

Partial Replacement of Fine Aggregate with Construction Waste in Concrete for Rigid Pavement in the San Pedro Human Settlement

Lesly Diaz R.¹; Sandra Lara E.²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20204134@utp.edu.pe, u20214733@ utp.edu.pe

Abstract– The use of construction waste as a partial replacement for traditional materials is a sustainable alternative in the construction industry. This study evaluated the influence of partially replacing fine aggregate with construction waste in concrete for rigid pavements in the San Pedro Human Settlement, using a quantitative approach and an experimental design. Mixtures with substitution levels of 0%, 20%, 40%, and 60% were analyzed through compression strength tests, granulometry, and bulk density measurements. The results showed that a 20% substitution significantly improves compressive strength, exceeding 200 kg/cm² at 28 days, while higher substitution percentages reduce this property. In conclusion, incorporating 20% construction waste is the optimal option to balance sustainability and structural performance in rigid pavements.

Keywords– Construction waste, fine aggregate, concrete, rigid pavements, compressive strength.

Sustitución Parcial de Agregado Fino por Residuos de Construcción en el Concreto Para Pavimento Rígido en el Asentamiento Humano San Pedro

Lesly Diaz R.¹; Sandra Lara E.²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u20204134@utp.edu.pe, u20214733@utp.edu.pe

Resumen– *El uso de residuos de construcción como reemplazo parcial de materiales tradicionales es una alternativa sostenible en la industria de la construcción. Este estudio evaluó la influencia de la sustitución parcial del agregado fino por residuos de construcción en el concreto para pavimentos rígidos en el Asentamiento Humano San Pedro, empleando un enfoque cuantitativo y un diseño experimental. Se analizaron mezclas con sustituciones del 0%, 20%, 40% y 60%, realizando pruebas de resistencia a la compresión, granulometría y peso volumétrico. Los resultados evidenciaron que una sustitución del 20% mejora significativamente la resistencia a la compresión, superando los 200 kg/cm² a los 28 días, mientras que proporciones mayores reducen esta propiedad. En conclusión, la incorporación de un 20% de residuos de construcción es la opción óptima para equilibrar sostenibilidad y desempeño estructural en pavimentos rígidos.*

Palabras clave-- *Residuos de construcción, agregado fino, concreto, pavimentos rígidos, resistencia a la compresión.*

I. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es una de las más perjudiciales para el medio ambiente, debido a su elevada generación de residuos y al consumo intensivo de recursos naturales. En respuesta a esta problemática, han surgido diversas estrategias para mitigar su impacto, entre las que destaca la incorporación de materiales reciclados en las materias primas industriales. Una alternativa prometedora es la sustitución parcial del agregado fino por residuos de construcción, lo que contribuye a reducir tanto la demanda de materiales vírgenes como la acumulación de desechos.

Este artículo se enfoca en analizar los impactos técnicos y ambientales de reemplazar parcialmente el agregado fino en concreto para pavimentos rígidos, evaluando propiedades clave como resistencia y trabajabilidad del material. La investigación también pone énfasis en el contexto urbano de San Pedro, explorando las ventajas de implementar estrategias sostenibles mediante pruebas de laboratorio y estudios de campo. Estudios previos han demostrado que el uso de residuos de construcción en mezclas de concreto, mejora tanto el rendimiento estructural como el impacto ambiental [1], impulsando el desarrollo de soluciones más sostenibles.

En ese contexto, varios autores han destacado la importancia de optimizar los agregados reciclados para mantener la calidad estructural del concreto [2,3]. Por ejemplo, el reemplazo parcial del agregado fino por residuos energéticos ha mostrado mejoras significativas en la densidad y resistencia del concreto

[4]. Herramientas como *Design Expert* han facilitado la optimización de mezclas, evidenciando que el uso de escoria de hierro y agregados reciclados puede incluso superar el desempeño de concretos convencionales [5]. Otros estudios encontraron que mezclas con hasta un 20 % de material cerámico son viables para concreto estructural [6], mientras que sustituciones de hasta un 50 % por vidrio reciclado mantienen las propiedades mecánicas sin comprometer la calidad [7]. No obstante, la proporción de reemplazo es clave: un 10 % de vidrio reciclado mejora la resistencia a la compresión, pero un 15 % la reduce [8].

El uso de residuos de demolición también ha sido objeto de interés, demostrando su viabilidad para aplicaciones estructurales específicas sin afectar las propiedades mecánicas del concreto [9]. Para estructuras de baja carga, como aceras y bancas, el concreto con agregado reciclado resulta una solución rentable y sostenible [10]. Además, se ha propuesto el uso de cenizas de *Stipa Ichu* como aditivo [11] y se ha destacado la rentabilidad de los agregados reciclados de concreto (RCA), que permiten conservar recursos naturales y reducir desechos industriales [12-14]. Finalmente, estudios recientes han explorado mezclas de concreto celular de baja densidad con residuos de cantera, lo que podría complementar investigaciones sobre concreto permeable, aportando beneficios en términos de durabilidad y control de inundaciones [16,17]. En conjunto, estas estrategias ofrecen alternativas viables para promover una construcción más sustentable y reducir el impacto ambiental de esta industria.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación de la Investigación

El Asentamiento Humano San Pedro se encuentra ubicado en el distrito de Chimbote, en la provincia del Santa, dentro de la región de Áncash, Perú. Esta localidad forma parte de una zona costera, al sur de la ciudad de Chimbote, que ha experimentado un crecimiento urbano acelerado en las últimas décadas debido al aumento de migraciones internas y al incremento de la población en áreas periféricas. Chimbote, conocido por su dinámica de expansión urbana, cuenta con una población en

constante aumento y una estructura urbana que combina áreas residenciales, industriales y comerciales.

San Pedro, en particular, se caracteriza por ser una comunidad emergente, con habitantes provenientes de diversas regiones que buscan nuevas oportunidades de desarrollo en un entorno urbano en crecimiento. La ubicación geográfica de este asentamiento humano, en un área de suelo mayormente arenoso y con condiciones climáticas típicas de una zona costera desértica, presenta desafíos significativos para el desarrollo de infraestructura vial. La falta de pavimentación respecto a veredas en muchas de sus calles ha dificultado el acceso peatonal a servicios básicos, generando condiciones de movilidad limitadas para sus habitantes, especialmente en temporadas de intenso calor y polvo.



Fig. 1 Ubicación del A.H. San Pedro-Chimbote.

B. Muestreo

En el contexto de la investigación, se ha recolectado una muestra de 200 kg de residuos de construcción. Estos materiales fueron procesados cuidadosamente para cumplir con los criterios de tamaño y consistencia necesarios en la formulación del concreto. El uso de residuos de construcción en sustitución parcial del agregado fino no solo responde a una necesidad de sostenibilidad al reducir la demanda de recursos naturales, sino que también aprovecha materiales que de otro modo serían descartados

Para asegurar que la calidad de la mezcla de concreto sea adecuada, se consideran varias normas internacionales y nacionales. La ASTM C33, que establece los requisitos de tamaño y limpieza para los agregados de concreto, es una de las bases del proyecto, ya que permite evaluar si los residuos reciclados cumplen con los estándares necesarios para su uso en concreto.



Fig. 2 Agregados para el diseño de mezcla del concreto patrón y para el diseño del 20%, 40% y 60%.

C. Técnicas e instrumentos

En esta investigación experimental sobre la "Sustitución parcial de agregado fino por residuos de construcción en el concreto para pavimento rígido", se recolectaron 200 kg de residuos de construcción, que fueron procesados y utilizados en mezclas de concreto con tres niveles de sustitución de agregado fino: 20%, 40% y 60%, denominados M1, M2 y M3, respectivamente. Estos especímenes se compararon con una muestra de control sin agregado reciclado.

A cada uno de los especímenes y a la muestra de control se les realizaron diversas pruebas normalizadas para obtener datos técnicos comparativos. Estas pruebas incluyeron el análisis granulométrico (según la norma ASTM C33), el cual permite verificar que el tamaño y la distribución de las partículas de los residuos de construcción cumplen con los requisitos para el agregado fino en concreto. Además, se realizó la prueba de resistencia a la compresión (según la norma ASTM C39) para evaluar la capacidad estructural de cada mezcla, crucial para determinar su aptitud para pavimentos rígidos. También se realizó ensayos como, peso unitario (Según MTC E 203), Contenido de Humedad (ASTM C-566 / NTP 339.185), así como un ensayo de consistencia y trabajabilidad (según ASTM C143), que permite evaluar la facilidad de manejo de la mezcla y su homogeneidad. El objetivo es determinar la influencia de la sustitución parcial del agregado fino por residuos de construcción en el concreto para pavimento rígido-veredas considerando los porcentajes a evaluar.

D. Procedimiento

- *Primera etapa:* Recolección de material a evaluar y será conservado para su análisis en laboratorio.
- *Segunda etapa:* Clasificación y limpieza del material obtenido para realizar los ensayos con intención de obtener el tamaño y consistencia necesarios en la formulación del concreto.
- *Tercera etapa:* Obtención de agregados para el diseño de concreto convencional y el diseño de sustitución considerando los porcentajes a evaluar.

- *Cuarta etapa:* Ensayos principales de los agregados para realizar el diseño de mezcla.
- *Quinta etapa:* Realizar el diseño de mezcla mediante los datos obtenidos de los agregados y residuo de construcción.
- *Sexta etapa:* Se procede a realizar la adición de los 20%, 40% y 60 % de residuos de construcción.
- *Séptima etapa:* Se realizó las probetas y el curado de estas con el diseño patrón y el diseño de mezcla con la adición del 20%, 40% y 60% de residuo de construcción.
- *Octava etapa:* Ruptura de las probetas, teniendo un total de 36 probetas. Considerando sus edades (días), cada 7 días, cada 14 días y cada 28 días.

TABLA I
POBLACIÓN DEL CONCRETO PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Nº de probetas	Nº Probetas por diseño	edad	total
3	3	7	9
3	3	14	9
3	3	28	9
3	3	28	9
TOTAL			36

III. RESULTADOS

A. Granulometría

Los análisis granulométricos indican que los agregados cumplen con las especificaciones normativas. El agregado fino (M-01) tiene un módulo de finura (MF) de 2.73, dentro del rango ideal (2.5-3.0), un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/8 in (9.5 mm) y un 2.6% de finos que pasan por el tamiz No. 200, lo que asegura buena trabajabilidad y cohesión en la mezcla. El agregado grueso (M-02) presenta una distribución uniforme, con la mayoría del material retenido en los tamices de 3/4 in (60.2%) y 1/2 in (38.9%), sin presencia significativa de finos, lo que lo hace adecuado para concreto de resistencia hasta 175 kg/cm². Los residuos de construcción (M-03) tienen un MF de 2.96, un TMN de 3/8 in (9.5 mm) y su granulometría está dentro de los límites normativos, siendo una alternativa viable para reemplazar parcialmente el agregado fino en mezclas de concreto.

TABLA II
GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS Y RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN

Nº de muestra	Descripción	MF	TMN	TM
M-01	Agregado fino	2.73	4.75 mm	3/8 in
M-02	Agregado grueso	-	3/4 in	1 in
M-03	Residuos de construcción	2.96	4.75 mm	3/8 in

B. Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción.

El agregado fino presenta una densidad dentro del rango típico (2.33-2.65 kg/m³), una gravedad específica entre 2.5 y 2.7, y una baja absorción (0.68%-0.75%), lo que asegura buena compacidad, calidad y baja retención de agua, ideal para mezclas de concreto. El agregado grueso muestra una densidad de 2.56-2.66 kg/m³ y una gravedad específica entre 2.5 y 3.0, lo que evidencia su capacidad para soportar cargas significativas, mientras que su absorción moderada (2.92%-3.07%) requiere ajustes en la relación agua-cemento para evitar variaciones en la mezcla. Los residuos de construcción presentan densidades cercanas a 2.4 kg/m³, una gravedad específica variable (2.0-2.5) y absorción más alta (3.00%-3.50%), lo que indica su viabilidad como sustituto parcial en el concreto, aunque puede requerir mayor control en la dosificación de agua.

TABLA III
DENSIDAD, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN

Nº de muestra	M-01	M-02	M-03
Descripción	Agregado fino	Agregado grueso	Residuos de construcción
Densidad relativa (seca al horno)	2.56	2.73	2.33
Densidad relativa en condición saturada	2.59	2.74	2.4
Densidad relativa aparente	2.65	2.76	2.51
Densidad en condición seca	2502	2723	2282
Densidad en condición saturada	2536	2736	2350
Densidad aparente	2593	2758	2453
Absorción	1.37	0.47	3.0

C. Contenido de humedad

El contenido de humedad de los materiales analizados muestra que el agregado fino tiene un promedio de 0.71%, lo que indica un porcentaje bajo de humedad, adecuado para su uso en la mezcla de concreto. El agregado grueso presenta un promedio de 0.37%, lo que es común para este tipo de material y no afecta significativamente la mezcla. Por otro lado, los residuos de construcción tienen un contenido de humedad promedio de 7.62%, lo que refleja una mayor capacidad de retención de

agua, lo cual debe ser controlado para evitar un exceso de agua en la mezcla que podría comprometer la resistencia del concreto.

TABLA IV
CONTENIDO DE HUMEDAD

Nº de muestra	Descripción	Contenido de humedad
M-01	Agregado fino	0.71
M-02	Agregado grueso	0.37
M-03	Residuos de construcción	7.62

D. Peso unitario

El peso unitario suelto del agregado fino es de 1562 kg/m³, mientras que el peso unitario varillado es de 1777 kg/m³, lo que refleja un aumento significativo al compactar el material, lo cual es común debido a la densificación de las partículas. Para el agregado grueso, el peso unitario suelto es de 1531 kg/m³ y el varillado es de 1684 kg/m³, mostrando también un aumento al ser compactado, lo que es característico de este tipo de material. Finalmente, los residuos de construcción tienen un peso unitario suelto de 1498 kg/m³ y un peso unitario varillado de 1674 kg/m³, lo que indica un comportamiento similar al de los agregados, con un aumento notable al ser compactados. Estos valores sugieren que los materiales tienen una densidad adecuada para su uso en la mezcla de concreto, y la variación en el peso unitario al ser compactados refleja las características de cada tipo de material.

TABLA V
PESO UNITARIO

Nº de muestra	Descripción	Peso unitario suelto (kg/m ³)	Peso unitario varillado (kg/m ³)
M-01	Agregado fino	1562	1777
M-02	Agregado grueso	1531	1684
M-03	Residuos de construcción	1498	1674

E. Diseño de mezcla

La tabla muestra los diseños de mezcla para concreto con diferentes niveles de sustitución de arena por residuos de construcción, evaluando su impacto en las proporciones de materiales y en la demanda de agua. En la mezcla patrón (MP), sin sustitución, se utilizan proporciones estándar (1:2.09:3.1 de cemento, arena y piedra) y una demanda de 27.1 litros de agua por bolsa de cemento. A medida que aumenta la proporción de residuos (20%, 40% y 60%), se reduce gradualmente la cantidad de arena y aumenta la de residuos, lo que también disminuye la demanda de agua hasta 24.4 litros por bolsa en la mezcla con 60% de sustitución.

Estos resultados indican que la incorporación de residuos de construcción no solo permite reemplazar parcialmente la arena, sino que también reduce la cantidad de agua necesaria, manteniendo un balance adecuado en la dosificación. Esto

refuerza la viabilidad del uso de materiales reciclados en el diseño de concreto, promoviendo la sostenibilidad y la optimización de recursos sin comprometer la calidad de la mezcla.

TABLA VI
DISEÑO DE MEZCLA

Diseño de mezcla (9 Probetas x diseño) volumen					
Descripción	Cemento	Arena	Piedra	R.C	Agua (Lts x bls)
MP	1	2.09	3.1	-	27.1
SUSTITUCION 20%	1	1.67	3.1	0.4	26.2
SUSTITUCION 40%	1	1.25	3.1	0.79	25.3
SUSTITUCION 60%	1	0.83	3.1	1.19	24.4

F. Dosificación de concreto patrón

En esta dosificación del concreto patrón, diseñada para alcanzar una resistencia de $f'c=175$ kg/cm², se establecieron proporciones específicas de materiales. Para un metro cúbico de mezcla, se utilizan 331 kg de cemento, 724.48 kg de agregado fino, 1055.87 kg de agregado grueso y 27.10 litros de agua por bolsa de cemento. Estos valores aseguran una mezcla equilibrada, adecuada tanto en términos de trabajabilidad como de resistencia estructural

TABLA VII
DOSIFICACION DE CONCRETO PATRON

Dosificación de concreto patrón	
Dosificación de mezcla $f'c=175$ kg/cm ²	
CEMENTO	331 Kg
AGREGADO FINO	724.48 Kg
AGREGADO GRUESO	1055.87 Kg
AGUA	27.10 Lt x bolsa

G. Dosificación de mezcla $f'c=175$ kg/cm², sustituido con 20% de residuo de construcción

En esta dosificación de concreto, diseñada para alcanzar una resistencia de $f'c=175$ kg/cm² con un 20% de sustitución de agregado fino por residuos de construcción, se realizaron ajustes en los materiales. Se mantiene constante la cantidad de cemento (331 kg) y agregado grueso (1055.87 kg), mientras que el agregado fino se reduce a 579.58 kg, y se incorporan 131.88 kg de residuos de construcción como reemplazo parcial. La cantidad de agua disminuye ligeramente a 26.2 litros por bolsa de cemento, optimizando la relación agua-cemento para esta combinación.

TABLA VIII
DOSIFICACIÓN CON SUSTITUCIÓN DEL 20% DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN

Dosificación de mezcla $f_c=175$ kg/cm ² , sustituido con 20% de residuo de construcción	
Dosificación de mezcla $f_c= 175$ kg/cm ²	
CEMENTO	331 Kg
AGREGADO FINO	579.58 Kg
AGREGADO GRUESO	1055.87 Kg
AGUA	26.2 Lt x bolsa
RESIDUO DE CONSTRUCCION	131.88 Kg

H. Dosificación de mezcla $f_c=175$ kg/cm², sustituido con 40% de residuo de construcción

En esta dosificación, orientada a lograr una resistencia de $f_c=175$ kg/cm² con una sustitución del 40% del agregado fino por residuos de construcción, se observa una disminución significativa en el uso de agregado fino, que se reduce a 434.69 kg, mientras que los residuos de construcción aumentan a 263.76 kg. El cemento y el agregado grueso permanecen constantes, con 331 kg y 1055.87 kg, respectivamente. La cantidad de agua también se ajusta a 25.30 litros por bolsa de cemento, para garantizar un equilibrio en la relación agua-cemento y mantener las propiedades deseadas del concreto.

TABLA IX
DOSIFICACIÓN CON SUSTITUCIÓN DEL 40% DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN

Dosificación de mezcla $f_c=175$ kg/cm ² , sustituido con 40% de residuo de construcción	
Dosificación de mezcla $f_c= 175$ kg/cm ²	
CEMENTO	331 Kg
AGREGADO FINO	434.69 Kg
AGREGADO GRUESO	1055.87 Kg
AGUA	25.30 Lt x bolsa
RESIDUO DE CONSTRUCCION	263.76 Kg

I. Dosificación de mezcla $f_c=175$ kg/cm², sustituido con 60% de residuo de construcción

En esta dosificación con una resistencia de diseño de $f_c=175$ kg/cm², se incorpora un 60% de sustitución del agregado fino por residuos de construcción, lo que reduce el uso del agregado fino a 289.79 kg e incrementa los residuos de construcción a 395.63 kg. El contenido de cemento (331 kg) y de agregado grueso (1055.87 kg) se mantiene constante, mientras que la cantidad de agua disminuye a 24.4 litros por bolsa de cemento para ajustar la trabajabilidad de la mezcla.

TABLA X
DOSIFICACIÓN CON SUSTITUCIÓN DEL 60% DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN

Dosificación de mezcla $f_c=175$ kg/cm ² , sustituido con 60% de residuo de construcción	
Dosificación de mezcla $f_c= 175$ kg/cm ²	
CEMENTO	331 Kg
AGREGADO FINO	289.79 Kg
AGREGADO GRUESO	1055.87 Kg
AGUA	24.4 Lt x bolsa
RESIDUO DE CONSTRUCCION	395.63 Kg

J. Resistencia a la compresión con 7 días de edad

Se realizaron tres ensayos de compresión por cada combinación a los 7 días de edad. El concreto patrón obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 113.67 kg/cm², mientras que los concretos con 20%, 40% y 60% de sustitución de agregado fino por residuos de construcción alcanzaron resistencias promedio de 177.67 kg/cm², 160.67 kg/cm² y 139.33 kg/cm², respectivamente a los 7 días de edad, la resistencia a la compresión del concreto patrón fue de 113.67 kg/cm², siendo superada por el concreto con sustitución al 20% de agregado fino por residuos de construcción, que obtuvo una resistencia a la compresión de 177.67 kg/cm². Sin embargo, los concretos con sustituciones del 40% y 60% presentaron resistencias a la compresión de 160.67 kg/cm² y 139.33 kg/cm², respectivamente, siendo menores que las dosificaciones anteriores. Destaca que el concreto con sustitución al 20% de residuos es el que alcanzó la mayor resistencia a la compresión entre las combinaciones estudiadas. Asimismo, se observa una disminución progresiva en la resistencia conforme se incrementa la proporción de sustitución, lo que indica que un exceso de residuos puede impactar negativamente las propiedades mecánicas del concreto.

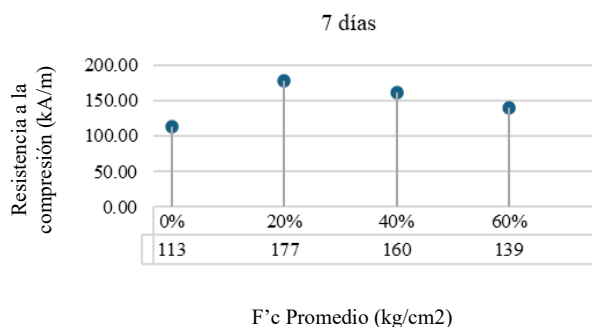


Fig. 3. Resistencia a la compresión de 7 días de edad.

K. Resistencia a la compresión con 14 días de edad

Se interpreta de la fig.5, que se realizaron tres ensayos a la compresión por cada combinación a los 14 días de edad. El concreto patrón obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 219.67 kg/cm², mientras que los concretos con

20%, 40% y 60% de sustitución de agregado fino por residuos de construcción alcanzaron resistencias promedio de 205.67 kg/cm², 213.33 kg/cm² y 164.00 kg/cm², respectivamente.

A los 14 días de edad, la resistencia a la compresión del concreto patrón fue de 219.67 kg/cm², mientras que el concreto con una sustitución del 20% de agregado fino obtuvo una resistencia promedio de 205.67 kg/cm², presentando una ligera disminución. El concreto con una sustitución del 40% alcanzó una resistencia promedio de 213.33 kg/cm², mostrando una recuperación respecto al 20%, aunque aún por debajo del concreto patrón. Por otro lado, el concreto con una sustitución del 60% presentó la menor resistencia a la compresión, con un valor promedio de 164.00 kg/cm², evidenciando una caída significativa en comparación con las demás dosificaciones. Esto resalta que, al incrementar el porcentaje de sustitución de agregado fino, la resistencia a la compresión tiende a disminuir, especialmente en niveles altos de reemplazo, sin llegar a superar los valores del concreto patrón.

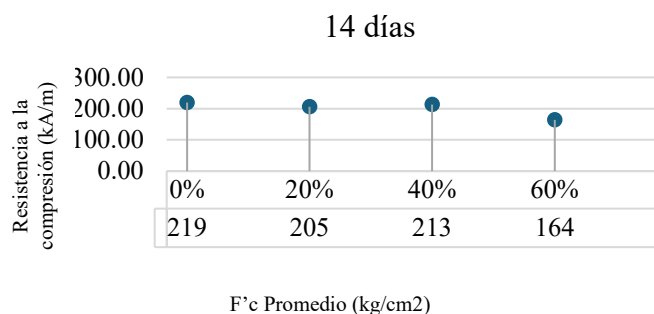


Fig. 4. Resistencia a la compresión de 14 días de edad.

L. Resistencia a la compresión con 28 días de edad

Se interpreta que se realizaron tres ensayos a la compresión por cada combinación a los 28 días de edad. El concreto patrón presentó una resistencia a la compresión promedio de 258.00 kg/cm², mientras que el concreto con una sustitución del 20% de agregado fino tuvo una resistencia promedio de 241.00 kg/cm². Por su parte, el concreto con una sustitución del 40% obtuvo una resistencia promedio de 232.67 kg/cm², y el concreto con una sustitución del 60% registró la menor resistencia, con un promedio de 202.67 kg/cm².

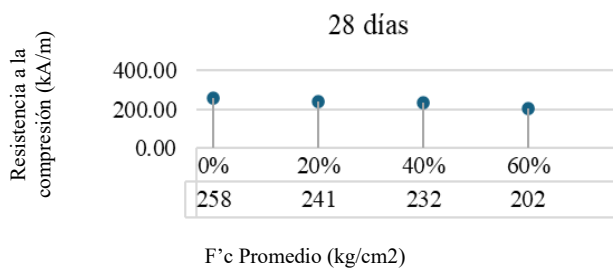


Fig. 5. Resistencia a la compresión de 28 días de edad.

De acuerdo con los datos presentados en la ilustración 6, a los 28 días de edad, la resistencia a la compresión del concreto patrón alcanzó un valor promedio de 258.00 kg/cm², superando a las mezclas con sustitución de agregado fino. El concreto con un 20% de sustitución mostró una resistencia de 241.00 kg/cm², mientras que el concreto con un 40% presentó un valor menor de 232.67 kg/cm². Finalmente, la resistencia más baja fue observada en el concreto con un 60% de sustitución, registrando 202.67 kg/cm². Esto evidencia que, a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del agregado fino, se produce una reducción progresiva en la resistencia a la compresión del concreto, lo que demuestra que la sustitución en altos porcentajes afecta negativamente las propiedades mecánicas del material, sin alcanzar los valores obtenidos con la mezcla patrón.

IV. DISCUSIÓN

En la investigación realizada se evaluaron diversas propiedades físicas de materiales reciclados como granulometría, densidad, absorción y contenido de humedad para determinar su viabilidad en la fabricación de concreto. Los resultados mostraron que el agregado fino presentó un módulo de fineza de 2.73, dentro del rango establecido (2.5–3.0), lo que sugiere buena trabajabilidad. La absorción promedio fue de 3.00%–3.50%, indicando una moderada capacidad de retención de agua, lo que podría afectar la relación agua/cemento si no se ajusta adecuadamente. La densidad promedio de los residuos reciclados fue de 2.4 kg/m³, lo que refleja una buena capacidad de carga. En comparación, un estudio previo evaluó propiedades como el valor de abrasión (16.5%), aplastamiento (14.3%) e impacto (20.4%) [18], lo que sugiere una resistencia moderada al desgaste superficial, fragilidad bajo compresión y resistencia a cargas rápidas. Las diferencias metodológicas entre ambos estudios se deben a los parámetros evaluados: mientras que esta investigación se centró en granulometría, densidad y absorción, el otro estudio enfocó sus análisis en resistencia al desgaste y compresión. Aunque ambos estudios utilizaron metodologías complementarias, las diferencias en las propiedades físicas evaluadas resaltan aspectos clave a considerar al emplear materiales reciclados en el concreto.

Se determinó que la adición de residuos de construcción como sustituto parcial del agregado fino en el diseño de concreto para veredas es viable, logrando una resistencia de $f'c = 175$ kg/cm². Para la elaboración de 1 m³ de concreto con un 20% de sustitución se requieren 331 kg de cemento, 579.58 kg de agregado fino, 1055.87 kg de agregado grueso y 26.2 litros de agua. En comparación, un estudio previo con residuos como vidrio y caucho alcanzó resistencias superiores a 70 MPa utilizando hasta un 30% de estos materiales, pero con proporciones diferentes: 360 kg de cemento, 600 kg de agregado fino, 90 kg de agregado grueso y ajustes en la relación agua/material reciclado [2]. Esta comparación evidencia que la naturaleza del residuo influye significativamente en la dosificación y el desempeño mecánico del concreto.

Desde una perspectiva de costo-beneficio, el uso de residuos de construcción puede representar una reducción del costo total de materiales del concreto entre un 10% y 20%, dependiendo de la disponibilidad local y la logística de procesamiento. Además, se reduce el impacto ambiental por la menor extracción de agregados vírgenes y la disminución de residuos en vertederos. No obstante, estos beneficios deben ser evaluados junto con los costos asociados al transporte, clasificación y posible tratamiento de los residuos antes de su uso.

Respecto a la durabilidad a largo plazo, un estudio como en [20] indican que con hasta un 60% de sustitución de residuos reciclados, el concreto mantiene una durabilidad aceptable en condiciones no estructurales, aunque tiende a presentar mayor porosidad y riesgo de carbonatación. Para aplicaciones sometidas a uso intensivo o exposición ambiental severa, se recomienda el uso de aditivos como superplastificantes, selladores o puzolanas, que mejoran la densidad de la mezcla y su resistencia a la penetración de agentes agresivos. Aunque en esta investigación no se realizaron ensayos acelerados de durabilidad, los resultados obtenidos indican que, al menos a los 28 días, el concreto con 20% de residuos cumple adecuadamente con los estándares para uso en veredas.

Finalmente, se analizaron tres niveles de sustitución: 20%, 40% y 60%. La mezcla con 20% de residuos mostró el mejor equilibrio entre resistencia, trabajabilidad y sostenibilidad, alcanzando más de 200 kg/cm² a los 28 días. Al aumentar el porcentaje, se redujo progresivamente la resistencia a compresión, lo que obligó a ajustar la relación agua/cemento. Estos hallazgos coinciden con estudios previos, que recomiendan limitar las sustituciones elevadas para elementos no estructurales, y recurrir al uso de aditivos para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto reciclado.

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los agregados naturales y los residuos de construcción analizados poseen propiedades físicas, químicas y mecánicas que, en su mayoría, cumplen con los estándares establecidos por la normativa técnica peruana. Si bien los residuos de construcción presentan mayor absorción y humedad en comparación con los agregados naturales, son una alternativa viable como sustituto parcial del agregado fino, siempre que se realicen ajustes en la relación agua-cemento y se mantenga un control riguroso en su manejo. Estos hallazgos respaldan su uso en mezclas de concreto para pavimentos rígidos, promoviendo la sostenibilidad mediante la reutilización de materiales de desecho. Estudios previos resaltan que el concreto reciclado reduce el impacto ambiental, ahorra recursos y energía, y puede generar hasta un 95% de ahorro energético, además de abrir nuevas oportunidades económicas en el mercado de materiales reciclados [20].

Los resultados de este estudio muestran que la sustitución parcial del agregado fino por residuos de construcción tiene un efecto positivo en la resistencia a la compresión del concreto, superando la resistencia mínima esperada de 175 kg/cm². A los 28 días, todas las mezclas con sustitución (20%, 40% y 60%) alcanzaron resistencias superiores a 200 kg/cm², cumpliendo e incluso excediendo los requisitos para pavimento rígido. Sin embargo, se observa que la resistencia disminuye progresivamente a medida que aumenta el porcentaje de residuos, lo que sugiere que una sustitución moderada (hasta un 20%) es más adecuada para garantizar la calidad y estabilidad del concreto en aplicaciones prácticas.

REFERENCES

- [1] F. A. N. Silva et al., "Preliminary Analysis of the Use of Construction Waste to Replace Conventional Aggregates in Concrete", *Buildings*, vol. 11, no.3, pp.81, February 2021.
<https://doi.org/10.3390/buildings11030081>
- [2] A. Ahmed and H. M. Nadir, "A Comparative Study Investigating the Feasibility and Potential of Utilising Polymer, Demolition & Glass Waste as a Partial Replacement for Fine and Coarse Aggregate in Concrete", *J. Mater. Sci. Res.*, vol.5, no. 1, pp. 1–9, January 2024.
[https://doi.org/10.47363/JMSMR/2024\(5\)162](https://doi.org/10.47363/JMSMR/2024(5)162)
- [3] H.S. Joseph et al., "A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete", *Sustainability*, vol. 15, no. 6, March 2023.
<https://doi.org/10.3390/su15064932>
- [4] A. Kaish, "Effects of different industrial waste materials as partial replacement of fine aggregate on strength and microstructure properties of concrete", *J. Build. Eng.*, vol. 35, pp.102092, March 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jobte.2020.102092>
- [5] R. Dutt Sharma and N. Singh, "Optimizing the compressive strength behavior of iron slag and recycled aggregate concretes", *Mater. Today*, April 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.093>
- [6] F. A. Salgado and F.A. Silva, "Properties of recycled aggregates from different composition and its influence on concrete strength", *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 14, no. 6, March 2021.
<https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000600005>
- [7] L. Segura et al., "Effect of the use of recycled glass on concrete design", *Rev. Univ. Soc.*, vol.14, pp. 1, 2022.
- [8] R. Matos, R., R. Villarreal and K. Lai Ng Puga, "Evaluación del concreto con vidrio reciclado molido como reemplazo parcial del agregado fino", *I+D Tecnológico*, vol. 19, no. 1, February 2023.
<https://doi.org/10.33412/idt.v19.1.3782>
- [9] W. Martínez-Molina et al., "Concreto reciclado: una revisión", *Revista ALCONPAT*, vol. 5, no. 3, September 2015.
<https://doi.org/10.21041/ra.v5i3.91>
- [10] H. Osorio et al., "Concreto a partir de agregado reciclado", *RIC*, vol. 6, pp. 146-152, July 2021.
<https://doi.org/10.33412/rev-ric.v6.0.3127>
- [11] A. Zósimo et al., "Diseño de mezcla de concreto $f'c=210$ kg/cm², adicionando cenizas de Stipa Ichu para estructuras de edificación a compresión en Lircay", *Rev. cient. cienc. ing.*, vol. 2, no. 2, July 2022.
<https://doi.org/10.54943/ricci.v2i2.219>
- [12] R. Rampit, J. Smith and I. Ray, "A review of recycled concrete aggregates as a sustainable construction material", *The International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICoNETech-2020)*, pp. 190–200, June 2020.
<https://doi.org/10.47412/dniz7049>
- [13] E. A. Ohemeng and S. O. Ekololu, "Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study", *CSCM*, vol. 13, December 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00450>

- [14]M. Nedeljković, et al., “Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review”, *J. Build. Eng.*, vol. 38, June 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102196>
- [15]G. M. Iquiapaza, “Evaluación de concreto reciclado, proveniente de procesos de demolición y construcción de viviendas para su reúso en concreto simple en la ciudad de Juliaca”, *J. Constr.*, 2019.
- [16]N. G. H. Cobos, “Diseño de mezcla de un concreto celular de baja densidad utilizando residuos de cantera”, *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents*, vol. 3, no. 2, 2021.
- [17]K. Castillo and C. Saavedra, “Diseño de mezcla de concreto permeable para uso en pavimento rígido”, *Repositorio Institucional – UCV*, 2021.
- [18]D B, Nirmala et al., “Feasibility Study on Mechanical Properties of Concrete using Construction Waste as the Partial Replacement of Coarse and Fine Aggregates”, *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 9, no.3, 2022. <https://doi.org/10.14445/23488352/ijce-v9i3p103>
- [19]A. Mardani et al., “Use of recycled mortar as fine aggregates in pavement concrete applications”, *Heliyon*, vol.10, pp. e24264, January 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24264>
- [20]E. Rivera et al., “Concretos reciclados, posibilidades de investigación desde el pregrado”, *Revista Arquitectura*, vol. 5, no. 9, June 2020. <https://doi.org/10.5377/arquitectura.v9i5.9918>