 (2021)
- ASTM C33/C39M-21 (2021)
- ASTM C78/C78M (2022)
- NTP 339.034 (2021)
- NTP 339.078 (2022)
- MTC E-107-200 (2016)

Se realizó el ensayo tanto de los agregados gruesos como de los finos, y los valores resultantes se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipologías de los materiales naturales y reciclados

Material	AG	AF	CC	RC
Peso específico (g/cm ³)	2,49	2,51	2,22	2,62
Absorción (%)	1,16	0,76	-	-
Contenido de humedad (%)	2,03	1,37	1,01	1,45
Módulo de fineza	6,90	2,37	0,16	0,26
Peso compactado seco (kg/m ³)	1 596,45	1 630,02	1 327,21	1 439,33
Peso suelto seco (kg/m ³)	1 580,87	1 495,56	1 203,27	1 356,92
TMN (pulg)	1/2"	Nº 4	-	-

Nota: Agregado Grueso (AG), Agregado Fino (AF), Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC), Tamaño Máximo Nominal (TMN)

Se formuló, de acuerdo con la metodología ACI-211.1. (2002), un diseño de mezcla plástica de 280 kg/cm². En el diseño de la mezcla se utilizó cemento portland IP, conocido por su gravedad específica de 2,85 g/cm³. Los resultados obtenidos del diseño de la mezcla plástica se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de mezcla plástica

Material	Dosificación 280 kg/cm ²		
	Volumen	Tandas	Valores de diseño
Cemento	1,0 pie ³ /pie ³	42,5 kg/bolsa	528 kg/m ³
Agua de diseño	16,0 l/pie ³	16,0 l/bolsa	205 kg/m ³
Agregado fino	0,9 pie ³ /pie ³	39,4 kg/bolsa	490 kg/m ³
Agregado grueso	1,8 pie ³ /pie ³	80,0 kg/bolsa	994 kg/m ³

A partir de los datos obtenidos en el diseño de la mezcla, fue posible determinar las cantidades de materiales empleadas en la preparación de las probetas cilíndricas y rectangulares. La

Tabla 3 muestra, a continuación, los valores obtenidos relacionados con las cantidades necesarias para los cuatro diseños y una muestra de control sin contenido de CC y RC.

Tabla 3. Cantidad de materiales utilizados para elaboración de probetas

Materiales	Diseño	Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3		Diseño 4		Totales
	Muestra control 0,0 %	CC 1,5 % RC 1,0 %	CC 3,0 % RC 2,0 %	CC 4,5 % RC 3,0 %	CC 6,0 % RC 4,0 %					
Cemento (kg)	853,50	832,16	810,83	789,49	768,15					4 054,13
Ceniza de cartón (kg)	0,00	12,80	25,61	38,41	51,21					128,03
Cerámico reciclado (kg)	0,00	8,54	17,07	25,61	34,14					85,35
Agua de diseño l/bolsa	409,86	409,86	409,86	409,86	409,86					2 049,30
Agregado fino (kg)	674,82	674,82	674,82	674,82	674,82					3 374,10
Agregado grueso (kg)	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68					6 848,40

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Absorción de agua:

Tabla 4. Velocidad de la absorción del agua en el concreto hidráulico

Elemento	Promedio absorción (g/s)	Desviación estándar (g/s)	Coefficiente variación (%)	Absorción corregida (g/s)
Muestra control	0,149	0,047	0,318	0,101
CC 1,5 % + RC 1,0 %	0,120	0,048	0,403	0,072
CC 3,0 % + RC 2,0 %	0,106	0,045	0,427	0,061
CC 4,5 % + RC 3,0 %	0,129	0,043	0,337	0,085
CC 6,0 % + RC 4,0 %	0,135	0,045	0,332	0,090

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 4 presenta los resultados de la variación de la velocidad de absorción de agua en el concreto hidráulico con ceniza de cartón (CC) y cerámico reciclado (RC), denotando para la muestra control un valor de $0,101 \text{ g/s} \pm 0,047 \text{ g/s}$, la combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % alcanzó una absorción de $0,072 \text{ g/s} \pm 0,048 \text{ g/s}$, la combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % obtuvo un absorción de $0,061 \text{ g/s} \pm 0,045 \text{ g/s}$, la combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % logró una absorción de $0,085 \text{ g/s} \pm 0,043 \text{ g/s}$, y la combinación CC 6,0 % + 4,0 % obtuvo un absorción de $0,090 \text{ g/s} \pm 0,045 \text{ g/s}$, respectivamente.

El estudio realizado por Fernández-Torrez et al. (2022), demostró que la utilización de caucho de neumáticos dio lugar a una reducción de la absorción de agua del 2,72 %, 0,67 % y 0,55 %. Los resultados indican que el uso de materiales reciclados mejora la absorción de agua en diferentes porcentajes. El presente estudio logró con éxito una reducción de la porosidad en la absorción de agua de $0,061 \text{ g/s}$ utilizando una combinación de CC 3,0 % y RC 2,0 %. Esta mezcla en particular se considera la más favorable en términos de minimización de la velocidad de absorción de agua. Para incrementos mayores de CC y RC, la velocidad de absorción mostró una tendencia a aumentar.

3.2. Permeabilidad:

Tabla 5. Permeabilidad del concreto hidráulico

Tiempo $S^{0.5}$	MC 0,0 % (g/m ²)	CC 1,5 % + RC 1 % (g/m ²)	CC 3 % + RC 2 % (g/m ²)	CC 4,5 % + RC 3 % (g/m ²)	CC 6 % + RC 4 % (g/m ²)
60	497,98	76,02	36,97	304,63	341,79
104	700,94	237,86	187,12	506,66	542,31
120	761,49	294,83	230,88	566,83	602,10
134	820,34	345,38	276,53	620,78	655,48
147	991,81	416,49	327,84	694,53	728,86
294	1 429,99	826,19	723,20	1 116,49	1 147,61
509	1 790,08	1 260,04	1 123,66	1 489,03	1 517,32
588	1 829,50	1 301,72	1 145,16	1 526,19	1 554,30
657	1 865,91	1 333,79	1 174,09	1 517,51	1 601,83
882	1 873,64	1 421,69	1 340,20	1 586,17	1 613,71
930	1 874,59	1 431,12	1 358,12	1 587,87	1 615,41
975	1 876,66	1 435,08	1 357,18	1 589,00	1 616,54
1018	1 879,11	1 435,08	1 359,82	1 589,38	1 616,92
1060	1 879,11	1 435,08	1 359,82	1 589,38	1 616,92
Media (60 a 294)	867,09	366,13	297,09	634,98	669,69

Nota: Muestra Control (MC), Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 5 muestra los resultados de la permeabilidad mediante el ensayo de succión capilar. Los valores variables

en la curva ($S^{1/2}$) que representan las masas en g/m^2 , que es el valor del incremento de masa por unidad de área en dos

momentos diferentes: 60 y 294 horas. La muestra control alcanzó un valor promedio de 867,09 g/m², la combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % obtuvo un valor de 366,13 g/m², la combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % alcanzó un valor de 297,09 g/m², la combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % presentó un valor de 634,98 g/m², y la combinación CC 6,0 % + RC 4,0 % logró un valor de 669,69 g/cm², respectivamente.

Según Salih et al. (2022), se realizó una investigación del impacto de las cenizas volantes y microsílíce en la mejora de la capacidad de forma sofisticada. Los investigadores

observaron valores de permeabilidad del 33,3 %, 40 %, 47 % y 53,3 %, lo que demostró una influencia sustancial en la mejora de la capacidad de absorción de agua. En este estudio, la utilización de materiales reciclados demuestra una notable reducción de la permeabilidad cuando se usan materiales reciclados hasta una combinación de CC 3,0 % y RC 2,0 %. Asimismo, cuando se usan por encima de la mezcla óptima estos valores adoptan la forma de una línea creciente que se vuelve casi horizontal, lo que demuestra que la permeabilidad del concreto aumenta con el tiempo.

3.3. Resistencia a la compresión:

Tabla 6. Resistencia a la compresión del concreto hidráulico

Elemento	7 días					
	Resistencia rotura (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Coefficiente Variación (%)	Resistencia Corregida (Kg/cm ²)	ASTM C-39 (kg/cm ²) Resistencia Cumple...?	
Muestra control	192,97	1,22	0,006	191,75	191,48	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	210,35	2,87	0,014	207,48	191,48	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	224,05	5,16	0,023	218,88	191,48	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	190,88	0,67	0,003	190,21	191,48	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	182,29	1,38	0,008	180,91	191,48	No
14 días						
Muestra control	241,21	0,53	0,002	240,67	239,22	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	260,50	1,90	0,007	258,60	239,22	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	277,44	3,06	0,011	274,38	239,22	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	235,17	0,99	0,004	234,19	239,22	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	225,38	2,27	0,010	223,12	239,22	No
28 días						
Muestra control	284,62	1,91	0,007	282,72	280,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	310,25	4,35	0,014	305,90	280,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	330,19	6,85	0,021	323,34	280,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	277,74	1,17	0,004	276,57	280,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	265,71	2,84	0,011	262,87	280,00	No

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 6 muestra los datos obtenidos de las variaciones en la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días. La muestra control alcanzó valores de resistencia de 191,75 ± 1,22 kg/cm², 240,67 ± 0,53 kg/cm² y 282,72 ± 1,91 kg/cm². La combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % alcanzó resistencias de 207,48 ± 2,87 kg/cm², 258,60 ± 1,90 kg/cm² y 305,90 ± 4,35 kg/cm², la combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % obtuvo resistencias de 218,88 ± 5,16 kg/cm², 274,38 ± 3,06 kg/cm² y 323,34 ± 6,85 kg/cm², la combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % logró resistencias de 190,21 ± 0,67 kg/cm², 234,19 ± 0,99 kg/cm² y 276,57 ± 1,17 kg/cm², la combinación CC 6,0 % + RC 4,0 % alcanzó resistencias de 180,91 ± 1,38 kg/cm², 223,12 ± 2,27 kg/cm² y 262,87 ± 2,84 kg/cm², respectivamente.

Saad et al. (2020) afirmaron que el uso de un 20 % de humo de sílice y un 25 % de caucho permitió alcanzar resistencias a

la compresión para la muestra control de 330 y 445 Mpa y con las combinaciones obtuvieron 228 y 245 MPa. Según la norma ASTM C39 (2021), la resistencia mínima requerida para un diseño de 280 kg/cm² a los 7 días es de 191,48 kg/cm², a los 14 días 239,22 kg/cm² y a los 28 días 280 kg/cm². Sin embargo, la muestra control supera a la norma en un 0,14 % a los 7 días, 0,61 % a los 14 días y 0,97 % a los 28 días, la combinación de CC 1,5 % + RC 1,0 % supera en un 8,36 % a los 7 días, 8,10 % a los 14 días y 9,25 % a los 28 días, la combinación de CC 3,0 % + RC 2,0 % superan en un 14,31 %, 14,70 % y 15,48 % en los mismos intervalos de tiempo. El presente estudio alcanzó una mayor resistencia con el uso de la combinación de CC 3,0 % + 2,0 %, superando a la muestra control y a la norma ASTM C-39. De esta manera, se conduce a una disminución de la resistencia a la compresión cuando se utilizan cantidades superiores de la combinación óptima.

3.4. Resistencia a la Flexión:

Tabla 7. Resistencia a la flexión del concreto hidráulico 7 días

Elemento	7 días					
	Resistencia Rotura (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Coefficiente Variación (%)	Resistencia Corregida (Kg/cm ²)	ASTM C-78 (Kg/cm ²) Resistencia Cumple...?	
Muestra control	29,06	0,17	0,006	28,89	28,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	30,32	0,12	0,004	30,19	28,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	31,35	0,04	0,001	31,32	28,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	26,83	0,25	0,009	26,58	28,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	24,78	0,35	0,014	24,43	28,00	No

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

Tabla 8. Resistencia a la flexión del concreto hidráulico 14 y 28 días

14 días						
Elemento	Resistencia Rotura (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Coefficiente Variación (%)	Resistencia Corregida (Kg/cm ²)	ASTM C-78 (Kg/cm ²) Resistencia Cumple...?	
Muestra control	30,80	0,12	0,004	30,68	28,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	32,59	0,16	0,005	32,43	28,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	33,39	0,16	0,005	33,23	28,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	27,64	0,42	0,015	27,22	28,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	25,52	0,36	0,014	25,16	28,00	No
28 días						
Muestra control	33,21	0,29	0,009	32,93	28,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	35,14	0,12	0,004	35,02	28,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	36,06	0,31	0,009	35,76	28,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	27,76	0,32	0,011	27,45	28,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	25,92	0,36	0,014	25,56	28,00	No

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 7 y la Tabla 8 presentan los datos de las variaciones de la resistencia a la flexión en tres intervalos de tiempo diferentes: 7, 14 y 28 días. La muestra control alcanzó una resistencia de $28,89 \pm 0,17$ kg/cm², $30,68 \pm 0,12$ kg/cm² y $32,93 \pm 0,29$ kg/cm². La combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % obtuvo una resistencia de $30,19 \pm 0,12$ kg/cm², $32,43 \pm 0,16$ kg/cm², y $35,02 \pm 0,12$ kg/cm². La combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % logró resistencias de $31,32 \pm 0,04$ kg/cm², $33,23 \pm 0,16$ kg/cm² y $35,76 \pm 0,31$ kg/cm². La combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % alcanzó resistencias de $26,58 \pm 0,25$ kg/cm², $27,22 \pm 0,42$ kg/cm² y $27,45 \pm 0,32$ kg/cm², y la combinación CC 6,0 % + RC 4,0 % lograron resistencias de $24,43 \pm 0,35$ kg/cm², $25,16 \pm 0,36$ kg/cm² y $25,56 \pm 0,36$ kg/cm², respectivamente.

En su reciente estudio, Brahimi et al. (2022) examinaron la utilización de residuos que contienen material PET como sustituto del cemento. Los autores observaron que la incorporación de este material de desecho dio lugar a una mayor resistencia mecánica, atribuida a la dureza del material. Según la norma ASTM C78 (2022), el módulo de rotura de la resistencia de diseño 280 kg/cm² el 10 % es de 28 kg/cm² como mínimo estándar para las edades de 7, 14 y 28 días, la muestra control logro a superar con porcentajes de 3,18 %, 9,57 % y 17,59 %, la combinación de CC 1,5 % + RC 1,0 % superó en porcentajes de 7,84 %, 15,81 % y 25,07 %, la combinación de CC 3,0 % + RC 2,0 % superó en porcentajes de 11,85 %, 18,69 % y 27,70 % en los mismos intervalos de tiempo. La investigación de los autores y el presente estudio demuestran que el uso de materiales reciclados en cantidades cuidadosamente controladas tiene el potencial de hacer que el concreto hidráulico sea más resistente a la flexión, por lo que se consigue la mayor resistencia con la mezcla de CC 3,0 % y RC 2,0 %, a mayor cantidad de esta combinación la resistencia a la flexión del concreto tiende a disminuir.

3.5. Prueba estadística Anova:

Tabla 9. Anova – Ensayos físicos

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Absorción					
Entre grupos	0,021	4	0,005	3,844	0,006
Dentro de grupos	0,124	90	0,001		
Total	0,145	94			
Permeabilidad					
Entre grupos	2 877 079,82	4	719 269,954	2,593	0,045
Dentro de grupos	18 030 505,11	65	277 392,386		
Total	20 907 584,93	69			

Los resultados del estadístico de la prueba Anova, que se utilizó para contrastar los ensayos físicos (absorción y permeabilidad) que se hicieron en el concreto hidráulico, pueden verse en la Tabla 9. Se observó un nivel de significación de 0,006 para la prueba de absorción, mientras que se observó un nivel de significación de 0,045 para la prueba de permeabilidad. Estas cifras indican que los valores p-valué son inferiores al nivel alfa predeterminado de 0,05.

Tabla 10. Anova – Ensayos mecánicos

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
Resistencia a la compresión						
7 días	Entre grupos	3395,516	4	848,879	73,104	0,000
	Dentro de grupos	116,12	10	11,612		
	Total	3511,636	14			
14 días	Entre grupos	5239,249	4	1309,812	226,06	0,000
	Dentro de grupos	57,941	10	5,794		
	Total	5297,19	14			
28 días	Entre grupos	8177,67	4	2044,417	86,317	0,000
	Dentro de grupos	236,849	10	23,685		
	Total	8414,519	14			
Resistencia a la flexión						
7 días	Entre grupos	85,232	4	21,308	301,527	0,000
	Dentro de grupos	0,707	10	0,071		
	Total	85,939	14			
14 días	Entre grupos	133,643	4	33,411	297,921	0,000
	Dentro de grupos	1,121	10	0,112		
	Total	134,764	14			
28 días	Entre grupos	246,213	4	61,553	483,124	0,000
	Dentro de grupos	1,274	10	0,127		
	Total	247,487	14			

El análisis estadístico, es decir, la prueba Anova, se llevó a cabo para examinar los resultados mostrados en la Tabla 10. Los valores significativos obtenidos tanto para la prueba de

resistencia a la compresión como para la prueba de flexión resultaron ser 0,000 para las edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos son estadísticamente significativos, ya que se sitúan por debajo del nivel alfa de significación especificado ($p < 0,05$).

4. CONCLUSIONES

El estudio concluye que la velocidad de absorción de agua con el uso de cenizas de cartón (CC) y cerámica reciclada (RC) en concentraciones de CC 3,0 % y RC 2,0 % disminuye la porosidad en un promedio de $0,061 \text{ g/s} \pm 0,045 \text{ g/s}$ en comparación con la muestra control que alcanza $0,101 \pm 0,047 \text{ g/s}$, lo que se debe principalmente por la forma natural de los materiales. Igualmente, estas propiedades se pierden cuando se supera la mezcla óptima de CC 3,0 % y RC 2,0%, provocando mayor absorción capilar en el concreto. Esta conclusión y los resultados se apoyan en los datos mostrados en la Tabla 9 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un p-valor de 0,006, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05. En este contexto, la CC y la RC tienen efectos positivos sobre las propiedades físicas del concreto hidráulico, recomendándose el uso de estos materiales reciclados. La investigación concluye que la permeabilidad con el uso de ceniza de cartón (CC) y cerámico reciclado (RC) de una combinación de CC 3,0 % y RC 2,0 % alcanzó un valor promedio de $297,09 \text{ g/m}^2$, presentando así una capacidad de permeabilidad reducida, lo que indica una permeabilidad relativamente baja en comparación con la muestra control que obtuvo $867,09 \text{ g/m}^2$. Del mismo modo, la entrada de los agentes que aceleran la velocidad de deterioro en el concreto hidráulico. La confirmación de esta conclusión se respalda con los datos de los resultados mostrados en la Tabla 9 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un p-valor de 0,045, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05. Así, se establece que el efecto sobre las propiedades del concreto hidráulico con el uso de CC y RC es favorable.

Se establece que la resistencia a la compresión con ceniza de cartón (CC) y Cerámico Reciclado (RC) de CC 3,0 % + RC 2,0 % alcanzó la mayor resistencia con un valor de $323,34 \text{ kg/cm}^2 \pm 6,85 \text{ kg/cm}^2$ después de un periodo de curado de 28 días, superando a la muestra control que obtuvo $282,73 \text{ kg/cm}^2 \pm 1,91 \text{ kg/cm}^2$ y a la norma ASTM C-39 con diseño establecido de 280 kg/cm^2 . Asimismo, cuando se utiliza mayor cantidad de materiales de CC y RC, la resistencia a la compresión tiende a disminuir. Estos resultados se respaldan con los datos mostrados en la Tabla 10 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un p-valor de 0,000, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05 para grupos a las edades de 7, 14 y 28 días. En consecuencia, se determina que el uso de materiales reciclados de CC y RC, tiene efectos significativos en las propiedades del concreto.

Se concluye que la resistencia a la flexión con ceniza de cartón (CC) y cerámico reciclado (RC) de CC 3,0 % y RC 2,0 % alcanzó la mayor resistencia de $35,76 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,31 \text{ kg/cm}^2$ después de un periodo de curado de 28 días, superando la muestra control que obtuvo $32,93 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,29 \text{ kg/cm}^2$ y a la norma ASTM C78 con una resistencia requerida de 28 kg/cm^2 . De esta forma, cuando se utiliza mayor cantidad de materiales

de CC y RC, la resistencia a la flexión tiende a reducirse. Además, esta conclusión y resultados alcanzados se respaldan con los datos mostrados en la Tabla 10 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un valor p de 0,000, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05 para grupos a las edades de 7, 14 y 28 días. En este contexto, se infiere que la CC y la RC tienen efectos significativos sobre las propiedades del concreto hidráulico.

5. REFERENCIAS

- Abubakar Tadda, M., Ahsan, A., Imteaz, M., Shitu, A., Abdulkaki Danhassan, U., & Idris Muhammad, A. (2020). Operation and Maintenance of Hydraulic Structures. In *Hydraulic Structures - Theory and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91949>
- ACI PRC-522 R-10 American Concrete Institute. (2011). *Report on Pervious Concrete (Reapproved 2011)*. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=52210&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US AND METRIC
- ACI-211.1 American Concrete Institute®. (2002, August 9). *Diseño de mezclas Método ACI*. <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/metodo%20aci%20211?search=metodo%20aci%20211>
- Alhazmi, H., Shah, S. A. R., Anwar, M. K., Raza, A., Ullah, M. K., & Iqbal, F. (2021). Utilization of Polymer Concrete Composites for a Circular Economy: A Comparative Review for Assessment of Recycling and Waste Utilization. *Polymers*, 13(13), 2135. <https://doi.org/10.3390/polym13132135>
- Amin, M., Agwa, I. S., Mashaan, N., Mahmood, S., & Abd-Elrahman, M. H. (2023). Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass. *Sustainability*, 15(4), 3085. <https://doi.org/10.3390/su15043085>
- ASTM C33/CMMM-18. (2018, April 20). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. https://www.astm.org/c0033_c0033m-18.html
- ASTM C39/C39M-21. (2021, March 9). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html
- ASTM C78/C78M. (2022, March 30). *Standard Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. https://www.astm.org/c0078_c0078m-22.html
- ASTM C1585-20. (2020, September 22). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. <https://www.astm.org/c1585-20.html>
- ASTM D854-14. (2023, May 15). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (Withdrawn 2023)*. <https://www.astm.org/d0854-14.html>
- Barrios, A. M., Vega, D. F., Martínez, P. S., Atanes-Sánchez, E., & Fernández, C. M. (2021). Study of the properties of lime and cement mortars made from recycled ceramic aggregate and reinforced with fibers. *Journal of Building*

- Engineering*, 35, 102097. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102097>
- Brahimi, A., Meghachou, M., Abbad, H., Rahmouni, A., Chebout, R., Bachari, K., Zohra Zeggai, F., & Belbachir, M. (2022). Structural and Chemical Analysis of New Cement Based on Eggshells and Sand from Dunes (Southern West of Algeria) Stabilized by PET. In *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98346>
- de Matos, P. R., Sakata, R. D., Onghero, L., Uliano, V. G., de Brito, J., Campos, C. E. M., & Gleize, P. J. P. (2021). Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation. *Journal of Building Engineering*, 38, 102187. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102187>
- Demissew Gashahun, A. (2022). Production of Sustainable Concrete by Using Challenging Environmentally Friendly Materials Instead of Cement. In *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99239>
- Fernández-Torrez, L. A., Aquino-Rocha, J. H., & Cayo-Chileno, N. G. (2022). Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del residuo de caucho de neumático como reemplazo parcial del agregado fino en el hormigón. *Revista Hábitat Sustentable*, 12(2), 52–65. <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.02.04>
- IRAM1871. (2021, April 6). *Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. 2da Edición. <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/9219>
- Li, L., Liu, Q., Huang, T., & Peng, W. (2022). Mineralization and utilization of CO₂ in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder. *Separation and Purification Technology*, 298, 121512. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121512>
- Menegaki, M., & Damigos, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones E-107-200. (2016, May). *Manual de ensayo de materiales*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales>
- NTP 339.034. (2021, November 15). *CONCRETO. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo*. 5a Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- NTP 339.078. (2022, March 24). *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios de la distancia entre apoyos. Método de ensayo*. 4ª Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- Paul, S. C., Babafemi, A. J., Miah, M. J., Basit, M. A., Hasan, N. Md. S., & Kong, S. Y. (2022). Role of Sugarcane Juice as a Natural Admixture on Setting Time and Hardened Properties of Cementitious Materials. *Infrastructures*, 7(10), 145. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7100145>
- Saad, B., Hameed, Z., & Khadary, F. (2020). Evaluate the performance of using new materials in rigid concrete pavement. *International Journal of Civil Engineering*, 7(9), 37–45. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V7I9P106>
- Sadagopan, M., Rivera, A. O., Malaga, K., & Nagy, A. (2023). Recycled Fine and Coarse Aggregates' Contributions to the Fracture Energy and Mechanical Properties of Concrete. *Materials*, 16(19), 6437. <https://doi.org/10.3390/ma16196437>
- Salih, M. A., Ahmed, S. K., Alsafi, S., Abullah, M. M. A. B., Jaya, R. P., Abd Rahim, S. Z., Aziz, I. H., & Thanaya, I. N. A. (2022). Strength and Durability of Sustainable Self-Consolidating Concrete with High Levels of Supplementary Cementitious Materials. *Materials*, 15(22), 7991. <https://doi.org/10.3390/ma15227991>
- Solahuddin, B. A., & Yahaya, F. M. (2021). Effect of Shredded Waste Paper on Properties of Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012006>
- Zhang, P., Sun, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Polymers*, 15(3), 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>

BIOGRAFÍAS



Hidráulica y Ambiental.

Bryan, Carpio, Bachiller de Ingeniería Civil. Experiencia en las Áreas de Ejecución de Obras y Mantenimiento, experto en Costos y Presupuestos. En la actualidad trabaja en la Empresa Montecristo Inversiones en el Área de Asistente Técnico de Obras. Sus intereses de Investigación se basan en la Ingeniería Civil,



Asesor, Revisor y Jurado de Tesis de Pregrado y Postgrado.

Abel, Muñiz, Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Civil, Doctor en Ciencias de la Educación, candidato a PhD en Recursos Hídricos (estudios concluidos), Docente Universitario con el dictado de cursos de Hidráulica, Hidrología e Investigación. Consultor de Proyectos de Ingeniería. Investigador del área de Hidráulica e Hidrología,