

Artículo original

Análisis de la resistencia a compresión del hormigón con agregado grueso reciclado y FCC como sustituto del agregado fino

Lourdes Peñafiel-Valla ^[1]  Carlos Navarro Peñaherrera ^[1,2]  Wilson Medina Robalino ^[1]  Bernarda Abril G ^[3]  María Espinoza Castro ^[1] 

[1] Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Universidad Técnica de Ambato (UTA). Ambato, Ecuador.

[2] Facultad de Ingenierías. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica Indoamérica. Ambato, Ecuador.

[3] Unidad de control Ambiental Minero. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato. Ecuador

Autor para correspondencia: cpnavarro@uta.edu.ec

Resumen

El presente estudio evalúa la resistencia a compresión del hormigón simple elaborado con sustitución total de los agregados convencionales; utilizando agregado grueso reciclado (AGR) y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) como reemplazo del agregado fino, en comparación con un hormigón simple fabricado con agregados naturales. La investigación se desarrolla en el contexto de la necesidad de fomentar prácticas sostenibles en la construcción, reducir el consumo de recursos naturales y minimizar el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos industriales y de demolición. La metodología se estructuró en tres fases: (i) caracterización física y mecánica del AGR y del FCC, (ii) diseño y elaboración de mezclas de hormigón con 100% de agregados reciclados y mezclas de referencia con 100% de agregados naturales, y (iii) evaluación de la resistencia a compresión y del impacto económico del uso de materiales reciclados. Los ensayos se realizaron conforme a las normativas NTE INEN y ASTM, evaluándose la resistencia a compresión a edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados mostraron una disminución aproximada del 70% en la resistencia a compresión del hormigón con sustitución total respecto al hormigón convencional, alcanzando valores de 74,17 kg/cm² y 239,74 kg/cm² a los 28 días, respectivamente. Desde el punto de vista económico, el uso de AGR y FCC incrementó el costo del metro cúbico de hormigón de \$100,90 a \$291,77. Se concluye que la sustitución total de agregados naturales por AGR y FCC no resulta técnica ni económicamente viable para aplicaciones estructurales, aunque presenta potencial para usos no estructurales, contribuyendo a la valorización de residuos y al impulso de la economía circular en el sector de la construcción.

Palabras Clave: *hormigón reciclado; resistencia a compresión; craqueo catalítico fluidizado; agregado grueso reciclado; economía circular*

Article

Analysis of the Compressive Strength of Concrete with Recycled Coarse Aggregate and FCC as a Substitute for Fine Aggregate

Abstract

This study evaluates the compressive strength of plain concrete produced with total replacement of conventional aggregates, using recycled coarse aggregate (RCA) and spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst as a substitute for fine aggregate, in comparison with plain concrete manufactured with natural aggregates. The research is developed within the context of the need to promote sustainable practices in construction, reduce the consumption of natural resources, and minimize the environmental impact associated with the management of industrial and demolition waste. The methodology was structured in three phases: (i) physical and mechanical characterization of the RCA and FCC, (ii) design and production of concrete mixtures with 100% recycled aggregates and reference mixtures with 100% natural aggregates, and (iii) evaluation of compressive strength and the economic impact of using recycled materials. The tests were conducted in accordance with NTE INEN and ASTM standards, and compressive strength was evaluated at curing ages of 7, 14, and 28 days. The results showed an approximate 70% reduction in the compressive strength of concrete with total replacement compared to conventional concrete, reaching values of 74.17 kg/cm² and 239.74 kg/cm² at 28 days, respectively. From an economic perspective, the use of RCA and FCC increased the cost per cubic meter of concrete from \$100.90 to \$291.77. It is concluded that the total replacement of natural aggregates with RCA and FCC is neither technically nor economically viable for structural applications; however, it shows potential for non-structural uses, contributing to waste valorization and the promotion of the circular economy in the construction sector.

Keywords: *recycled concrete; compressive strength; fluid catalytic cracking; recycled coarse aggregate; circular economy*



1. Introducción

La creciente demanda de infraestructura y el acelerado proceso de urbanización han intensificado la explotación de recursos naturales, particularmente de agregados pétreos, generando impactos ambientales significativos y problemas de disponibilidad a mediano y largo plazo. (Carrera & Medina, 2019) En este contexto, la industria de la construcción enfrenta el desafío de desarrollar materiales alternativos que reduzcan el consumo de recursos vírgenes y la generación de residuos, sin comprometer el desempeño mecánico del hormigón convencional (Abed et al., 2020).

Una de las estrategias más estudiadas para abordar esta problemática es el uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición. Diversas investigaciones recientes han demostrado que el agregado grueso reciclado (AGR) puede emplearse en la elaboración de hormigón, aunque su uso suele estar asociado a una reducción de la resistencia a la compresión, atribuida principalmente a su mayor porosidad, absorción de agua y a la presencia de mortero adherido (Muñoz Pérez et al., 2021). Por esta razón, la mayoría de los estudios se han centrado en sustituciones parciales, manteniendo un porcentaje significativo de agregados naturales.

Paralelamente, el catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC), un residuo generado en la industria petroquímica ha despertado interés como material alternativo en matrices cementicias debido a su composición rica en sílice y alúmina y a su potencial comportamiento puzolánico. Investigaciones recientes han reportado su uso principalmente como adición mineral o como sustituto parcial del cemento, evidenciando mejoras en la microestructura y la durabilidad del hormigón cuando se emplea en proporciones controladas (Silva Urrego et al., 2022). No obstante, existen escasos estudios que analicen el uso del FCC como sustituto total del agregado fino, y aún menos que evalúen su desempeño combinado con AGR en un mismo sistema de hormigón.

En este sentido, la principal contribución científica del presente estudio radica en la evaluación experimental del comportamiento mecánico del hormigón simple elaborado con sustitución total (100%) de los agregados naturales, empleando simultáneamente agregado grueso reciclado y FCC como reemplazo del agregado fino. A diferencia de estudios previos, esta investigación no se limita a analizar sustituciones parciales, sino que explora un escenario extremo de reciclaje total, permitiendo identificar con mayor claridad las limitaciones técnicas reales de este tipo de hormigón y su potencial campo de aplicación. (Zúñiga & Picado, 2022)

Adicionalmente, el estudio incorpora un análisis económico contextualizado a la realidad ecuatoriana, aspecto que ha

sido abordado de forma limitada en la literatura reciente. Este enfoque permite no solo evaluar el desempeño mecánico del material, sino también analizar su viabilidad económica frente al hormigón convencional, considerando costos locales de materiales y procesos, lo cual resulta fundamental para una eventual aplicación práctica.

En Ecuador, la gestión de residuos de construcción y demolición, así como de subproductos industriales como el FCC, continúa representando un desafío ambiental relevante. A pesar del creciente interés por materiales sostenibles, persiste una brecha de conocimiento respecto al comportamiento del hormigón con sustitución total de agregados y al impacto económico asociado a su implementación. En este contexto, el presente estudio busca aportar evidencia experimental y económica que contribuya a la toma de decisiones técnicas informadas sobre el uso de AGR y FCC en aplicaciones no estructurales, promoviendo la economía circular y la reducción del impacto ambiental en el sector de la construcción.

2. Metodología

2.1. Enfoque experimental

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo experimental, con el objetivo de evaluar el efecto de la sustitución total de los agregados naturales por agregado grueso reciclado (AGR) y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) como agregado fino sobre la resistencia a la compresión del hormigón simple. El estudio incluyó la caracterización de los materiales constituyentes, el diseño y elaboración de mezclas de hormigón, la evaluación de propiedades mecánicas y el análisis comparativo de costos.

2.2. Materiales

Los materiales empleados en la investigación fueron: cemento Portland tipo GU, agua potable, agregado grueso natural, agregado fino natural, agregado grueso reciclado (AGR) y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC).

El agregado grueso reciclado provino de residuos de construcción y demolición de origen local, mientras que el FCC fue obtenido como subproducto de la refinería de Esmeraldas. Además, equipamiento de laboratorio como por ejemplo: hornos eléctricos, balanzas electrónicas, tamices, tamizadora, picnómetros, termómetros, moldes, varillas, máquina de Los Ángeles, moldes cilíndricos para probetas, concretera eléctrica, cámara de curado y demás implementos para la preparación, curado y ensayo de especímenes cilíndricos.

2.3. Tratamiento previo del agregado reciclado y del FCC

El agregado grueso reciclado fue sometido a un proceso previo de selección manual para eliminar impurezas visibles (madera, plástico y otros contaminantes), seguido de lavado con agua potable y secado al aire. Posteriormente, el material fue triturado y tamizado para cumplir con la granulometría requerida según las normas NTE INEN y ASTM para agregados gruesos.

El FCC fue secado en horno a 105 ± 5 °C hasta peso constante y posteriormente tamizado para asegurar una distribución granulométrica compatible con la del agregado fino natural.

2.4. Caracterización física y mecánica de los materiales

La caracterización de los agregados naturales, reciclados y del FCC se realizó conforme a las normas ASTM y NTE INEN vigentes. Los ensayos efectuados incluyeron:

- Contenido de humedad, determinado por secado en horno a 105–110 °C hasta peso constante.
- Análisis granulométrico mediante tamizado seco.
- Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción, utilizando métodos gravimétricos y volumétricos.

- Densidad aparente suelta y compactada.
- Resistencia al desgaste mediante el ensayo de abrasión Los Ángeles.
- Determinación de la densidad real del cemento mediante picnómetro.
- Análisis por Fluorescencia de Rayos X del FCC.

2.5. Diseño de mezclas y dosificación

Se diseñaron dos tipos de mezclas de hormigón:

- Mezcla de referencia, elaborada con 100% de agregados naturales (agregado grueso y fino).
- Mezcla reciclada, elaborada con sustitución total (100%) del agregado grueso natural por AGR y del agregado fino natural por FCC.

La dosificación de las mezclas se realizó utilizando el método de densidad óptima desarrollado por la Universidad Central del Ecuador, con el objetivo de minimizar el contenido de vacíos y optimizar el uso de la pasta de cemento.

Las proporciones de los materiales por metro cúbico de hormigón, así como la relación agua/cemento efectivo, se presentan de manera detallada en la Tabla 1 y en la Tabla 2.

Tabla 1: Dosificación del hormigón con agregados naturales

DOSIFICACIÓN - MÉTODO DENSIDAD ÓPTIMA					
DATOS DE ENSAYOS			DATOS DE TABLAS		
DRC	3,000	kg/dm ³	f _c	240	kg/cm ²
DRA	2,670	kg/dm ³	W/C	0,56	
DRR	2,630	kg/dm ³	Asentamiento	9	cm
DAA _s	1,640	kg/dm ³	CÁLCULOS		
DAR _s	1,450	kg/dm ³	DRM	2,648	kg/dm ³
DAA _c	1,62	kg/dm ³	POV	23,35	%
DAR _c	1,45	kg/dm ³	CP	279,18	dm ³
MFA	2,760		C	312,52	kg
DOM	2,03	kg/dm ³	W	175,01	lts
POR	54	%	A	885,31	kg
POA	46	%	R	1023,70	kg
CAA	2,17	%	Cantidad Requerida	20	Cil (D=10 cm)
CAR	3,2	%	Rendimiento	61,13	%
CHA	3,81	%	VR	0,024	m ³
CHR	0,76	%	VN	0,033	m ³
DOSIFICACIÓN					

Material	Cantidad en kg por cada m³ de hormigón	Dosificación al peso	Cantidad por saco de 50 kg de cemento (kg)	Dosificación al volumen en obra	Cantidad requerida por rendimiento y/o humedad (kg)
W	175,01	0,56	29,50	29,50 L	6,07
C	312,52	1,00	50,00	1,00 Sac. 50kg	10,23
A	885,31	2,83	144,00	3,30 Parh.	29,44
R	1023,70	3,28	159,50	4,10 Parh.	32,68

Tabla 2: Dosificación del hormigón con agregados reciclados

DOSIFICACIÓN - MÉTODO DENSIDAD ÓPTIMA					
DATOS DE ENSAYOS			DATOS DE TABLAS		
DRC	3,000	kg/dm³	f'c	240	kg/cm²
DRA	2,620	kg/dm³	W/C	0,56	
DRR	2,540	kg/dm³	Asentamiento	4	cm
DAAAs	0,930	kg/dm³	CÁLCULOS		
DARs	1,400	kg/dm³	DRM	2,577	kg/dm³
DAAC	1	kg/dm³	POV	37,52	%
DARc	1,47	kg/dm³	CP	417,71	dm³
MFA	0,010		C	467,58	kg
DOM	1,61	kg/dm³	W	261,85	lts
POR	54	%	A	701,78	kg
POA	46	%	R	798,67	kg
CAA	5,32	%	Cantidad Requerida	20	Cil (D=10 cm)
CAR	3,57	%	Rendimiento	54,99	%
CHA	2,21	%	VR	0,024	m³
CHR	0,94	%	VN	0,034	m³
DOSIFICACIÓN					
Material	Cantidad en kg por cada m³ de hormigón	Dosificación al peso	Cantidad por saco de 50 kg de cemento (kg)	Dosificación al volumen en obra	Cantidad requerida por rendimiento y/o humedad (kg)
W	261,85	0,56	32,50	32,50 L	10,41
C	467,58	1,00	50,00	1,00 Sac. 50kg	15,98
A	701,78	1,50	72,50	2,90 Parh.	23,23
R	798,67	1,71	83,00	2,20 Parh.	26,57

El control de la consistencia del hormigón fresco se realizó mediante el ensayo de asentamiento, verificando que las mezclas se mantuvieran dentro de un rango comparable para permitir una evaluación mecánica objetiva.

2.6. Elaboración y curado de especímenes

Se elaboraron un total de 40 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, distribuidas de la siguiente manera:

- 5 probetas piloto para ajuste preliminar de la mezcla para hormigón convencional.
- 5 probetas piloto para ajuste preliminar de la mezcla con sustitución total de AGR y FCC.
- 15 probetas de hormigón convencional.
- 15 probetas de hormigón con sustitución total de AGR y FCC.

Para cada tipo de mezcla se ensayaron cinco especímenes por edad de curado (7, 14 y 28 días), garantizando la repetibilidad de los resultados. Las probetas fueron curadas en cámara húmeda a temperatura controlada hasta el momento del ensayo.

2.7. Ensayos mecánicos

La resistencia a la compresión se determinó conforme a la normativa ASTM correspondiente, utilizando una máquina de compresión hidráulica SHIMADZU. Los ensayos se realizaron a edades de 7, 14 y 28 días.

Adicionalmente, se evaluó el módulo de elasticidad del hormigón endurecido, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas técnicas aplicables.

2.8. Análisis económico

El análisis de costos se efectuó comparando el costo directo por metro cúbico del hormigón convencional y del hormigón con agregados reciclados. Para ello, se recopilaban proformas de proveedores locales, considerando costos de adquisición, transporte y procesamiento de los materiales.

El procesamiento de la información económica se realizó mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel, permitiendo evaluar la viabilidad económica de la sustitución total de agregados naturales por AGR y FCC en el contexto local.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización física y mecánica de los materiales

Contenido de humedad

El análisis del contenido de humedad, según la Figura 1, mostró diferencias entre los agregados tradicionales y reciclados. En el caso del agregado grueso, el ripio presentó una humedad de 0,76%, mientras que el ripio reciclado alcanzó un 0,94%, indicando una mayor capacidad de retención de agua en los materiales reciclados, posiblemente debido a su mayor porosidad. Para los agregados finos, según la Figura 2, la arena registró un contenido de humedad de 3,81%, superior al 2,21% observado en el catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC).

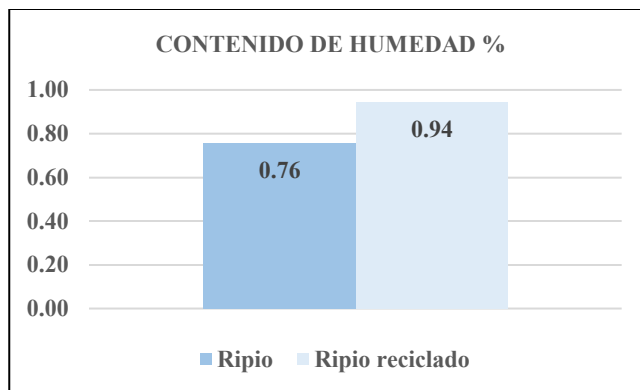


Figura 1: Comparación del contenido de humedad de los agregados gruesos

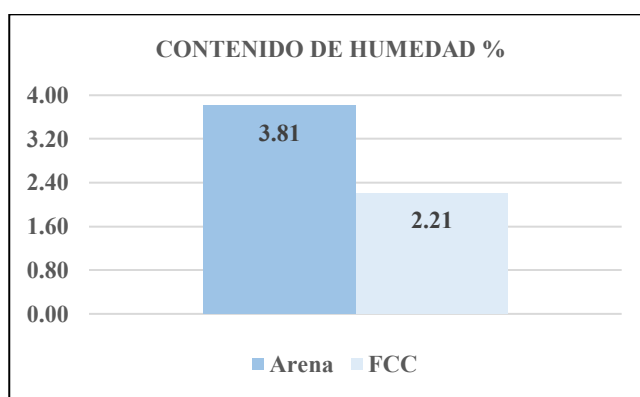


Figura 2: Comparación del contenido de humedad de los agregados finos

Análisis granulométrico mediante tamizado seco.

Según la Figura 3, la arena natural cumple con los requisitos de granulometría, con un paso del 96,16% en el tamiz #4 y valores gradualmente decrecientes hasta un 0,8% en el tamiz #200, lo que indica una adecuada graduación. En el caso del FCC, aunque presenta un mayor porcentaje retenido en tamices finos (#100 y #200), con un 13,63% pasando el tamiz #200, aún puede ser considerado para mezclas siempre que se controle su efecto sobre la trabajabilidad.

Se recomienda precaución en el uso del FCC por su contenido más alto de partículas finas, que podría aumentar la demanda de agua y afectar la cohesión de la mezcla. En el caso de la Figura 4, el ripio natural presenta una curva bien graduada, con una retención progresiva desde el tamiz de 2" hasta el #4, siendo el 98,76% retenido en el tamiz de 1". El ripio reciclado, por su parte, presenta una distribución similar, aunque con una ligera variación en los porcentajes retenidos, destacando un 59,55% en el tamiz de 1/2", lo que indica una mayor proporción de partículas medianas.

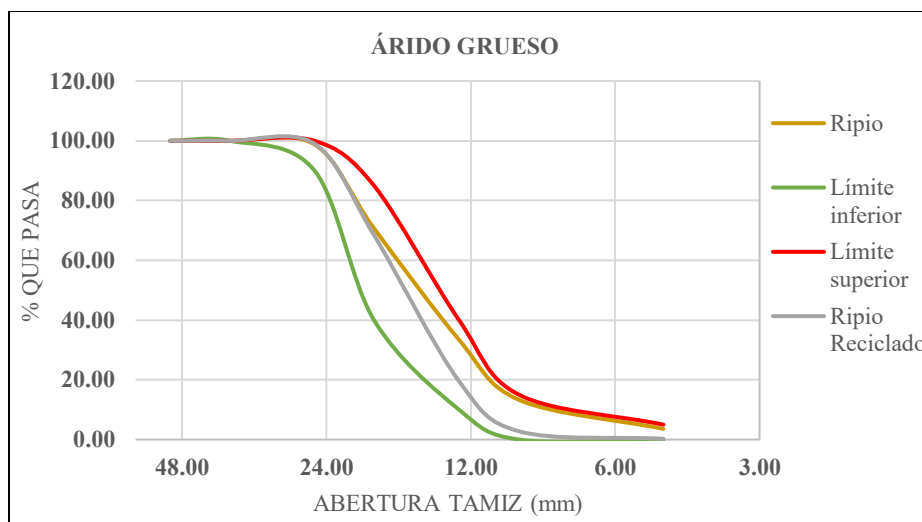


Figura 3: Comparación del análisis granulométrico de los agregados gruesos.

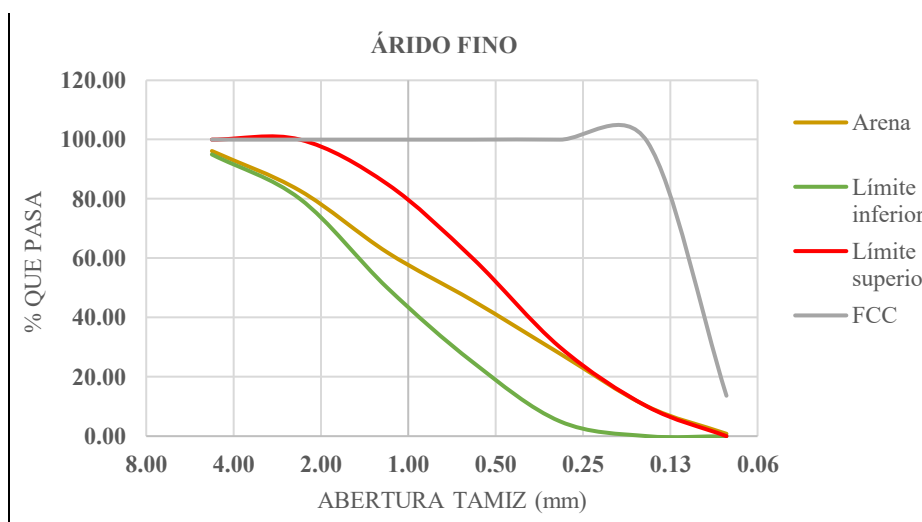


Figura 4: Comparación del análisis granulométrico de los agregados finos

Densidad real, gravedad específica y capacidad de absorción, utilizando métodos gravimétricos y volumétricos.

En el caso del agregado fino, según la Figura 5, la arena natural presentó una densidad real de $2,67 \text{ g/cm}^3$ y una capacidad de absorción del 2,17%, mientras que el fino de FCC mostró una densidad ligeramente menor de $2,62 \text{ g/cm}^3$, pero con una capacidad de absorción significativamente mayor del 5,32%. Estos resultados indican que, aunque la arena es ligeramente más densa, el FCC es considerablemente más poroso, lo que implica una mayor demanda de agua en la mezcla. Esta porosidad podría afectar la trabajabilidad y requerir ajustes en la relación agua/cemento para evitar disminuciones en la resistencia del

hormigón. En los agregados gruesos, según la Figura 6, el ripio natural presentó una densidad de $2,63 \text{ g/cm}^3$ y una absorción de 3,20%, mientras que el ripio reciclado mostró una densidad menor de $2,54 \text{ g/cm}^3$ y una mayor absorción de 3,57% respectivamente, lo cual es coherente con su origen y mayor porosidad.

Densidad aparente suelta y compactada.

En el caso del agregado grueso, según la Figura 7, el ripio natural presentó una densidad suelta de $1,45 \text{ kg/dm}^3$ y compacta de $1,51 \text{ kg/dm}^3$, mientras que el ripio reciclado registró valores ligeramente menores: $1,40 \text{ kg/dm}^3$ y $1,47 \text{ kg/dm}^3$ respectivamente, lo cual es coherente con su origen y mayor porosidad. Para los agregados finos, según la Figura

8, la arena mostró una densidad suelta de 1,54 kg/dm³ y compacta de 1,62 kg/dm³, mientras que el fino reciclado

(FCC) presentó los valores más bajos, con 0,93 kg/dm³ y 1,00 kg/dm³.

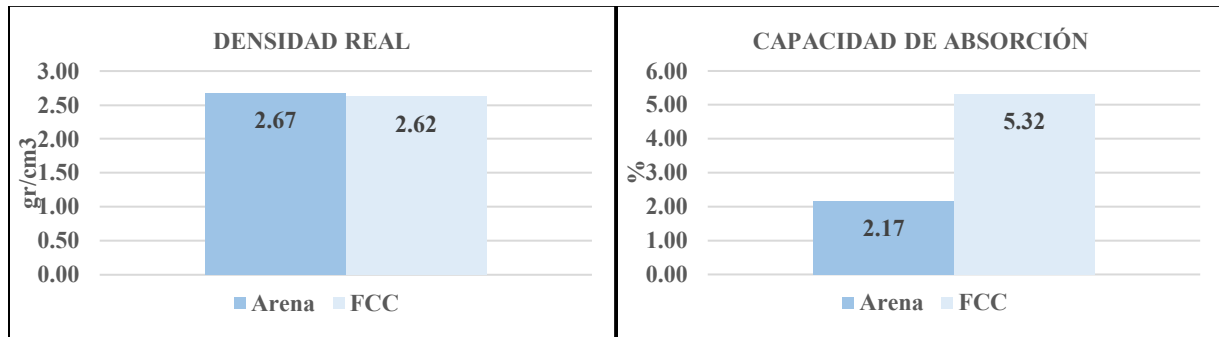


Figura 5: Comparación de la densidad real y capacidad de absorción de los agregados finos

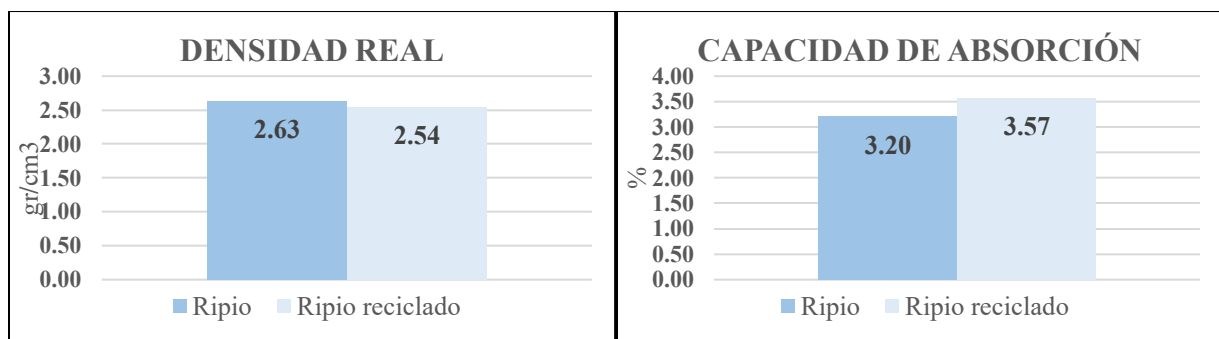


Figura 6: Comparación de la densidad real y capacidad de absorción de los agregados gruesos

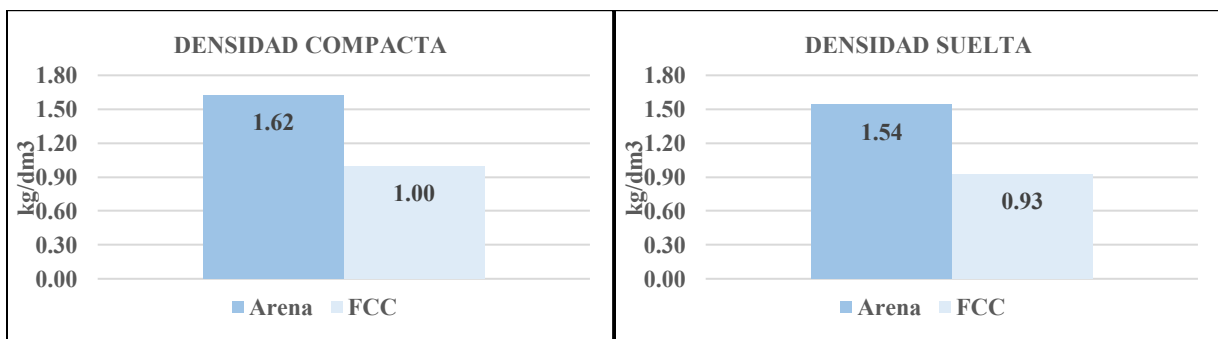


Figura 7: Comparación de la densidad real y capacidad de absorción de los agregados finos

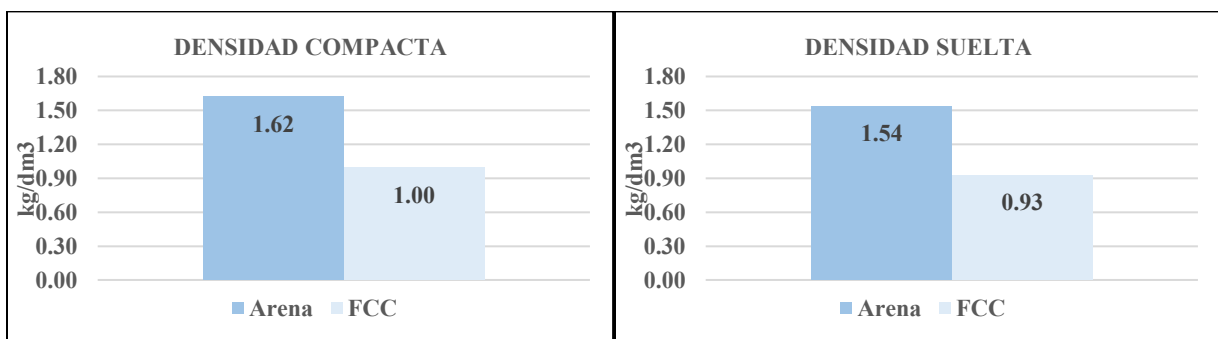


Figura 8: Comparación de la densidad real y capacidad de absorción de los agregados finos

Estos resultados indican que la arena es el agregado fino más denso, lo que favorece la compactación de la mezcla; por el contrario, la baja densidad del FCC podría incrementar la porosidad y requerir ajustes en la dosificación de agua para mantener la trabajabilidad y la relación agua/cemento.

Con base a la Figura 9, se observa que la densidad aparente de la mezcla de agregados gruesos y finos aumenta progresivamente conforme se incrementa el porcentaje de agregado fino en la mezcla, hasta alcanzar un punto máximo. A partir de una mezcla 100% de agregado grueso (sin fino), la densidad aparente es de 1,48 kg/dm³. A medida que se incorpora mayor proporción de agregado fino, esta densidad mejora significativamente, alcanzando un valor máximo de 2,04 kg/dm³ en la mezcla 50% grueso – 50% fino. Este comportamiento responde al principio de compactación óptima, donde las partículas más pequeñas (finos) rellenan los vacíos entre las partículas más grandes (gruesos), reduciendo el volumen total de vacíos y aumentando la masa por unidad de volumen. Sin embargo, al superar el 50% de agregado fino, la densidad comienza a disminuir ligeramente, evidenciando que un exceso de fino reduce la eficiencia del empaque por saturación del sistema. El valor máximo obtenido (2,04 kg/dm³) se encuentra muy cercano a la densidad óptima teórica reportada (2,03 kg/dm³), lo que confirma que la mezcla 50-50 logra la mejor compactación posible en este conjunto de datos.

En la Figura 10 se presenta la variación de la densidad aparente de una mezcla de agregados (grueso y fino) en función del porcentaje de fino añadido. Se observa una tendencia clara: a medida que se incrementa el porcentaje de agregado fino, la densidad aparente de la mezcla aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo, y luego comienza a decrecer levemente. La densidad aparente inicia en 1.43 Kg/dm³ para la mezcla 100% grueso y 0% fino, y alcanza su punto óptimo en 1.61 Kg/dm³ cuando la mezcla contiene un 50% de agregado fino, correspondiente a una cantidad de 13.33 kg de fino añadido.

Este comportamiento se explica porque los finos rellenan los vacíos entre las partículas del agregado grueso, reduciendo la porosidad y aumentando la compactación de la mezcla. Sin embargo, al superar esta proporción óptima, el exceso de fino comienza a desplazar al grueso, generando una matriz menos densa por una mayor proporción de partículas pequeñas con mayor área superficial y más espacios interparticulares. Esto se evidencia en la disminución de la densidad aparente a partir del 60% de fino. Por lo tanto, se concluye que la mezcla más eficiente en términos de densidad aparente se encuentra alrededor del 50% de agregado fino, coincidiendo con la "densidad óptima" indicada en la figura.

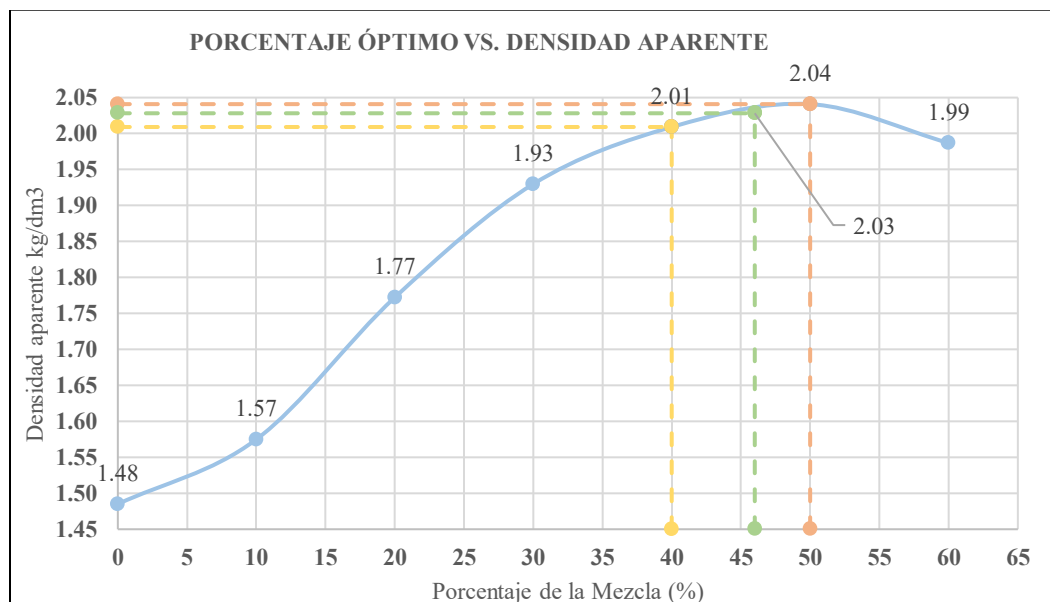


Figura 9: Comparación de la densidad real y capacidad de absorción de los agregados finos

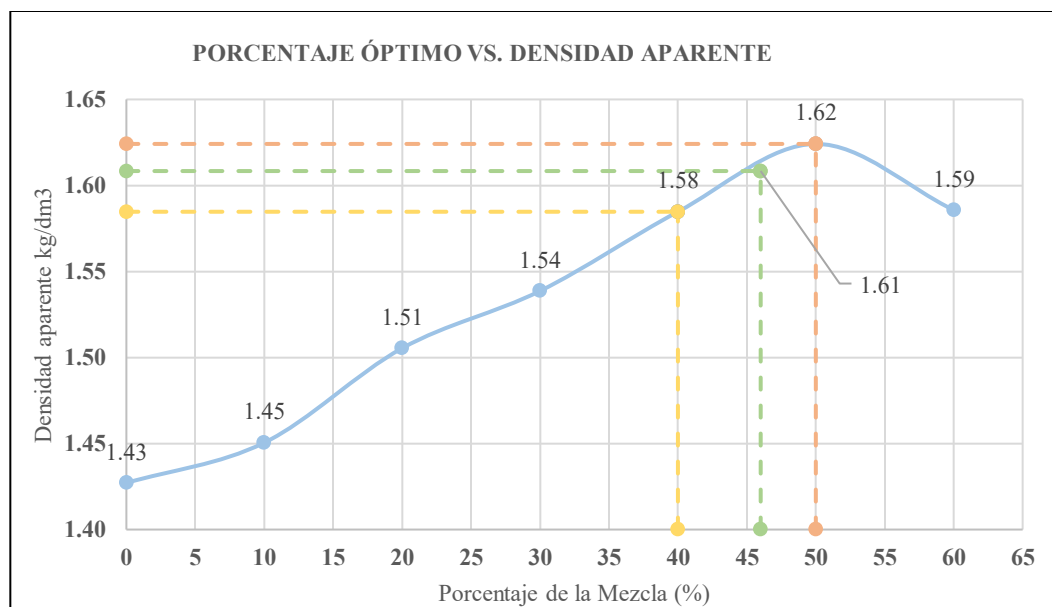


Figura 10: Comparación de la densidad real y capacidad de absorción de los agregados finos.

Resistencia al desgaste mediante el ensayo de abrasión Los Ángeles.

Los resultados del ensayo de abrasión, según la Tabla 3, revelan diferencias significativas en el comportamiento de los materiales evaluados. El ripio natural presentó una pérdida por abrasión del 23,0%, mientras que el ripio reciclado mostró una pérdida mayor, del 35,0%. Esta diferencia indica que el ripio natural posee una mayor

resistencia al desgaste superficial, lo cual se traduce en un mejor desempeño frente a condiciones de fricción o impactos mecánicos repetidos. En cambio, el mayor porcentaje de pérdida del ripio reciclado evidencia su menor durabilidad ante la abrasión, lo cual puede atribuirse a su naturaleza más porosa, la presencia de partículas con adherencias débiles de pasta de cemento vieja y la posible existencia de fisuras internas producto de su proceso de reciclaje.

Tabla 3: Ensayo de resistencia a la abrasión.

MUESTRA	MASA INICIAL (G)	MASA RETENIDA (G)	PÉRDIDA POR ABRASIÓN (%)
Ripio natural	5000	3850	23.0%
Ripio reciclado	5000	3450	35.0%

Determinación de la densidad real del cemento mediante picnómetro.

En el caso del cemento, según la Tabla 4 se determinó una densidad real de 3,00 g/cm³ mediante el método del picnómetro con gasolina. Para ello, se utilizó una masa de cemento de 64,00 g y se registró un desplazamiento de 21,35 cm³ de gasolina. Esta densidad indica que el cemento es un material compacto, con muy baja porosidad interna, lo cual es coherente con su naturaleza pulverulenta y su comportamiento en mezclas cementicias. Además, la baja densidad de la gasolina utilizada (0,74 g/cm³) permitió una medición precisa del volumen desplazado, asegurando la fiabilidad del valor obtenido.

Análisis por Fluorescencia de Rayos X del FCC

Según la Tabla 5, los elementos más abundantes en la muestra son el silicio (25,86%) y el aluminio (23,72%), los cuales indican que la estructura básica del material corresponde a una zeolita de tipo Y, comúnmente empleada como fase activa en catalizadores FCC. Esta matriz aluminosilicatada posee propiedades ácidas y una alta superficie específica, características que, aunque se degradan con el tiempo en el reactor, continúan presentes en el catalizador agotado.

Tabla 4: Ensayo densidad real del cemento

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
m1	Masa del picnómetro	gr	145,20
m2	Masa del picnómetro + Cemento	gr	209,20
m3	Masa del picnómetro + Cemento + Gasolina	gr	561,10
m4 = m3 - m2	Masa de la gasolina añadida	gr	351,90
m5	Masa del picnómetro + 500 cm3 de gasolina	gr	512,80
m6 = m5 - m1	Masa de 500 cm3 de gasolina	gr	367,60
DG = m6/500cm3	Densidad de la gasolina	gr/cm3	0,74
m7 = m6 - m4	Masa de la gasolina desalojada por el cemento	gr	15,70
Msss = m2 - m1	Masa del cemento	gr	64,00
Vsss = m7/DA	Volumen de gasolina desalojada	cm3	21,35
DRA = Msss/Vsss	Densidad real del cemento	gr/cm3	3,00

Tabla 5: Análisis por Fluorescencia de Rayos X del FCC

Elemento	Muestra 1
	Contenido (%)
Si	25,86
Al	23,72
La	2,46
Ti	0,62
Fe	0,60
Na	0,22
P	0,11
K	0,10
Mg	0,09
Y	0,06
S	0,06
Ca	0,05
V	0,04
Ni	0,02
Zn	0,01
Zr	0,01

Esta composición lo convierte en un candidato potencial para su reutilización en aplicaciones como material cementante suplementario (MCS) o en la fabricación de concretos ecoeficientes. El contenido significativo de lantano es coherente con la formulación de los catalizadores FCC, donde este elemento actúa como estabilizador de la estructura zeolítica, mejorando su resistencia térmica e hidrotermal. Su presencia confirma el origen catalítico del residuo y, aunque no participa directamente en reacciones cementicias, su cuantificación es importante para caracterizar el material completamente. Además, al ser un

metal de tierras raras, su presencia puede tener implicaciones en la valorización del residuo o en restricciones normativas ambientales. Se identificaron otros elementos en menores proporciones, pero que también resultan relevantes: Titanio (0,62%) y Hierro (0,60%): Comunes en catalizadores debido a la contaminación con metales presentes en las cargas de refinería. El hierro, en particular, puede influir en la coloración del cemento y en su comportamiento durante el curado. Sodio (0,22%), Potasio (0,10%) y Calcio (0,05%).

Estos elementos alcalinos y alcalinotérreos pueden afectar la durabilidad del concreto, especialmente por su posible participación en la reacción álcali-sílice (ASR) si no se controlan adecuadamente. Fósforo (0,11%) y Azufre (0,06%): Proviene de impurezas del petróleo o aditivos utilizados durante el ciclo de vida del catalizador. Estos elementos, si bien están en bajas concentraciones, podrían afectar la hidratación del cemento o generar compuestos secundarios en la matriz del concreto. Níquel, Zinc, Vanadio, Circonio y Ytrio, todos en concentraciones por debajo del 0,1%, se asocian generalmente con la acumulación de metales traza durante el proceso de craqueo. Aunque en pequeñas proporciones, algunos de estos metales pueden presentar riesgos ambientales si se lixivian, por lo que su presencia justifica evaluaciones toxicológicas y de lixiviación.

3.2. Ensayos mecánicos

Resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos en la Figura 11 muestran una evolución progresiva en la resistencia a compresión del hormigón elaborado con agregados naturales, alcanzando valores de 171,45 kg/cm² a los 7 días, 196,55 kg/cm² a los 14 días y 239,74 kg/cm² a los 28 días. Esta tendencia creciente es consistente con el comportamiento esperado del

hormigón, el cual continúa su proceso de hidratación del cemento con el tiempo, generando mayor desarrollo de la resistencia mecánica. Se observa un incremento del 14,64% entre los días 7 y 14, y un aumento más significativo del 22% entre los días 14 y 28, lo que indica que el mayor desarrollo de resistencia ocurre en la etapa final del periodo estándar de curado. Estos resultados confirman que el hormigón con agregados naturales presenta un buen desempeño mecánico y cumple con los parámetros típicos de evolución de resistencia, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones estructurales donde se requiere un desarrollo progresivo de la capacidad de carga.

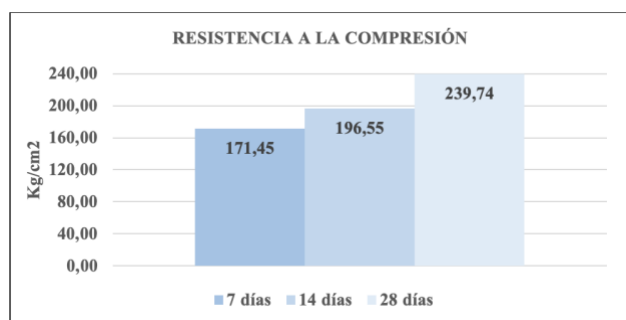


Figura 11: Comparación de la resistencia del hormigón con agregados naturales

En base a la Figura 12 el comportamiento del hormigón con agregados reciclados a lo largo del tiempo muestra un incremento progresivo en la resistencia a la compresión, alcanzando los 74,17 kg/cm² a los 28 días. A los 7 días, la resistencia fue de 37,75 kg/cm², aumentando a 47,47 kg/cm² a los 14 días, lo que representa un crecimiento del 25,7 %. Posteriormente, entre los 14 y 28 días, la resistencia incrementó un 56,3 %, evidenciando una ganancia significativa en la etapa final de curado. Este patrón de desarrollo de resistencia es característico del hormigón, aunque en este caso, los valores obtenidos son relativamente bajos si se comparan con los hormigones convencionales. Esto puede atribuirse a la naturaleza de los agregados reciclados, que suelen presentar mayor porosidad y menor adherencia con la pasta de cemento, afectando la resistencia global del material. Sin embargo, el notable aumento entre los 14 y 28 días sugiere que, con un diseño adecuado de mezcla y un proceso de curado controlado, el uso de agregados reciclados puede ser una alternativa viable en aplicaciones no estructurales o de baja exigencia mecánica.

Módulo de Elasticidad

Según la Figura 13, los valores obtenidos para el módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales muestran un incremento progresivo conforme avanza el tiempo de curado, lo cual es coherente con el desarrollo de la microestructura del material.

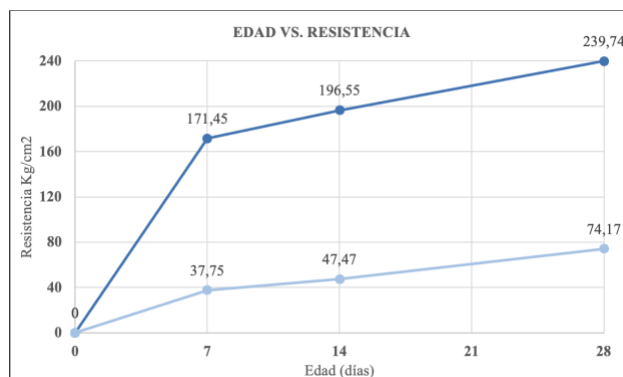


Figura 12: Comparación de la Edad vs. Resistencia del hormigón con agregados naturales y reciclados

A los 7 días, el módulo alcanza 19.273,68 kg/cm², aumentando a 20.636,51 kg/cm² a los 14 días, y llegando a 22.793,12 kg/cm² a los 28 días. Este comportamiento refleja una mejora gradual en la rigidez del hormigón, atribuida principalmente al avance del proceso de hidratación del cemento y a la consolidación de la matriz cementicia. El aumento del módulo de elasticidad con el tiempo es un indicador favorable para aplicaciones estructurales, ya que implica una mayor capacidad del material para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas. La diferencia entre los valores de 7 y 28 días representa un crecimiento aproximado del 18,2 %, lo cual es consistente con lo esperado para hormigones bien formulados y curados en condiciones controladas.

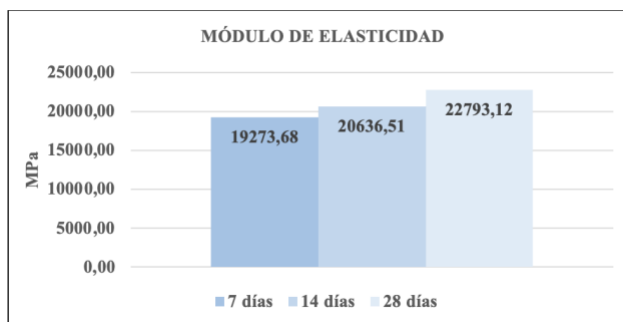


Figura 13: Comparación del módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales

Según la Figura 14, los valores obtenidos para el módulo de elasticidad del hormigón elaborado con agregados reciclados muestran un comportamiento creciente en función del tiempo de curado, aunque significativamente por debajo de los valores alcanzados por el hormigón con agregados naturales. A los 7 días, el módulo es de 9.043,52 kg/cm², incrementándose a 10.139,49 kg/cm² a los 14 días y alcanzando 12.675,29 kg/cm² a los 28 días. Esta evolución representa un aumento total aproximado del 40 % entre los días 7 y 28, lo que indica que, aunque el desarrollo de rigidez es constante, parte desde una base considerablemente más

baja. Esta diferencia se explica por las propiedades físicas de los agregados reciclados, que generalmente presentan mayor porosidad, menor resistencia intrínseca y peor adherencia con la pasta de cemento, lo que reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos internos (Ver Figura 15).

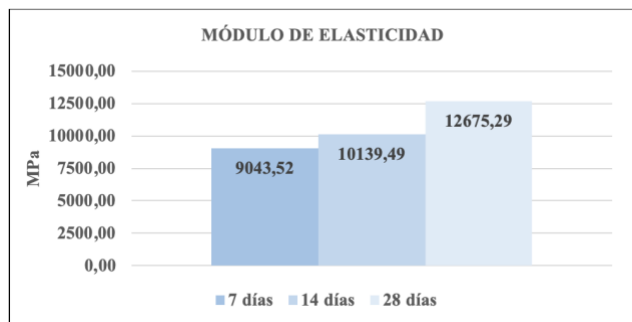


Figura 14: Comparación del módulo de elasticidad del hormigón con agregados reciclados

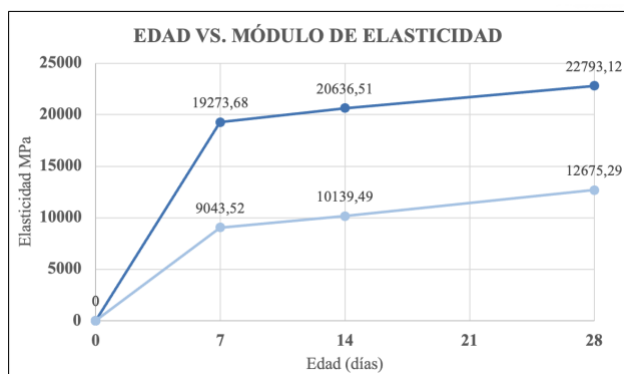


Figura 15: Comparación de la Edad vs. Módulo de elasticidad del hormigón con agregados naturales y reciclados

Análisis económico

El análisis económico realizado en este estudio tiene un carácter comparativo y exploratorio, y su objetivo es evaluar el impacto económico directo de la sustitución total de agregados naturales por agregado grueso reciclado (AGR) y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) en la producción de hormigón simple. El análisis se limita a la estimación del costo directo por metro cúbico de hormigón, sin considerar costos indirectos asociados al ciclo de vida del material, externalidades ambientales, ni beneficios económicos derivados de la valorización de residuos a largo plazo.

Los costos unitarios de los materiales convencionales y reciclados se obtuvieron mediante proformas de proveedores locales de cemento, agregados naturales, agregados reciclados y FCC. Los costos de transporte se estimaron en función de las distancias reales entre los puntos de suministro y el lugar de producción del hormigón,

considerando tarifas promedio por kilómetro. Los costos de mano de obra y equipos se basaron en valores de referencia utilizados en presupuestos de obra a nivel local.

Para la estimación de costos se adoptaron los siguientes supuestos:

- La dosificación del hormigón corresponde a la utilizada en el programa experimental, manteniendo constante el volumen de producción (1 m³).
- Los precios unitarios de los materiales se obtuvieron a partir de proformas comerciales de proveedores locales, vigentes al momento del estudio.
- Se consideraron costos de materiales, mano de obra, equipos y transporte para el escenario de ejecución real en obra.
- No se incluyeron costos asociados a aditivos, optimización logística, economías de escala ni incentivos institucionales o normativos (Ver Tabla 6 y Tabla 7)

A pesar de que el Rubro #2, correspondiente al hormigón elaborado con agregados reciclados y catalizador FCC, muestra un costo unitario más elevado que el Rubro #1 (291,77 USD/m³ frente a 100,90 USD/m³ en el escenario real), su implementación puede representar un paso importante hacia un modelo de economía circular en la construcción. Este enfoque considera no solo el costo monetario inmediato, sino también el impacto ambiental y la optimización de recursos a lo largo del ciclo de vida de los materiales. El uso de ripio reciclado como agregado grueso proviene de residuos de hormigón triturado, lo que permite valorizar un material que, de otra forma, sería desechado en vertederos o espacios no controlados. Esta práctica reduce significativamente la extracción de áridos naturales, que requiere un alto consumo energético y afecta ecosistemas fluviales y montañosos. Por otra parte, el FCC (polvo del proceso de craqueo catalítico fluidizado), un residuo industrial generado en refinerías de petróleo se reutiliza como reemplazo del agregado fino natural. Al incorporar este subproducto en mezclas de hormigón, se evita su acumulación como desecho peligroso, contribuyendo a la reducción de emisiones y pasivos ambientales asociados al sector petrolero.

Si bien los costos iniciales son mayores, en parte debido a la logística de recolección y transporte de los materiales reciclados, esta alternativa representa un avance hacia sistemas constructivos más sostenibles. Con el desarrollo de cadenas de suministro locales y el apoyo de políticas públicas que fomenten la economía circular, los costos pueden reducirse progresivamente, haciendo viable su adopción a gran escala.

Tabla 6: Rubro #1 – Hormigón Simple Costo Real

RUBRO: 1		UNIDAD: m3			
DETALLE:		Hormigón estructural de cemento Portland (Agregados comunes / f'c = 240 Kg/cm2)			
EQUIPO	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
DESCRIPCION	A	B	C=AxB	R	D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.	5%MO				0,007
Concretera (8HP)	1,00	5,00	5,00	0,03273	0,164
SUBTOTAL M					0,171
MANO DE OBRA	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
DESCRIPCION	A	B	C=AxB	R	D=CxR
Peón EO E2	1,00	4,23	4,23	0,03273	0,138
SUBTOTAL N					0,138
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO	
DESCRIPCION		A	B	C=AxB	
Cemento	kg	312,52000	0,15	46,878	
Arena lavada	m3	0,88500	11,00	9,735	
Ripio triturado	m3	1,02300	15,00	15,345	
Agua	m3	0,17500	1,20	0,210	
SUBTOTAL O					72,168
TRANSPORTE	KM	TARIFA/KM	CONSUMO	COSTO	
DESCRIPCION		A	B	C=AxB	
Cemento	2	0,00026	312,52	0,162	
Arena lavada	25	0,24000	0,89	5,310	
Ripio triturado	25	0,24000	1,02	6,138	
SUBTOTAL P					11,610
TOTAL, COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					84,087
INDIRECTOS (%)				20,00%	16,817
UTILIDAD (%)				0,00%	0,000
COSTO TOTAL DEL RUBRO					100,90
VALOR UNITARIO					100,90

4. Conclusiones

La sustitución total de los agregados naturales por agregado grueso reciclado (AGR) y catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado (FCC) produce una reducción significativa del desempeño mecánico del hormigón. En particular, la resistencia a compresión del hormigón reciclado alcanzó valores del orden de 74 kg/cm² a los 28 días, lo que representa una disminución aproximada del 70 % respecto al hormigón convencional (239,74 kg/cm²). Esta reducción se asocia principalmente a la mayor porosidad y absorción del AGR, así como a las características granulométricas y de finura del FCC, que afectan la relación agua/cemento efectivo y la calidad de la zona de transición interfacial.

Desde el punto de vista estructural, los valores de resistencia y módulo de elasticidad obtenidos (12.675,29 kg/cm² a 28

días) no cumplen con los requisitos mínimos para aplicaciones estructurales, por lo que el uso del hormigón con sustitución total de AGR y FCC debe restringirse a aplicaciones no estructurales o de baja exigencia mecánica, tales como aceras, bordillos, soleras, rellenos, elementos prefabricados no portantes y capas de regularización, donde las demandas resistentes son compatibles con los valores medidos experimentalmente.

El análisis económico evidenció que, en condiciones reales de ejecución, el costo del hormigón con agregados reciclados (291,77 USD/m³) es significativamente superior al del hormigón convencional (100,90 USD/m³), siendo el transporte del FCC el principal factor de incremento, con una participación superior al 50 % del costo total. Estos resultados indican que, bajo las condiciones logísticas evaluadas, la sustitución total de agregados naturales no resulta económicamente competitiva.

Tabla 7: Rubro #2 – Hormigón Simple Costo Real

RUBRO:	2			UNIDAD: m3	
DETALLE:	Hormigón estructural de cemento Portland (Agregados reciclados / f'c = 240 Kg/cm2)				
EQUIPO	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
DESCRIPCION	A	B	C=AxB	R	D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.	5%MO				0,007
Concretera (8HP)	1,00	5,00	5,00	0,03273	0,164
SUBTOTAL M					0,171
MANO DE OBRA	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
DESCRIPCION	A	B	C=AxB	R	D=CxR
Peón EO E2	1,00	4,23	4,23	0,03273	0,138
SUBTOTAL N					0,138
MATERIALES	UNIDAD		CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO
DESCRIPCION			A	B	C=AxB
Cemento	kg		467,58099	0,15	70,137
FCC	m3		0,70178	0,90	0,632
Ripio reciclado triturado	m3		0,79867	17,00	13,577
Agua	m3		0,26185	1,20	0,314
SUBTOTAL O					84,660
TRANSPORTE	KM		TARIFA/KM	CONSUMO	COSTO
DESCRIPCION			A	B	C=AxB
Cemento	2		0,00026	467,58	0,243
FCC	924		0,24000	0,70	155,627
Ripio reciclado triturado	12		0,24000	0,80	2,300
SUBTOTAL P					158,170
			TOTAL, COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		243,139
			INDIRECTOS (%)	20,00%	48,628
			UTILIDAD (%)	0,00%	0,000
			COSTO TOTAL DEL RUBRO		291,77
			VALOR UNITARIO		291,77

No obstante, el análisis también muestra que la viabilidad económica del material es altamente sensible a la distancia de transporte y a la disponibilidad local de los residuos, lo que abre oportunidades de aplicación en contextos con cadenas de suministro cercanas o con incentivos al reciclaje. Los resultados obtenidos corresponden a un escenario límite de sustitución total, lo que permite identificar de manera clara las restricciones técnicas y económicas del uso simultáneo de AGR y FCC. En este sentido, se reconoce que el alcance del estudio se limita a la evaluación de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, así como a condiciones específicas de obtención y procesamiento de los materiales reciclados, lo cual restringe la extrapolación directa de los resultados a otros contextos. Finalmente, se concluye que el hormigón con sustitución total de AGR y FCC puede contribuir a la sostenibilidad del sector de la construcción cuando se emplea de forma

técnicamente justificada, en aplicaciones no estructurales y en entornos donde la logística y el contexto económico favorezcan la valorización de residuos. Se recomienda que futuras investigaciones se orienten a sustituciones parciales optimizadas, al uso de aditivos o tratamientos de mejora del AGR, y a la evaluación del desempeño del material en sistemas prefabricados o aplicaciones específicas de bajo impacto ambiental.

Referencias

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 1573: Hormigón. Determinación de la resistencia a la compresión. INEN.

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 856: Agregados finos. Determinación de la densidad relativa y absorción. INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 858-1: Agregados. Determinación de la masa unitaria. INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 861: Agregados gruesos. Requisitos. INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 862: Agregados finos. Requisitos. INEN.
- American Concrete Institute. (2019). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI.
- Abed, M., Nemes, R., & Tayeh, B. A. (2020). Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 32(2), 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.12.002>
- Carrera, H., & Medina, J. (2019). Evaluación y caracterización del catalizador del proceso de craqueo catalítico fluidizado (FCC). *Revista Procesos y Energía*, 1(1).
- Muñoz Pérez, S. P., Díaz Sánchez, D. M., Gamarra Capuñay, E. E., & Chaname Bustamante, J. A. (2021). La influencia de los RCD en reemplazo de los agregados para la elaboración de concreto: Una revisión de la literatura. *Ecuadorian Science Journal*, 5(2), 107–120. <https://doi.org/10.46480/esj.5.2.111>
- Silva Urrego, Y. F., Arcila Castro, A., & Delvasto, S. (2022). Efecto de tratamientos en agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de concretos autocompactantes. *Revista EIA*, 19(38). <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1547>
- Zúñiga, N. C., & Picado, D. R. (2022). Evaluación de muestras del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos. *Métodos y Materiales*, 12, 1–11. <https://doi.org/10.15517/MYM.V12I0.48029>

Contribución de los autores (CRediT)

Peñañiel Valla, L.: Investigación, Metodología, Curación de datos, Validación, Apoyo en ensayos experimentales.

Navarro Peñañiel, C.: Conceptualización, Metodología, Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Recursos materiales, Supervisión, Validación, Visualización.

Medina Robalino, W.: Investigación, Metodología, Análisis de datos, Apoyo en laboratorio, Validación.

Abril Gavilanes, B.: Investigación, Metodología, Apoyo en ensayos experimentales, Validación de resultados.

Espinoza Castro, M.: Curación de contenidos y datos, Análisis formal de datos, Investigación, Metodología, Software, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento

Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE) de la Universidad Técnica de Ambato bajo la resolución del Proyecto Nro. UTA-CONIN-2024-0129-R: PFICM32 “PROPIEDADES MECÁNICO-FÍSICAS DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL FABRICADO CON MATERIALES RECICLADOS DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA Y DEMOLICIONES”, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen sinceramente el apoyo de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Técnica de Ambato, por el financiamiento de esta investigación, mediante el proyecto de investigación PFICM32 “PROPIEDADES MECÁNICO-FÍSICAS DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL FABRICADO CON MATERIALES RECICLADOS DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA Y DEMOLICIONES”. Asimismo, expresan su agradecimiento a la Facultad de Ingenierías, Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Indoamérica, por el apoyo académico brindado, y a la Dirección de Ambiente, Unidad de Control Ambiental Minero, del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato, por la colaboración técnica y logística durante la ejecución del proyecto. Los autores también reconocen el aporte institucional de la Faculty of Civil and Mechanical Engineering y la Research and Development Directorate de la Universidad Técnica de Ambato (Ambato 180207), por el soporte brindado al desarrollo de la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA

El manuscrito no incluye una declaración específica respecto al uso de herramientas de inteligencia artificial durante su proceso de redacción. La autoría, así como la

responsabilidad total del contenido, recaen exclusivamente en los autores.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2026.



Esta obra está bajo una licencia:
Internacional Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual
.4.0

Revista Científica *FINIBUS* - ISSN: 2737-6451.