

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Uso de materiales reciclados como reemplazo parcial del agregado fino en el concreto

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Ciencias de la Tierra

Presentado por:

Valeria Doménica Franco Quiñonez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y aliento durante todo este proceso. A mis amigos, por su compañía, motivación y por brindarme momentos de alegría que hicieron más llevadero este camino. Extiendo también mi gratitud a mis docentes, quienes, con su guía, conocimientos y dedicación, contribuyeron significativamente a mi formación académica y personal, haciéndome crecer tanto en lo profesional como en lo personal.

Finalmente, agradezco el apoyo de las herramientas de inteligencia artificial, que facilitaron la organización, y revisión de diversos apartados de esta tesis.

Declaración Expresa

Yo Valeria Franco acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 11 de Septiembre del 2025.

Valeria Franco Quiñonez

Evaluadores

MSc. Carlos Paul Quishpe Otacoma

Evaluador

Ph.D Natividad García Troncoso

Tutor de proyecto

Resumen

El desarrollo de la industria de la construcción implica un alto consumo de recursos naturales y una considerable generación de residuos. Con el fin de buscar alternativas más sostenibles, esta investigación evalúa el comportamiento del hormigón al sustituir parcialmente el agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz (CCA), polietileno tereftalato (PET) y caucho triturado de neumáticos, en proporciones del 2.5 %, 5 % y 10 %. Se elaboraron mezclas según normas ASTM, evaluando propiedades mecánicas y físicas (resistencia a compresión, tracción, módulo de elasticidad, contenido de aire, densidad y trabajabilidad), complementadas con análisis microestructural (SEM) y termogravimétrico (TGA).

Los resultados mostraron que la incorporación de estos materiales afectó las propiedades mecánicas; sin embargo, la ceniza de cascarilla de arroz presentó la menor afectación en la resistencia a compresión y tracción debido a su naturaleza puzolánica; el PET mostró menor afectación en las resistencias iniciales, mientras que el caucho tuvo una menor pérdida en el módulo de elasticidad en comparación con los otros materiales. El análisis TGA reveló comportamientos térmicos no lineales con el aumento del porcentaje de sustitución. Se concluye que sustituciones de hasta 5 % permiten un equilibrio entre sostenibilidad y desempeño estructural.

Palabras Clave: agregado fino, caucho triturado, cenizas de cascarilla de arroz, PET, propiedades mecánicas.

Abstract

The development of the construction industry involves high consumption of natural resources and considerable waste generation. In search of more sustainable alternatives, this research evaluates the performance of concrete when partially replacing fine aggregate with rice husk ash (RHA), polyethylene terephthalate (PET), and shredded waste tire rubber at substitution levels of 2.5%, 5%, and 10%.

Mixtures were prepared following ASTM standards, evaluating mechanical and physical properties (compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, air content, density, and workability), complemented by microstructural (SEM) and thermogravimetric (TGA) analyses.

The results showed that the incorporation of these materials affected the mechanical properties; however, rice husk ash presented the least impact on compressive and tensile strength due to its pozzolanic nature; PET showed less impact on early-age strengths, while rubber exhibited a lower loss in modulus of elasticity compared to the other materials. TGA analysis revealed non-linear thermal behavior with increasing substitution percentages. It is concluded that substitutions of up to 5% provide a balance between sustainability and structural performance.

Keywords: fine aggregate, shredded rubber, rice husk ash, PET, mechanical properties.

Índice general

Evaluadores	4
Resumen.....	5
<i>Abstract</i>	6
Índice general.....	7
Abreviaturas.....	9
Simbología.....	10
Índice de figuras	11
Índice de tablas.....	11
Capítulo 1	12
1. Introducción	13
1.1 Descripción del Problema	14
1.2 Justificación del Problema.....	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general.....	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 Marco teórico	15
1.4.1 Gestión de residuos sólidos a nivel global.....	15
1.4.2 Estadísticas globales y específicas de Ecuador	16
1.4.3 Materiales reciclados aplicados al concreto	16
1.4.4 Técnicas de caracterización utilizadas	18
1.4.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	25
1.4.6 Análisis Termogravimétrico (TGA).....	25
1.4.7 Métodos estadísticos aplicados al análisis del comportamiento del hormigón (ANOVA)	26
Capítulo 2	27
2. Metodología.....	28
2.1 Materiales	29
2.1.1 Árido grueso y fino	30

2.1.2	Residuos de neumáticos	31
2.1.3	Plástico PET	31
2.1.4	Ceniza de cascarilla de arroz	32
2.2	Diseño de la mezcla	32
2.3	Procedimiento de prueba	33
2.4	Análisis Estadístico	34
Capítulo 3		35
3.	Resultados y análisis	36
3.1	Propiedades del concreto en estado fresco.....	36
3.1.1	Revenimiento	36
3.1.2	Contenido de aire.....	36
3.1.3	Densidad.....	37
3.2	Propiedades del concreto en estado endurecido.....	38
3.2.1	Resistencia a la compresión.....	38
3.2.2	Resistencia a la tracción	40
3.2.3	Módulo de elasticidad.....	41
3.3	Análisis estadístico.....	42
3.4	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	43
3.5	Análisis Termogravimétrico	45
Capítulo 4		48
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	49
4.1	Conclusiones.....	49
4.2	Recomendaciones	51
Referencias		53

Abreviaturas

ANOVA	Análisis de Varianza
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCA	Cenizas de cascarilla de arroz
CT	Caucho Triturado
GADM	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
PET	Tereftalato de polietileno
RSU	Residuos sólidos urbanos
SEM	Scanning Electron Microscopy
SNIM	Sistema Nacional de Información Municipal
TGA	Análisis Termogravimétrico
ZTI	Zona de transición interfacial

Simbología

C°	Centígrados
Cm	Centímetros
GPa	Gigapascal
Kg	Kilogramos
MPa	MegaPascales

Índice de figuras

Figura 1.1.....	19
Figura 1.2.....	19
Figura 1.3.....	21
Figura 1.4.....	22
Figura 1.5.....	23
Figura 1.6.....	25
Figura 2.1.....	29
Figura 2.3.....	30
Figura 2.4.....	31
Figura 2.5.....	32
Figura 3.1.....	36
Figura 3.2.....	37
Figura 3.3.....	38
Figura 3.4.....	39
Figura 3.5.....	41
Figura 3.6.....	42
Figura 3.7.....	44
Figura 3.8.....	47

Índice de tablas

Tabla 2.1.....	29
Tabla 2.2.....	30
Tabla 2.3.....	33
Tabla 2.4.....	34

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituye uno de los principales retos ambientales a nivel mundial, al generar riesgos como contaminación del suelo y agua, proliferación de vectores y emisiones de gases de efecto invernadero. En 2023 se produjeron aproximadamente 2.300 millones de toneladas de RSU, cifra que podría llegar a 3.800 millones en 2050 (United Nations Environment Programme, 2024). La quema abierta de residuos, aún frecuente en diversas regiones, contribuye directamente al calentamiento global y plantea problemas sociales, legales y económicos (Khan et al., 2022). En este contexto, el reciclaje se presenta como una alternativa efectiva, al reducir la demanda de recursos vírgenes, el consumo energético y fomentar la economía circular mediante la valorización de materiales como plásticos, vidrio, metales y residuos agrícolas (Farzadkia et al., 2021); (Aziz et al., 2023).

La industria de la construcción, una de las más intensivas en consumo de recursos, está directamente vinculada a esta problemática. La extracción de arena, componente esencial del concreto, genera impactos como erosión, alteración de cauces y pérdida de biodiversidad (S.K. et al., 2020). Frente a ello, la sustitución parcial del agregado fino por materiales reciclados surge como una estrategia técnica y ambientalmente viable (Zega et al., 2017).

Diversos estudios han mostrado que la adición de residuos reciclados puede mantener o mejorar propiedades del concreto. El vidrio molido ha evidenciado incrementos en resistencia a compresión y tracción (Amin et al., 2023), el PET aporta ductilidad (Qaidi et al., 2023), el caucho reciclado en bajas proporciones reduce la densidad del concreto y mejora su desempeño ante cargas sísmicas (Miah et al., 2023), y la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), rica en sílice amorfa, mejora la matriz cementante y la durabilidad (Stratoura et al., 2023); (Nursyamsi & Febrizal Aruan, 2021). No obstante, se han identificado limitaciones. El uso de polietileno de baja densidad (LDPE) o caucho en altas proporciones disminuye la resistencia a compresión (Vivek et al., 2023), mientras que el aumento de porosidad generado por ciertos agregados reciclados afecta la durabilidad (J. Huang et al., 2021). Estas desventajas se asocian principalmente a la calidad del material reciclado y a la alteración de la zona de transición interfacial (ZTI) (Y. Wang et al., 2020).

En Ecuador, donde la gestión de residuos sólidos representa un desafío crítico, el aprovechamiento de materiales como PET, caucho triturado y ceniza de cascarilla de arroz constituye una alternativa sostenible y localmente disponible. Por ello, el objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño del concreto con sustituciones parciales del agregado

fino en proporciones del 2.5 %, 5 % y 10 %, alineándose con los principios de economía circular y desarrollo sostenible.”

1.1 Descripción del Problema

Una de las principales problemáticas ambientales actuales es la inadecuada gestión de residuos sólidos, que genera impactos negativos como la contaminación del suelo y del agua, emisiones de gases de efecto invernadero y afectaciones a la salud pública. Paralelamente, la industria de la construcción demanda grandes cantidades de recursos naturales, como la arena, cuya extracción indiscriminada provoca daños severos a los ecosistemas fluviales. Ante esta realidad, surge la necesidad de identificar alternativas sostenibles que permitan reducir el consumo de agregados vírgenes y, al mismo tiempo, valorizar residuos como el PET, caucho triturado de neumáticos y ceniza de cascarilla de arroz, los cuales están ampliamente disponibles en Ecuador debido a su alta generación y escasa reutilización. Aunque existen estudios que señalan beneficios en el uso de estos materiales reciclados en el hormigón, también se han evidenciado limitaciones relacionadas con la resistencia mecánica y la porosidad, lo que justifica la necesidad de profundizar su análisis técnico. Este problema es actual, relevante y susceptible de ser abordado mediante metodologías experimentales que permitan evaluar con precisión su comportamiento en mezclas de concreto, tanto a nivel físico-mecánico como microestructural.

1.2 Justificación del Problema

Resolver este problema resulta fundamental tanto desde la perspectiva ambiental como técnica. Por un lado, se contribuye a mitigar los efectos de la acumulación de residuos sólidos urbanos e industriales en el país, promoviendo su valorización dentro del sector de la construcción. Por otro, se plantea una solución viable frente al alto consumo de arena natural, un recurso cuya explotación indiscriminada está afectando cuerpos de agua y ecosistemas locales. La incorporación de residuos reciclados en el hormigón no solo permite reducir el impacto ambiental de la construcción, sino que además abre la posibilidad de desarrollar nuevos materiales con propiedades adecuadas para aplicaciones estructurales y no estructurales. Finalmente, este proyecto se alinea con los principios de economía circular y desarrollo sostenible, contribuyendo directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), ODS 12 (producción y consumo responsables) y, de forma indirecta, al ODS 13 (acción por el clima), al fomentar prácticas constructivas más eficientes y ambientalmente responsables.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento físico, mecánico y microestructural del hormigón cuando el agregado fino es sustituido parcialmente por materiales reciclados como ceniza de cascarilla de arroz (CCA), plástico PET y caucho triturado, en diferentes proporciones (2.5%, 5% y 10%), con el fin de determinar su viabilidad técnica como alternativa sostenible en la industria de la construcción.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar mezclas de hormigón con sustitución parcial del agregado fino por CCA, PET y caucho reciclado en proporciones del 2.5%, 5% y 10%.
2. Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón modificado mediante ensayos de resistencia a la compresión, densidad, trabajabilidad, contenido de aire, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción, conforme a normas ASTM.
3. Analizar la microestructura del concreto mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la interacción entre los materiales reciclados y la matriz cementante.
4. Evaluar el comportamiento térmico de los materiales reciclados dentro de la matriz cementicia mediante análisis termogravimétrico (TGA).
5. Aplicar análisis estadístico (ANOVA unidireccional) para determinar si existen diferencias significativas en las propiedades mecánicas del hormigón en función del tipo y porcentaje de sustitución.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Gestión de residuos sólidos a nivel global

Las actividades humanas generan residuos sólidos urbanos (RSU) como consecuencia del uso ineficiente de la energía y los recursos naturales. Muchos de estos residuos no pueden ser reutilizados de manera directa en beneficio de la sociedad, ya que algunos representan riesgos para la salud humana. Los RSU comprenden una amplia variedad de materiales, entre ellos residuos orgánicos (como restos de alimentos, hojas, césped, maleza, madera y papel de procesos), residuos de papel (como cartón, periódicos, revistas, bolsas, cajas, papel de regalo y vasos de papel), residuos plásticos (botellas, envases, bolsas, tapas, entre otros), residuos de vidrio (botellas, fragmentos rotos, bombillas, vidrios de color), residuos metálicos (latas, papel de aluminio, aerosoles no peligrosos, estructuras metálicas, bicicletas) y otros residuos diversos como textiles, cuero, caucho, aparatos electrónicos, cenizas y materiales inertes. Estos residuos también pueden clasificarse en categorías según su destino o peligrosidad: reciclables (papel, vidrio, plástico, metales), materia orgánica compostable (como frutas y restos de comida),

sustancias tóxicas (pinturas, pesticidas, medicamentos, pilas usadas) y residuos peligrosos (como jeringas, algodón contaminado, toallas sanitarias, etc.). Cuando no se gestionan adecuadamente, los residuos sólidos pueden contaminar los océanos, obstruir sistemas de alcantarillado, transmitir enfermedades, agravar afecciones respiratorias, afectar la fauna y obstaculizar el desarrollo económico. A medida que los países avanzan en su nivel de ingresos, desde economías de bajos a medianos y altos ingresos, la gestión de residuos suele volverse más compleja. Sin embargo, el rápido crecimiento urbano y el aumento poblacional dificultan aún más las tareas de recolección, tratamiento y disposición final de estos desechos. (Sharma & Jain, 2020)

1.4.2 Estadísticas globales y específicas de Ecuador

A nivel mundial, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) continúa en aumento debido al crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y los patrones de consumo, lo que representa un desafío ambiental, económico y social, especialmente en países en desarrollo con limitada infraestructura para su gestión. En Ecuador, el Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM), impulsado por el INEC y la AME, constituye una herramienta para monitorear el desempeño de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) en esta materia (INEC, 2023).

De acuerdo con el Registro de Gestión de Residuos Sólidos 2022, cada habitante urbano genera en promedio 0,9 kg de residuos sólidos al día, lo que equivale a unas 14.394 toneladas recolectadas diariamente. De este total, el 83,4 % corresponde a recolección no diferenciada, mientras que solo el 16,6 % es recolectado de forma diferenciada, lo que limita las posibilidades de reciclaje. En cuanto a la composición, un 54,9 % corresponde a residuos orgánicos y el 45,1 % a inorgánicos, destacando plástico (11,3 %), cartón (5,2 %), papel (4,3 %), además de vidrio, caucho, metales y textiles. Estos datos muestran un importante potencial de valorización de residuos como PET, caucho de neumáticos y cenizas de cascarilla de arroz (INEC, 2023).

Sin embargo, solo el 34,5 % de los municipios han implementado procesos de separación en la fuente, y respecto a la disposición final, el 54,5 % utiliza rellenos sanitarios, el 28,2 % celdas emergentes y el 17,3 % botaderos, prácticas que pueden generar impactos ambientales. En este contexto, la incorporación de residuos reciclables en la elaboración de concreto se alinea con el Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025, que busca elevar la recuperación de residuos al 20 %, y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 y 12 (Arguello et al., 2023).

1.4.3 Materiales reciclados aplicados al concreto

El uso de agregados finos reciclados en la fabricación de concreto ha cobrado relevancia como respuesta a la creciente escasez de recursos naturales como la arena y la grava, ampliamente

utilizados en la industria de la construcción. Su incorporación contribuye a la sostenibilidad del sector al darle una nueva utilidad a materiales que antes se consideraban desechos, reduciendo así la necesidad de extraer recursos naturales y disminuyendo el impacto ambiental de la construcción. A pesar de que su uso presenta desafíos técnicos, diversas investigaciones han demostrado que, con un adecuado tratamiento y dosificación, los agregados finos reciclados pueden formar parte de mezclas estables, durables y con menor impacto en las emisiones de carbono (A. Singh et al., 2023).

1.4.3.1 PET reciclado (Polietileno Tereftalato)

La inclusión de residuos de plástico tipo PET en el concreto ha mostrado efectos positivos en ciertas propiedades físicas y mecánicas. Estudios reportan una mejora en el comportamiento plástico y la ductilidad del concreto con PET, lo cual resulta útil en aplicaciones que requieren mayor deformabilidad (Qaidi et al., 2023). Además, la densidad del concreto disminuye con la incorporación de PET, lo que puede contribuir a la reducción del peso propio en elementos no estructurales. Sin embargo, otros estudios advierten que el PET puede generar pérdidas de resistencia a la compresión, especialmente cuando se utiliza en proporciones elevadas o sin un tratamiento adecuado que mejore su adherencia a la matriz cementante (Kangavar et al., 2022).

1.4.3.2 Caucho reciclado de neumáticos fuera de uso

El caucho triturado proveniente de neumáticos reciclados ha sido investigado como sustituto parcial del agregado fino, debido a su baja densidad y capacidad para absorber energía. En mezclas con bajos porcentajes de sustitución, el caucho no afecta significativamente las propiedades mecánicas del concreto (Garcia-Troncoso et al., 2023), y su incorporación puede incluso contribuir a la reducción de cargas sísmicas en estructuras livianas (Miah et al., 2023). No obstante, estudios como el de Bakhtiari Ghaleh et al. (2022) señalan que su uso puede debilitar la zona de transición interfacial (ITZ), afectando negativamente la resistencia y aumentando la porosidad si no se aplican técnicas para mejorar su adherencia al mortero.

1.4.3.3 Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

La ceniza de cascarilla de arroz es un residuo agroindustrial altamente disponible en países agrícolas, con un elevado contenido de sílice amorfa que le otorga características puzolánicas. Su incorporación mejora la densidad de la matriz cementante y contribuye a la durabilidad del concreto (Nursyamsi & Febrizal Aruan, 2021; Stratoura et al., 2023). Además, puede reducir la necesidad de cemento en la mezcla y se ha observado que su comportamiento térmico y microestructural es más homogéneo en comparación con otros residuos. Para maximizar sus beneficios, es fundamental controlar las condiciones de calcinación y granulometría de CCA, ya que estas variables determinan su reactividad y desempeño dentro del concreto.

(Neghabat Shirazi et al., 2024)

1.4.4 Técnicas de caracterización utilizadas

Para evaluar las propiedades del hormigón y garantizar su desempeño en condiciones reales de servicio, se aplican diversos ensayos normalizados por la ASTM (American Society for Testing and Materials). Estos ensayos permiten caracterizar el comportamiento del material en dos estados fundamentales: estado fresco, cuando el concreto aún es plástico y trabajable, y estado endurecido, una vez ha fraguado y desarrollado resistencia.

1.4.4.1 Ensayos al concreto fresco

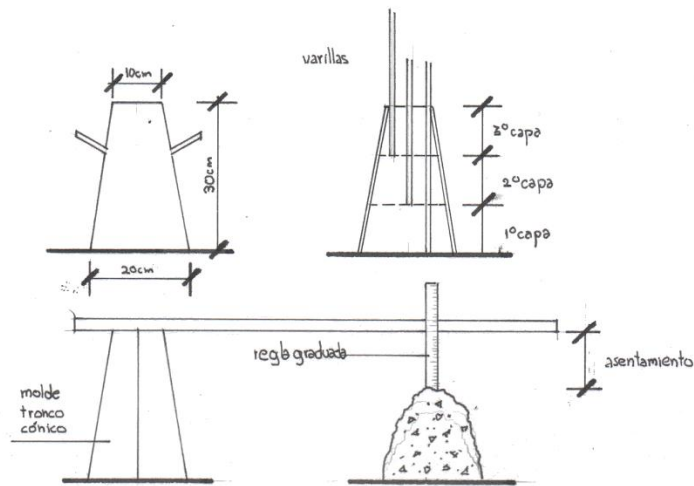
1.4.4.1.1 Ensayo de revenimiento o slump (ASTM C143/C143M)

El ensayo de revenimiento del concreto fresco, regulado por la norma ASTM C143/C143M, permite evaluar la consistencia y trabajabilidad de la mezcla. Se utiliza un molde metálico en forma de tronco de cono con base de 200 mm, parte superior de 100 mm y altura de 300 mm. El molde se llena en tres capas de igual volumen, cada una compactada con 25 golpes de una varilla de acero de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con extremos hemisféricos. En cada capa, la varilla debe penetrar en la subyacente para asegurar una adecuada consolidación. Tras llenar y enrasar la superficie, el molde se retira verticalmente en un tiempo máximo de 5 ± 2 segundos, permitiendo que el concreto se asiente libremente. La prueba completa, desde el inicio del llenado hasta la retirada del molde, no debe exceder los 2,5 minutos. El revenimiento se mide como la diferencia de altura entre el molde y el concreto asentado, empleando una regla o cinta metálica en incrementos de 5 mm.

El valor obtenido, expresado en milímetros, indica la trabajabilidad: un revenimiento alto refleja mayor fluidez, mientras que valores bajos señalan mezclas más rígidas. Asentamientos colapsados o irregulares pueden evidenciar problemas de dosificación o exceso de agua (ASTM C143, 2020).

Figura 1.1

Proceso de ensayo del cono de Abrams (Alava & Cevallos, 2014)

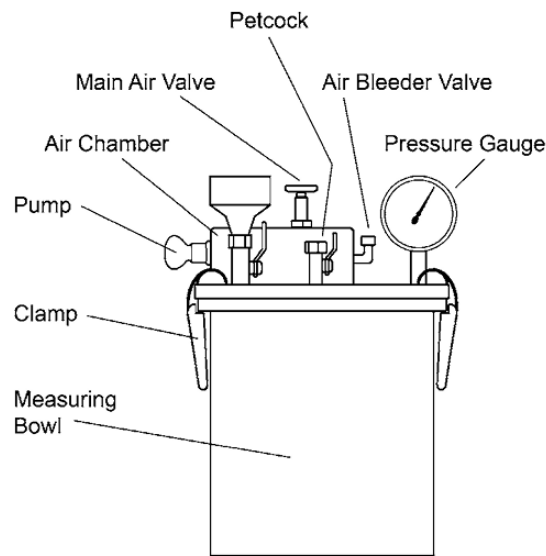


1.4.4.1.2 Contenido de aire (ASTM C231/C231M o ASTM C138)

El contenido de aire en el concreto fresco puede determinarse mediante el método de presión tipo B, establecido por la norma ASTM C231/C231M, el cual es ampliamente utilizado para mezclas con agregados densos y no porosos. Este ensayo permite medir el porcentaje de aire contenido en la mezcla —tanto el aire atrapado como el aire incorporado mediante aditivos—, lo cual influye directamente en la durabilidad y resistencia del hormigón. El procedimiento se lleva a cabo utilizando un recipiente metálico cilíndrico (célula de medición) que se llena con la mezcla de concreto en tres capas, compactando cada una con 25 golpes de varilla. Posteriormente, se ajusta herméticamente una tapa equipada con una cámara de aire y un manómetro. Se presuriza la cámara superior del aparato con una bomba manual hasta alcanzar una presión calibrada, y luego se libera el aire hacia el compartimento inferior que contiene el concreto. La presión ejercida sobre el concreto permite determinar, por lectura directa en el manómetro, el porcentaje de aire contenido en la mezcla. (ASTM C231, 2022)

Figura 1.2

Diagrama esquemático: medidor tipo B (ASTM C231, 2022)



2a. Horizontal Air Chamber

1.4.4.1.3 Peso unitario (densidad) y rendimiento (ASTM C138/C138M):

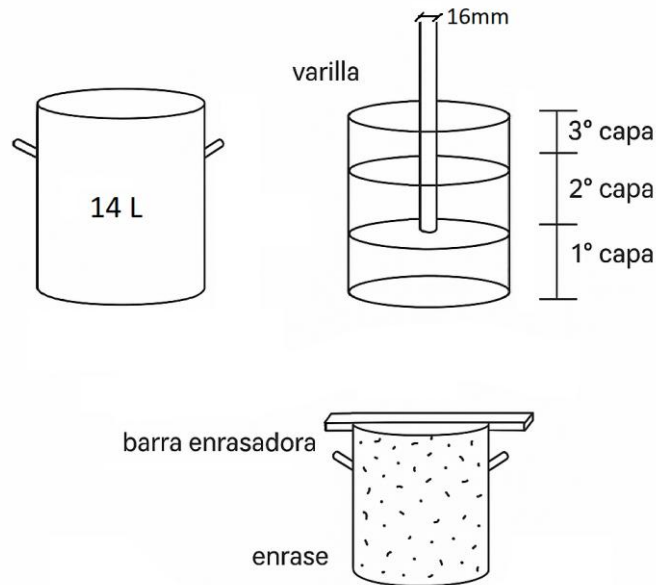
El ensayo de peso unitario y rendimiento del concreto fresco, descrito en la norma ASTM C138/C138M, permite determinar la densidad del concreto (masa por unidad de volumen) y su rendimiento, es decir, el volumen total que puede obtenerse de una mezcla. Para su ejecución se utiliza un recipiente cilíndrico metálico calibrado, cuya capacidad depende del tamaño máximo nominal del agregado; el más común es de 14 L, adecuado para agregados de hasta 2". Además, se requiere una balanza de precisión y una varilla de compactación de acero de 16 mm de diámetro por 600 mm de longitud, con extremo hemisférico.

El concreto fresco se coloca en el recipiente en tres capas de igual volumen, cada una compactada con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente. En las dos capas superiores la varilla penetra 25 mm en la capa previa. Tras la compactación, se golpean los costados del recipiente de 10 a 15 veces con un mazo de $2,25 \pm 0,50$ lb para cerrar huecos y liberar aire atrapado. La superficie se enrasa con una placa plana mediante presión y movimiento de sierra hasta nivelar completamente.

Finalmente, se determina la masa total y, con el volumen conocido del recipiente, se calcula la densidad del concreto fresco. Con este valor y la cantidad total de materiales se obtiene el rendimiento, expresado en metros cúbicos por lote. Este ensayo es esencial para verificar la dosificación y controlar la calidad del concreto en obra (ASTM C138, 2017).

Figura 1.3

Determinación de masa unitaria

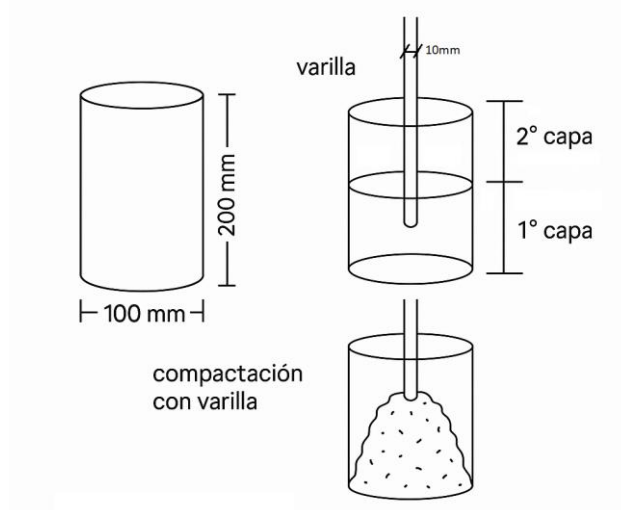


1.4.4.1.4 Moldeo y curado de especímenes de concreto (ASTM C31/C31M)

El moldeo y curado de especímenes cilíndricos de concreto, conforme a la norma ASTM C31/C31M, establece los procedimientos necesarios para garantizar que las probetas utilizadas en ensayos mecánicos representen fielmente las propiedades del concreto en condiciones reales. En esta investigación se utilizaron moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, los cuales fueron llenados con concreto fresco inmediatamente después del mezclado. El llenado se realizó en dos capas de igual volumen, compactando cada una mediante 25 golpes con una varilla metálica, cuyo diámetro corresponde al tamaño del cilindro utilizado, de acuerdo con la norma este fue de 10 ± 2 mm. Como se realizaron con moldes de plástico, después de cada capa se realizaron pequeños golpes con la palma de la mano, en lugar de usar un martillo de goma. Luego del moldeo, la superficie fue nivelada y las probetas se protegieron contra la pérdida de humedad y temperaturas extremas. Durante las primeras 24 horas, los cilindros fueron almacenados verticalmente a una temperatura ambiente controlada entre $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pasado este tiempo, fueron desmoldados y curados en agua a $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento del ensayo, programado a los 3, 7 y 28 días. Un adecuado proceso de curado es esencial para asegurar el desarrollo completo de las propiedades mecánicas del concreto (ASTM C39, 2021).

Figura 1.4

Moldeo de cilindros según ASTM C39



1.4.4.2 Ensayos al concreto endurecido

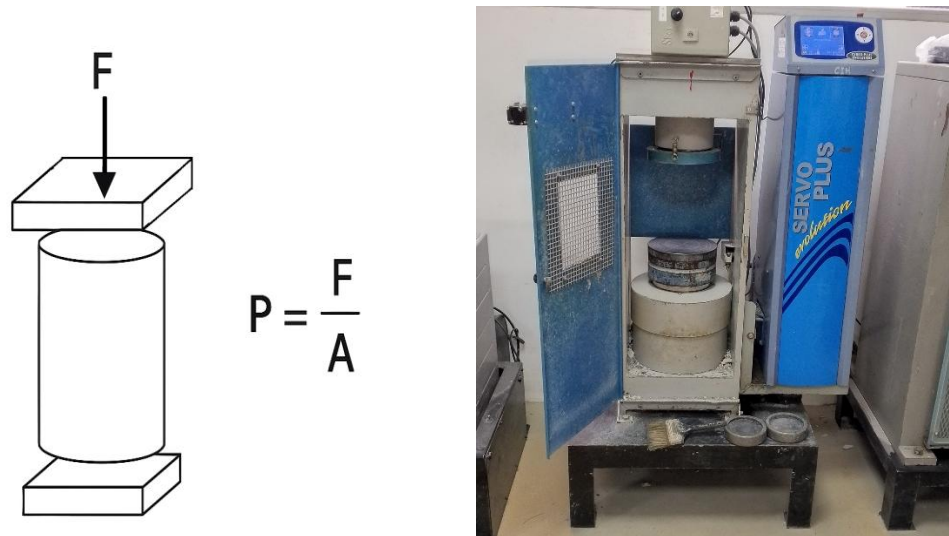
1.4.4.2.1 Resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M)

El método ASTM C39/C39M establece el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concreto mediante la aplicación de una carga axial continua hasta su falla. Para esta evaluación se utilizaron especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura como se establecieron anteriormente, preparados y curados según prácticas normalizadas. Las pruebas se realizaron con una máquina hidráulica, asegurando que la velocidad de carga cumpliera con el rango especificado de 0.15 a 0.35 MPa/s, especialmente en la fase final del ensayo. La resistencia se calcula dividiendo la carga máxima registrada entre el área promedio de la sección transversal del espécimen. La norma también establece tolerancias estrictas en dimensiones, planicidad, y perpendicularidad de los extremos del cilindro, además del uso de bloques de carga con caras endurecidas para garantizar una distribución uniforme del esfuerzo. Es fundamental alinear correctamente el eje del cilindro con el centro de carga de la máquina. Los resultados obtenidos permiten evaluar la calidad del concreto, verificar especificaciones de diseño estructural, y analizar la eficacia de aditivos o materiales reciclados empleados. Asimismo, el tipo de fractura observado puede ofrecer información sobre el

comportamiento mecánico del concreto, lo que resulta valioso en investigaciones de microestructura y durabilidad (ASTM C39, 2021).

Figura 1.5

Izquierda ("Esquema del ensayo de compresión en cilindros de concreto: aplicación de carga axial y fórmula de resistencia ($P = F / A$), derecha (Maquina hidráulica utilizada en los ensayos)



1.4.4.2.2 Resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C496/C496M)

El ensayo de resistencia a la tracción indirecta del concreto, descrito en la norma ASTM C496/C496M, permite determinar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción, los cuales son críticos en elementos estructurales sometidos a flexión o fisuración. Este ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, colocadas de forma horizontal entre las placas de carga de una máquina de compresión. La carga se aplica de manera axial, de forma continua y sin impacto, a una velocidad constante dentro del rango de 0,7 a 1,4 MPa/min. A medida que se incrementa la carga vertical, se genera una tensión de tracción horizontal en la sección media del cilindro, que termina provocando una fractura longitudinal.

La resistencia a la tracción indirecta (también llamada resistencia a la tracción por división o *split tensile strength*) se calcula con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{2P}{\pi LD}$$

donde:

- T= resistencia a la tracción indirecta (MPa)
- P= carga máxima aplicada (N)

- L = longitud del cilindro (mm)
- D = diámetro del cilindro (mm)

Las medidas del diámetro debe ser el promedio de tres mediciones con una precisión de 0,25 mm, mientras que para la longitud con una precisión de 2 mm, se promedia al menos dos mediciones de longitud

1.4.4.2.3 Módulo de elasticidad estático (ASTM C469/C469M)

La determinación del módulo de elasticidad del concreto en compresión se realizó conforme a la norma ASTM C469/C469M-14. Este ensayo tiene como propósito obtener el módulo de elasticidad en la región lineal del diagrama esfuerzo-deformación, utilizando especímenes cilíndricos de concreto moldeados de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, previamente curados según lo indicado por la norma ASTM C192/C192M. Para la medición de las deformaciones longitudinales se empleó un compresómetro fijado a dos generatrices opuestas del espécimen, con galgas colocadas a la mitad de su altura. La prueba consiste en aplicar una carga axial creciente hasta alcanzar el 40 % de la carga máxima obtenida previamente en ensayos de resistencia a compresión (ASTM C39/C39M), mientras se registran las deformaciones. El módulo de elasticidad se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad en MPa,

S₂ = Esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga máxima,

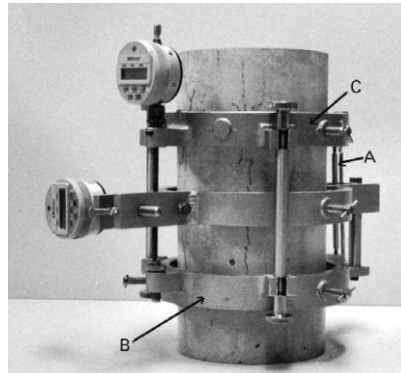
S₁ = Esfuerzo asociado a una deformación unitaria de 50 microdeformaciones,

ε₂ = La deformación longitudinal registrada bajo la carga S₂

La prueba incluye tres ciclos de carga, descartando el primero (de asentamiento de galgas) y promediando los valores obtenidos en los dos siguientes. Esta metodología permite obtener un valor confiable del módulo de elasticidad del concreto, útil en el análisis estructural de elementos sometidos a esfuerzos de compresión dentro del rango elástico.

Figura 1.6

Compresómetro (ASTM C469, 2022)



1.4.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) es una técnica analítica que permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de los materiales mediante el bombardeo con un haz de electrones. En el análisis del concreto, esta técnica es fundamental para estudiar la microestructura de la pasta cementante, la interfaz entre los agregados y la matriz (zona de transición interfacial, ITZ), así como la distribución de los vacíos y grietas. El SEM permite identificar el desarrollo de productos de hidratación como el gel C-S-H y la portlandita, así como la presencia de microfisuras o huecos generados por materiales reciclados, como PET, caucho o CCA. El uso de SEM en esta investigación permite comparar la calidad del contacto entre los agregados reciclados y la pasta de cemento, además de observar la porosidad o densidad de la matriz. Esto es especialmente útil para entender cómo influye cada tipo de residuo reciclado en la estructura interna del concreto, y por ende, en sus propiedades mecánicas y durabilidad. (Franus et al., 2015)(Chinchillas-Chinchillas et al., 2019).

1.4.6 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El Análisis Termogravimétrico (TGA) es una técnica que mide los cambios de masa de un material en función de la temperatura, siendo ampliamente utilizada para evaluar la estabilidad térmica y la composición de cementos y concretos. En este estudio, el TGA permitió analizar la descomposición térmica de los residuos reciclados incorporados al concreto (PET, caucho y CCA), así como la pérdida de masa asociada a la deshidratación de los productos de hidratación. Las curvas de TGA permiten identificar diferentes etapas térmicas. La evaporación del agua libre ocurre hasta 105 °C, seguida de la deshidratación del gel C-S-H entre 100 y 250 °C. La portlandita (Ca(OH)_2) se descompone entre 430 y 530 °C, lo que posibilita su identificación y cuantificación (Villain et al., 2007). Entre 530 y 760 °C se descomponen carbonatos como vaterita

y aragonita, mientras que la calcita se descompone a temperaturas más altas, de 760 a 950 °C (C. Wang et al., 2024).

Gracias a esta diferenciación, el TGA no solo evalúa el grado de hidratación y carbonatación, sino también el efecto de los materiales reciclados en la estabilidad térmica de la matriz cementante. En el caso de las CCA, permite inferir la reactividad puzolánica, mientras que para el PET y el caucho revela su impacto térmico y de degradación.

1.4.7 Métodos estadísticos aplicados al análisis del comportamiento del hormigón (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística que permite determinar si existen diferencias significativas entre medias de varios grupos o tratamientos. En el contexto de los materiales de construcción, y en particular del concreto, el ANOVA es útil para evaluar si la incorporación de distintos porcentajes de materiales reciclados afecta significativamente las propiedades del material, como la resistencia a la compresión, tracción, densidad, módulo de elasticidad, entre otros. En esta investigación se aplicó un ANOVA unidireccional para comparar los resultados de las mezclas con 2.5%, 5% y 10% de sustitución del agregado fino por PET, caucho y CCA, respecto a la mezcla control. El nivel de significancia utilizado fue del 5% ($\alpha = 0.05$), y se analizaron los valores F y p-valor para determinar si las diferencias entre tratamientos eran estadísticamente significativas. Esta metodología permite validar si las variaciones observadas en el comportamiento del concreto se deben al tipo y porcentaje de residuo reciclado utilizado, asegurando así la rigurosidad científica de los resultados obtenidos (Baykara et al., 2024)(Abellan-Garcia et al., 2024).

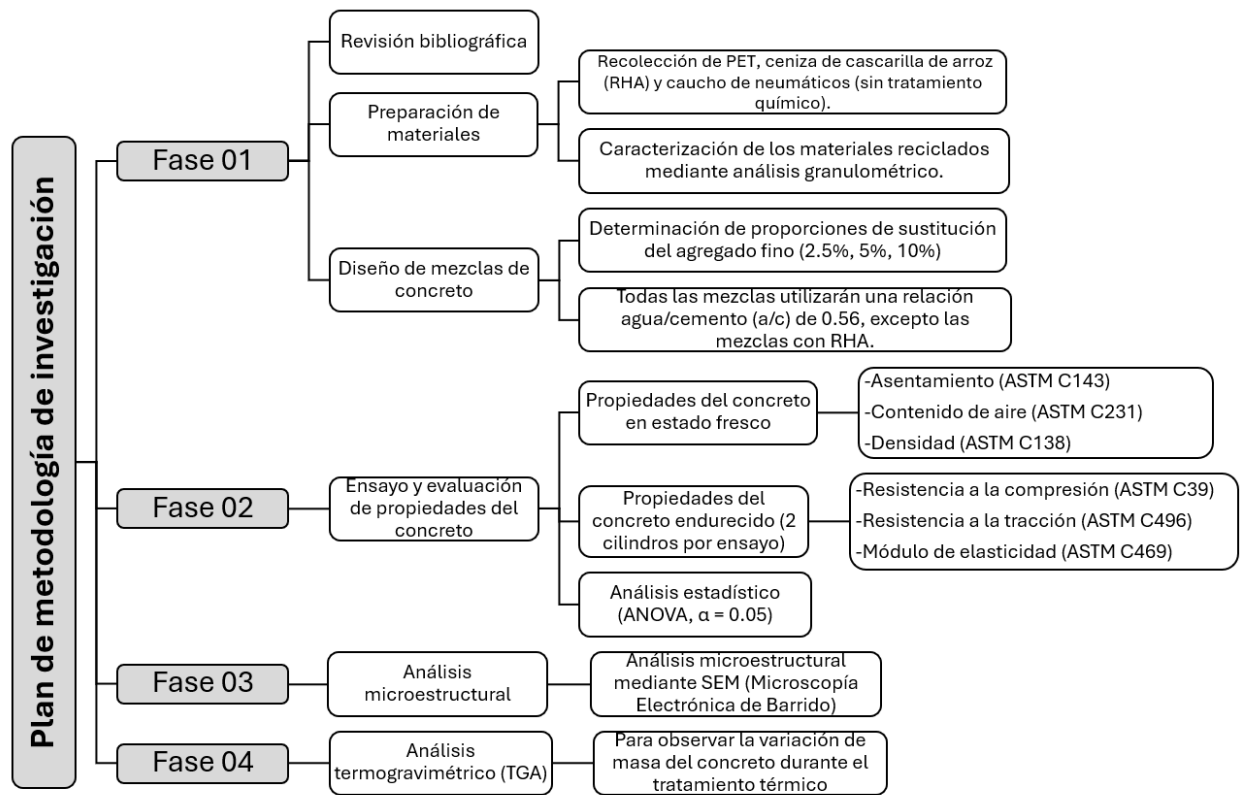
Capítulo 2

2. METODOLOGÍA.

En este estudio, se seleccionaron tres tipos diferentes de materiales reciclados: tereftalato de polietileno (PET), caucho de neumáticos fuera de uso y ceniza de cascarilla de arroz (CCA). Todos ellos se obtuvieron localmente en la provincia del Guayas sin necesidad de tratamientos químicos ni procesos adicionales. La selección se basó en los criterios de alta disponibilidad regional como residuo sólido y su potencial para ser utilizados directamente como sustitutos parciales del agregado fino en mezclas de concreto. Si bien los materiales presentan diferencias físicas y químicas, compararlos en condiciones similares permite evaluar su viabilidad práctica, económica y sostenible para su incorporación directa. Siguiendo los objetivos establecidos en esta investigación, el plan metodológico consistió en realizar ensayos estandarizados para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del concreto que incorpora tres tipos de materiales reciclados. Este estudio consideró porcentajes de sustitución del 2,5%, 5% y 10%, que, según investigaciones previas, han demostrado no afectar significativamente las propiedades mecánicas del concreto a bajos porcentajes de sustitución (García-Troncoso et al., 2023) (Padhi et al., 2018) (Almeshal et al., 2020). Para determinar si los diferentes niveles de reemplazo de agregado fino con materiales reciclados tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas del concreto, se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Este método estadístico nos permitió evaluar si existen diferencias sustanciales entre los grupos evaluados, en este caso los diferentes porcentajes de reemplazo en variables como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, considerando un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), como se ha aplicado en investigaciones previas para evaluar estadísticamente los efectos de diferentes materiales y proporciones de mezcla en las propiedades del concreto. Para cada combinación de tipo de material, nivel de sustitución y edad de curado, se probaron dos especímenes cilíndricos para asegurar la replicabilidad de los datos y la confiabilidad experimental. Los ensayos de caracterización microestructural mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Análisis Termogravimétrico (TGA) se realizaron en el Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología (CIDNA) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Para estos análisis se utilizaron muestras sobrantes de los ensayos realizados al concreto en estado endurecido, lo que permitió observar la interacción entre los materiales reciclados y la matriz cementante, así como identificar los productos de hidratación y las temperaturas de descomposición térmica de los componentes presentes. El plan metodológico comprende cuatro fases, que se detallan a continuación (Figura 2.1).

Figura 2.1

Plan para la metodología de investigación en este estudio.



2.1 Materiales

Para las mezclas de concreto con materiales reciclados se utilizó cemento hidráulico de alta resistencia, clasificado como Tipo HE. Está compuesto de clínker de cemento Portland, yeso y materiales puzolánicos, y se fabrica de acuerdo con las directrices de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 (NTE INEN 2380, 2011), que regula los requisitos para cementos hidráulicos de uso general con características que favorecen el desarrollo de altas resistencias iniciales. Las especificaciones técnicas del cemento HE se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2.1

Especificaciones técnicas del cemento utilizado (Holcim Ecuador, 2022)

Propiedades	Valores
Cambio de longitud en autoclave	-0.02%.
Tiempo de fraguado (método Vicat)	El tiempo de fraguado inicial fue de 130 minutos
Contenido de aire en mortero (por volumen)	5%.
Resistencia a la compresión	14 MPa a 1 día, 27 MPa a 3 días, 34 MPa a 7 días y 42 MPa a 28 días.
Expansión de barras de mortero a 14 días	0.002%.

2.1.1 Árido grueso y fino

El árido grueso utilizado en esta investigación corresponde a piedra triturada que cumple con los requisitos de tamaño de partícula establecidos en la norma ASTM D448-12 para el tamaño 67, con un tamaño nominal de 19 mm. Este material proviene de la cantera Loma Alta, ubicada en el cantón Daule. Por otro lado, el árido fino corresponde a arena proveniente del río Bulu Bulu, en la provincia del Guayas, Ecuador. Ambos materiales fueron suministrados por la empresa HOLCIM, la cual mantiene un sistema de control de calidad regular que incluye la caracterización constante de sus agregados, así como el monitoreo de su humedad. Por esta razón, las propiedades de los agregados utilizadas en este estudio corresponden a los datos proporcionados directamente por la empresa. La Tabla 2.2 presenta las propiedades de los agregados, mientras que la Figura 2.2 y la Figura 2.3 muestra la distribución de tamaños de partícula de la piedra y arena, confirmando que ambos agregados cumplen con las especificaciones de las normas ASTM C33 (ASTM C33/C33M, 2018) y ASTM D448-12 (ASTM D448-12, 2022).

Figura 2.2

Curva granulométrica de la piedra 67

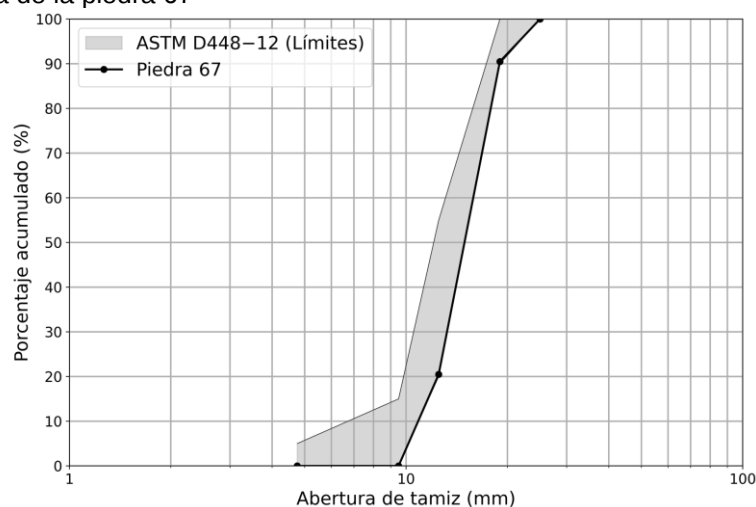


Tabla 2.2

Propiedades del agregado grueso y fino.

Propiedad	Agregado grueso N°67	Arena de río
Densidad aparente suelta [kg/m³]	1522	1518
Densidad aparente compactada [kg/m³]	1621	1598
Densidad seca superficial saturada [kg/m³]	2913	2680
Gravedad específica	2.89	2.63
Absorción (%)	0.8	2.0
Módulo de finura	—	2.6

2.1.2 Residuos de neumáticos

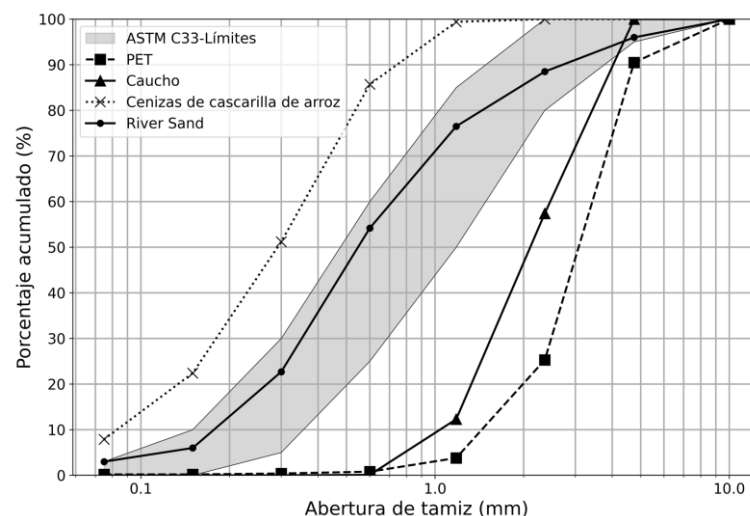
Los residuos de neumáticos al final de su vida útil se someten a un proceso para separar sus componentes principales, como caucho, fibra textil y refuerzos metálicos, obteniendo así caucho granulado para esta investigación. La Figura 2.3 muestra la distribución de las partículas de caucho granulado de la empresa SEGINUS, así como la de otros materiales reciclados. A su vez en la Figura 2.4 se muestra también la apariencia de los sustitutos del agregado fino.

2.1.3 Plástico PET

El plástico PET (tereftalato de polietileno) utilizado en esta investigación proviene de envases para aceite comestible, el cual no es apto para su reutilización debido a la presencia de contaminantes que afectan la pureza del material y, a su vez, sus propiedades físicas y mecánicas (Sinha et al., 2010). Por esta razón, las plantas de reciclaje suelen desecharlo debido a las complicaciones y costos que implica su limpieza, lo que no es la excepción para NOVARED, empresa dedicada a la recolección y procesamiento de materiales reciclables ubicada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Esta empresa se encargó de triturar y suministrar este material para su uso en esta investigación. Sin embargo, la inspección visual, la evaluación táctil y el examen olfativo no indicaron residuos perceptibles, lo que implica que el contenido de aceite residual en el material es mínimo e imperceptible mediante estas técnicas de evaluación sensorial. La distribución de las partículas de PET se muestra en la Figura 2.3.

Figura 2.3

Curva granulométrica de la arena y los sustitutos del agregado fino (Caucho, PET y cenizas de cascarilla de arroz)

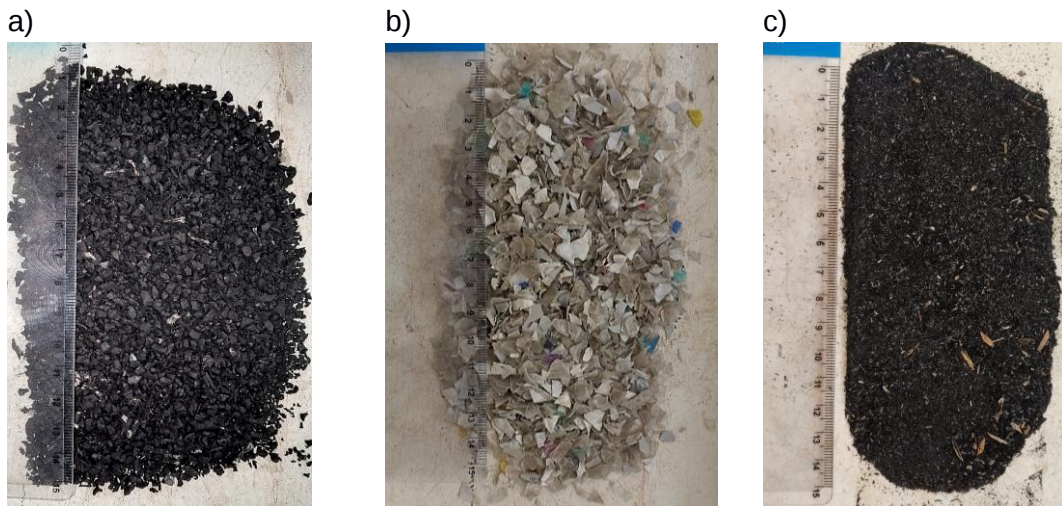


2.1.4 Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz fue suministrada por el molino arrocero Agricampo, ubicado en Milagro, provincia del Guayas, Ecuador. El proceso de obtención de la ceniza consiste en la incineración de la cascarilla de arroz tras separarla del grano durante la molienda. Inicialmente, la cascarilla de arroz se seca para reducir su contenido de humedad a una temperatura inferior a 40 °C. Posteriormente, se incinera en hornos industriales a temperaturas superiores a 500 °C para garantizar una combustión uniforme.

Figura 2.4

Materiales reciclados utilizados como sustitutos del agregado fino a) Caucho, b) PET, c) Cenizas de cascarilla de arroz



2.2 Diseño de la mezcla

El diseño de la mezcla se realizó de acuerdo con el método ACI 211 (ACI 211.1-91, n.d.), estableciendo inicialmente una relación agua-cemento de 0,56 con una resistencia de diseño de 30 MPa. Este diseño de mezcla fue previamente establecido y validado por el Centro de Innovación de Holcim en San Eduardo, Guayaquil, y se adoptó en el presente estudio para garantizar la consistencia y la comparabilidad con las mezclas de referencia estándar. Todos los ensayos experimentales y el colado de probetas se realizaron en este centro. Sin embargo, al sustituir el agregado fino por ceniza de cascarilla de arroz, fue necesario aumentar la relación agua-cemento debido a la alta capacidad de absorción de las cenizas. Para facilitar la replicabilidad del estudio, la sustitución de materiales se realizó en función de la masa en lugar del volumen. Asimismo, para aislar el efecto específico de los materiales reciclados como sustitutos del agregado fino, no se utilizaron aditivos químicos adicionales. Para la identificación

de las diferentes mezclas de concreto, se empleó un sistema de codificación basado en el tipo de material reciclado utilizado como sustituto del agregado fino y el porcentaje de reemplazo correspondiente. La nomenclatura adoptada sigue el formato "Material-%", donde "PET" corresponde a plástico de tereftalato de polietileno reciclado, "CCA" a ceniza de cascarilla de arroz y "CT" a caucho triturado de neumáticos fuera de uso. Las mezclas de control sin porcentaje de sustitución se identificaron con el código "CN" (Concreto Nominal), seguido de una numeración secuencial (CN-01, CN-02, CN-03), debido a que se prepararon en días diferentes, uno para cada serie experimental, para garantizar condiciones de referencia homogéneas para cada grupo de comparación. La dosificación de las diferentes mezclas se muestra en la Tabla 2.3. Todas las mezclas se ajustaron para obtener asentamientos dentro del rango de 16 cm a 20 cm, asegurando una trabajabilidad adecuada para su manipulación y colocación (Stanley, 2011).

Tabla 2.3

Dosificación utilizada para las mezclas de concreto

Código Mix	Cemento [kg]	Agua [kg]	Arena [kg]	PET [kg]	Cenizas de cascarilla de arroz [kg]	Caucho Triturado [kg]	Piedra No.67 [kg]	Relación a/c
CN-01	395	223	730	-	-	-	1030	0.56
PET-2.5%	395	223	712	18.25	-	-	1030	0.56
PET-5%	395	223	694	36.50	-	-	1030	0.56
PET-10%	395	223	657	73.00	-	-	1030	0.56
CN-02	395	223	730	-	-	-	1030	0.56
CCA -2.5%	395	223	712	-	18.25	-	1030	0.56
CCA -5%*	395	251	694	-	36.50	-	1030	0.64
CCA -10%*	395	277	657	-	73.00	-	1030	0.70
CN-03	395	223	730	-	-	-	1030	0.56
CT-2.5%	395	223	712	-	-	18.25	1030	0.56
CT-5%	395	223	694	-	-	36.50	1030	0.56
CT-10%	395	223	657	-	-	73.00	1030	0.56

2.3 Procedimiento de prueba

Las muestras de hormigón se fabricaron en moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, distribuidos de la siguiente manera: 72 cilindros para el ensayo de compresión según la norma ASTM C39, que se evaluaron a los 3, 7 y 28 días, y otros 48 cilindros para la resistencia a la tracción según la norma ASTM C496, que se evaluaron a los 7 y 28 días. Para el módulo de elasticidad según la ASTM C469, se prepararon 24 probetas cilíndricas, las cuales se ensayaron a los 28 días para cada porcentaje de sustitución según los diferentes materiales. La tabla 2.3 muestra lo anteriormente mencionado. Cabe destacar que, para cada mezcla y edad de ensayo, se utilizaron dos probetas para obtener valores promedio representativos. Posteriormente, las piezas fracturadas restantes de los ensayos de concreto endurecido se recolectaron para análisis microestructural mediante examen SEM (Microscopio Electrónico de Barrido), para observar los patrones microestructurales en el concreto que incorpora los tres tipos de materiales a los 28

días. También se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) para medir los cambios en el peso de las muestras de concreto con sustitutos de materiales reciclados cuando se someten a un aumento controlado de temperatura.

Tabla 2.4

Ensayos al concreto endurecido realizados a diversos días.

Ensayo	Norma ASTM	Días de ensayo
Resistencia a la compresión	ASTM C39/C39M	3, 7 y 28 días
Resistencia a la tracción indirecta	ASTM C496/C496M	3, 7 y 28 días
Módulo de elasticidad	ASTM C469/C469M	28 días

2.4 Análisis Estadístico

Para analizar si existían diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a la compresión del hormigón debido a la sustitución parcial del agregado fino por caucho, PET o ceniza de cáscara de arroz, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor. Esta prueba se aplicó de forma independiente para cada uno de los tres materiales reciclados y para cada edad de curado de acuerdo con el tipo de ensayo. El análisis fue realizado en el lenguaje de programación Python, empleando el paquete statsmodels, el cual facilita la aplicación de modelos estadísticos avanzados. Se utilizó específicamente el modelo lineal ordinario ols (Ordinary Least Squares) para ajustar los datos, y posteriormente se aplicó la función anova_lm para obtener los valores F y p asociados. El criterio de decisión fue un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Este análisis permitió establecer si los porcentajes de sustitución generaban efectos significativos sobre la resistencia a la compresión del hormigón.

Capítulo 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Propiedades del concreto en estado fresco

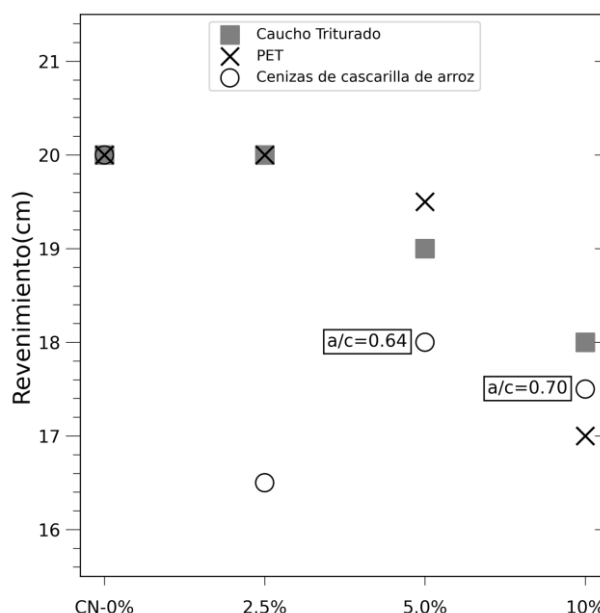
3.1.1 Revenimiento

La Figura 3.1 muestra que el asentamiento disminuye progresivamente con la incorporación de materiales reciclados como sustitutos del agregado fino, siendo más evidente con ceniza de cascarilla de arroz. Con 2.5% de CCA, el asentamiento bajó de 20 cm a 16.5 cm, y con 5% cayó a 3 cm, requiriendo un aumento en la relación agua/cemento a 0.64 para restaurar la trabajabilidad. Con 10% de CCA, se elevó la relación a/c a 0.70, logrando 17.5 cm de asentamiento. Esta pérdida de fluidez se atribuye a la alta porosidad y absorción del material (Liu et al., 2024)(Kumar et al., 2018).

En cambio, el caucho reciclado y el PET no afectaron significativamente la trabajabilidad. A 2.5% su efecto fue mínimo y, aun con 10%, la reducción del asentamiento fue inferior al 20%, sin requerir ajustes en la dosificación (Qaidi et al., 2023; (X. Huang et al., 2024)), debido a su naturaleza hidrófoba.

Figura 3.1

Variación del revenimiento en mezclas de concreto con PET, CCA y caucho. Se observa que la sustitución con CCA reduce significativamente la trabajabilidad, mientras que el PET y el caucho mantienen asentamientos similares a la mezcla de control.



3.1.2 Contenido de aire

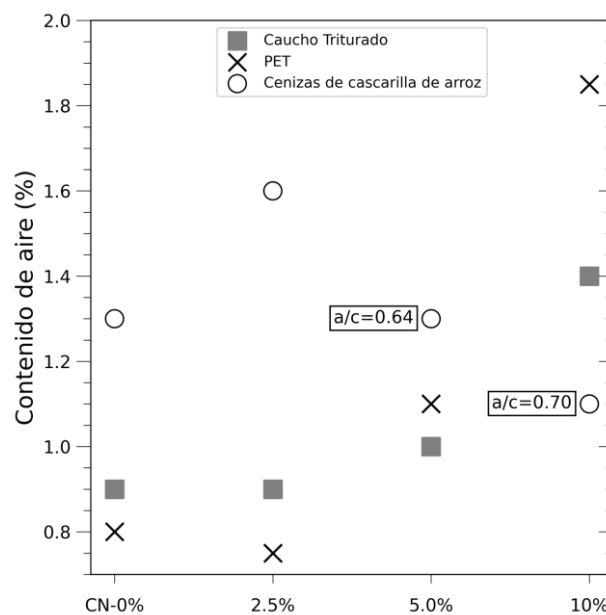
La Fig. 3.2 muestra que la incorporación de materiales reciclados como sustitutos parciales del agregado fino influye notablemente en el contenido de aire del concreto fresco. En el caso de la

ceniza de cascarilla de arroz, se observó un aumento inicial del contenido de aire con una sustitución del 2.5%, posiblemente debido a su textura porosa, que facilita la retención de burbujas durante el mezclado (H. Huang et al., 2017). Sin embargo, al aumentar la proporción de CCA y, con ello, la relación agua/cemento, se evidenció una reducción del contenido de aire, atribuible a la mayor fluidez de la mezcla, que favorece la liberación de burbujas.

Respecto al caucho reciclado, a partir del 5% de sustitución se produjo un incremento notable del contenido de aire, alcanzando un 56% al 10% de reemplazo, debido a su baja densidad, elasticidad y escasa adherencia con la matriz cementicia. Finalmente, con el PET, no se evidenció una variación significativa al 2.5%, pero con un 10% de sustitución se registró el mayor aumento de aire (131%), atribuible a su rigidez, baja compatibilidad superficial y pobre adherencia con el cemento.

Figura 3.2

Contenido de aire en mezclas de concreto con diferentes sustituciones de agregado fino. El caucho y el PET generan mayor incorporación de aire, mientras que la CCA presenta un comportamiento menos uniforme por su textura porosa.



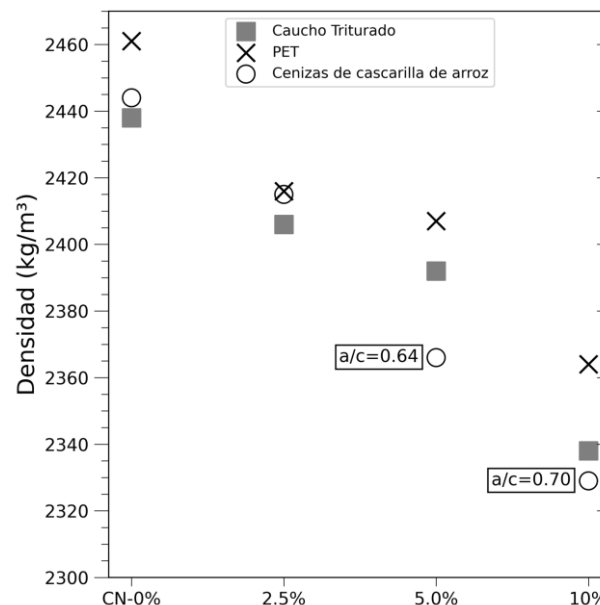
3.1.3 Densidad

Según la Fig. 3.3, existe una disminución en la densidad del hormigón fresco para los tres materiales, lo cual se atribuye a que la densidad de estos materiales es menor que la de la arena natural. Con niveles de reemplazo del 2,5% y del 5% para todos los materiales, la disminución máxima en la densidad es del 3%, mientras que con el 10% de reemplazo, la mayor reducción se observa en la mezcla con ceniza de cascarilla de arroz, llegando aproximadamente al 5%.

Además, se observó que una mayor relación agua/cemento ($a/c = 0,70$) acentuó la reducción en la densidad del hormigón fresco. Si bien una disminución en la densidad suele estar asociada a un aumento en el contenido de aire atrapado, este comportamiento no se observó en las mezclas con cenizas de cascarilla de arroz, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, la reducción en la densidad de las mezclas parece estar más relacionada con la densidad intrínseca del material. Estos resultados coinciden con los reportados por Zeyad et al., (2024), quienes observaron una disminución en la densidad del hormigón geo polímero al incorporar CCA como sustituto parcial, principalmente debido a la menor densidad intrínseca del material.

Figura 3.3

Variación de la densidad del concreto fresco con diferentes porcentajes de sustitución de PET, CCA y caucho. La densidad disminuye en todas las mezclas, siendo más marcada con 10 % de CCA debido a su menor densidad y alta porosidad.



3.2 Propiedades del concreto en estado endurecido

3.2.1 Resistencia a la compresión

La Figura 3.4 presenta la evolución de la resistencia a la compresión de las mezclas con sustitución parcial del agregado fino a los 3, 7 y 28 días, para los tres materiales se evidencia una disminución de la resistencia a la compresión. En el caso de la ceniza de cascarilla de arroz, con un 2.5 % de reemplazo, se observan reducciones leves en la resistencia: 2.5 % a los 3 días,

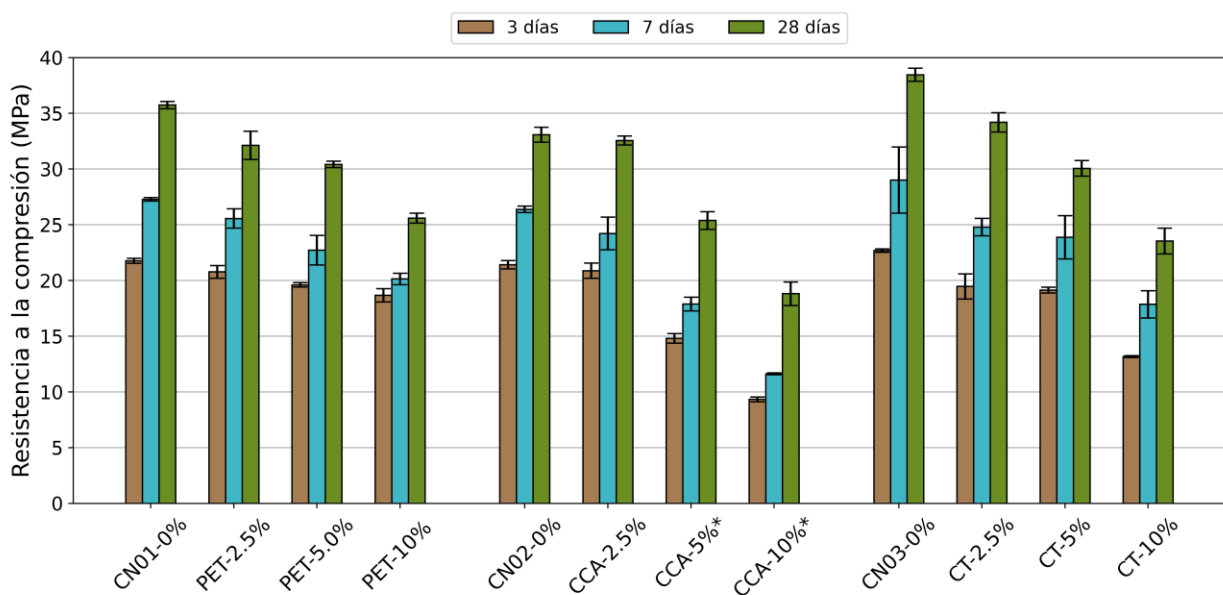
8.2 % a los 7 días y solo 1.6 % a los 28 días. Este comportamiento favorable a largo plazo se debe a las propiedades puzolánicas del material, atribuidas a su alto contenido de sílice (Bheel et al., 2018), así como a la mejora de la densidad de la zona de transición interfacial (Zareei et al., 2017). Sin embargo, al aumentar la sustitución a 5 % y 10 %, las pérdidas a los 28 días se acentúan a 23.2 % y 43.1 %, respectivamente, en parte debido al incremento de la relación agua/cemento necesaria para mantener la trabajabilidad.

En cuanto al PET, las pérdidas de resistencia se mantienen por debajo del 10 % para el 2.5 % de sustitución en los tres días evaluados, mientras que con 5 % y 10 % las reducciones promedian 15 % y 24 %, respectivamente. A los 3 días, las reducciones fueron moderadas (6 %–16 %), lo que sugiere un buen desarrollo inicial de resistencia. Este fenómeno se relaciona con el efecto aislante del PET que favorece la retención de calor durante la hidratación del cemento, acelerando la ganancia inicial de resistencia (Qaidi et al., 2023).

Por su parte, el caucho fue el material que presentó los mayores descensos en la resistencia: a los 28 días, las pérdidas alcanzaron el 11 %, 22 % y 39 % para los reemplazos del 2.5 %, 5 % y 10 %, respectivamente. Esta baja eficiencia se relaciona con la débil adherencia entre el caucho y la matriz de cemento, lo cual afecta la transferencia de esfuerzos internos (Alzubi & Al Adwan, 2022).

Figura 3.4

Resistencia a la compresión a diferentes días de curado (3, 7 y 28 días), para reemplazos de PET, cenizas de cascarilla de arroz (CCA) y caucho triturado de neumáticos (CT). CCA-5%* y CCA-10%* tienen diferentes relaciones a/c. La CCA mantiene mejor desempeño a bajos porcentajes, mientras que el caucho produce las mayores pérdidas de resistencia.



3.2.2 Resistencia a la tracción

La figura 3.5 presenta los resultados de resistencia a la tracción indirecta de las mezclas con materiales reciclados como sustitutos parciales del agregado fino. En general, los tres materiales evaluados; ceniza de cascarilla de arroz, PET y caucho, provocaron una disminución en la resistencia a la tracción respecto al concreto de referencia, aunque en diferentes magnitudes.

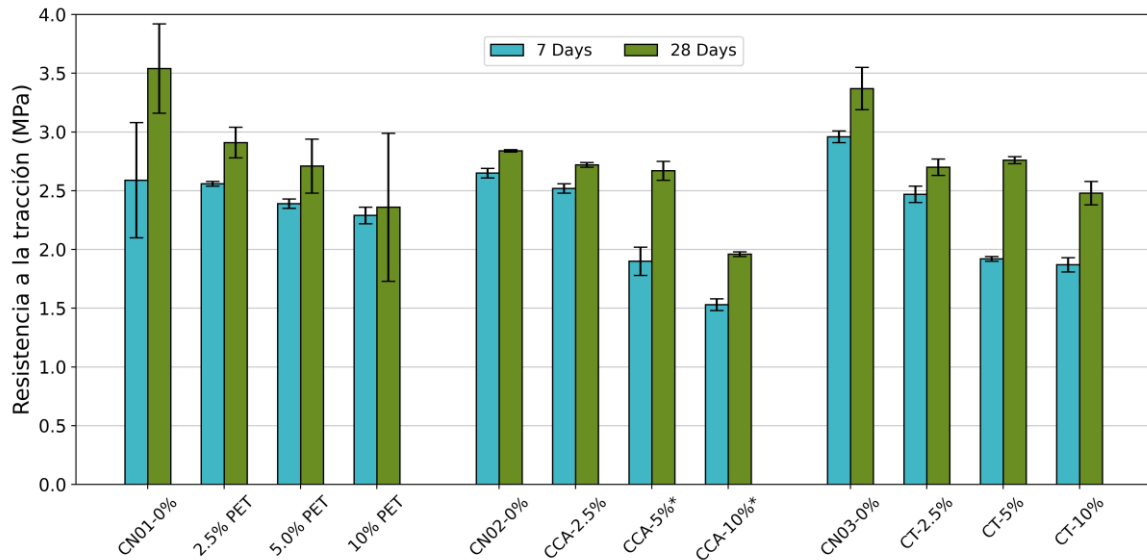
En el caso de las CCA una sustitución del 2.5 % produjo una reducción del 5 % a los 7 días y del 4 % a los 28 días. Con un 5 %, la pérdida fue más pronunciada a los 7 días (28 %), atribuida a una mayor relación agua/cemento, pero mejoró con el curado, reduciendo la diferencia a solo un 6 % a los 28 días. La mezcla con 10 % de ceniza presentó una reducción del 43 % a los 7 días y del 31 % a los 28 días. Estos resultados reflejan el efecto retardado de la actividad puzolánica, ya que las reacciones secundarias que refuerzan la matriz requieren más tiempo para desarrollarse (S. Singh & Shukla, 2023). Asimismo, se observa que la zona de transición interfacial se debilita con mayores niveles de reemplazo, reduciendo la transferencia de esfuerzos (Padhi et al., 2018).

En cuanto al PET, a los 7 días las pérdidas fueron menores, 2 %, 8 % y 12 % para 2.5 %, 5 % y 10 %, respectivamente, pero aumentaron notablemente a los 28 días, alcanzando pérdidas del 18 %, 23 % y 33 %. Este comportamiento se debe a su pobre adherencia con la matriz cementicia, que genera huecos y discontinuidades estructurales (Hasan-Ghasemi & Nematzadeh, 2021), afectando la resistencia a tracción más que la compresión.

El caucho mostró un efecto aún más marcado. A los 7 días, las mezclas con 5 % y 10 % de caucho presentaron una disminución media del 36 %, mientras que a los 28 días esta se redujo al 22 %. Esto se atribuye a su baja rigidez y adhesión, que favorecen la concentración de tensiones y formación de microgrietas (Choi et al., 2022). Además, su naturaleza hidrofóbica puede interferir en el proceso de hidratación, generando zonas porosas que debilitan la microestructura (Chou et al., 2007).

Figura 3.5

Resistencia a la tracción a diferentes días de curado (7 y 28 días), para reemplazos de PET, cenizas de cascarilla de arroz (CCA) y caucho triturado de neumáticos (CT). CCA-5%* y CCA-10%* tienen diferentes relaciones a/c. La CCA presenta menor afectación a largo plazo, mientras que PET y caucho generan reducciones más significativas.

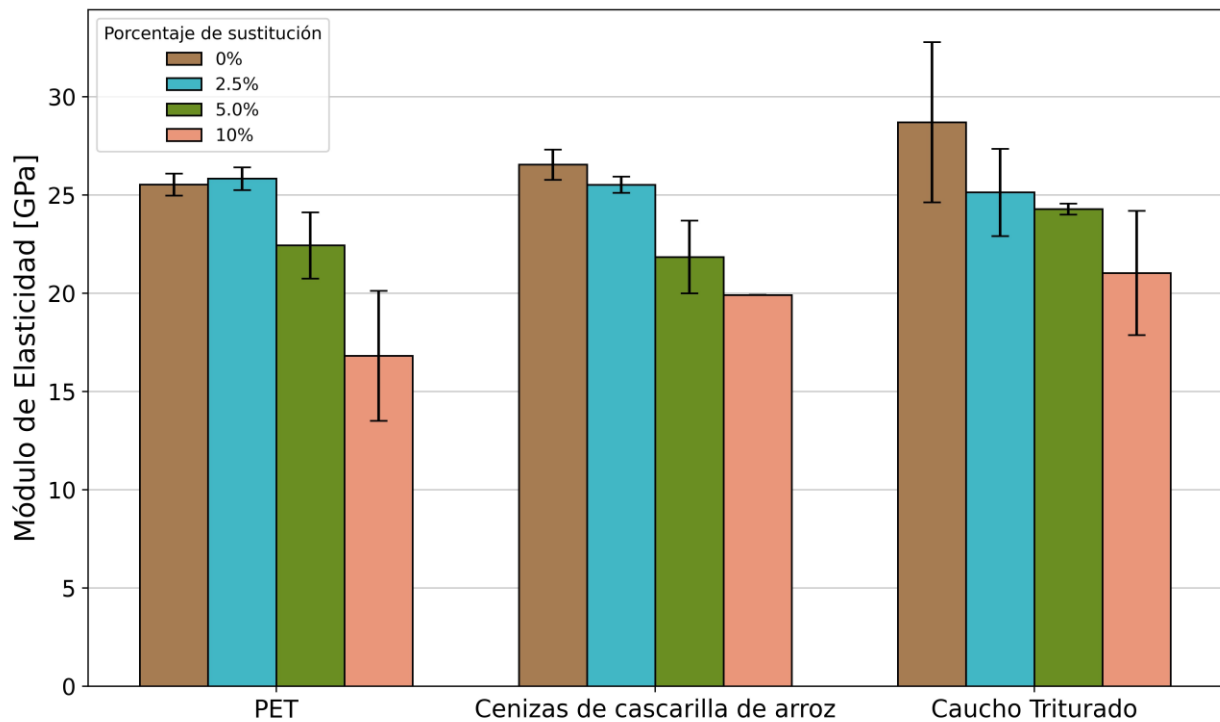


3.2.3 Módulo de elasticidad

La Fig. 3.6 muestra que el módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución con los tres materiales reciclados. La mayor pérdida se registra con una sustitución del 10 %, siendo el PET el más afectado, con una reducción del 34 % respecto a la mezcla de control. En contraste, con un 2.5 % de PET, se evidencia un leve aumento en el módulo, sugiriendo una mejora puntual en la rigidez. El caucho de neumático mostró la menor pérdida global, con reducciones del 8 % al 2.5 %, 12 % al 5 %, y 18 % al 10 %, lo que indica una mayor capacidad para conservar la rigidez del hormigón. Por su parte, la ceniza de cascarilla de arroz presentó caídas más marcadas: 15 % al 5 % de reemplazo y hasta 29 % al 10 %, lo cual se relaciona con su influencia en la zona de transición interfacial (ZTI), que debilita la matriz del hormigón (Meddah et al., 2020). Además, el incremento en la relación agua/cemento (0.64 y 0.70 para el 5 % y 10 % de incorporación de cenizas, respectivamente) lo que contribuye a una mayor porosidad, disminuyendo así la rigidez del concreto ((Lin et al., 2024); Kumar et al.,(2018)).

Figura 3.6

Módulo de elasticidad a 28 días de curado, para reemplazos de PET, cenizas de cascarilla de arroz (CCA) y caucho triturado de neumáticos (CT). La sustitución parcial al 5% y 10% de cenizas de cascarilla de arroz tienen diferentes relaciones a/c. La mayor pérdida se da con 10 % de PET, mientras que el caucho conserva mejor la rigidez relativa de la mezcla.



3.3 Análisis estadístico

Los resultados del análisis ANOVA (Tabla 3.1) permiten identificar diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de sustitución de agregado fino (0 %, 2.5 %, 5 % y 10 %) en las propiedades mecánicas evaluadas del hormigón endurecido.

En el caso del PET, el valor F a los 3 días fue relativamente bajo, con valores p superiores a 0,05, lo que indica que el nivel de sustitución no tuvo un efecto significativo en la resistencia a compresión inicial. Este comportamiento puede estar asociado al desarrollo acelerado de resistencia inicial favorecido por el PET, debido a su capacidad de retener calor en la reacción de hidratación. Sin embargo, a los 7 y 28 días, los valores p se mantuvieron por encima de 0,05, mostrando que las diferencias comienzan a ser más relevantes conforme avanza la hidratación, aunque sin alcanzar un impacto tan marcado como en otros materiales.

Por el contrario, el caucho y la ceniza de cascarilla de arroz presentaron valores F altos y valores p muy bajos ($p < 0,05$) desde los 3 días, indicando un efecto estadísticamente significativo del porcentaje de sustitución sobre la resistencia a compresión desde edades tempranas. Este

efecto se mantuvo constante a lo largo del tiempo, evidenciando que la sustitución con estos materiales modifica sustancialmente el desempeño mecánico.

En resistencia a tracción, el PET mantuvo valores p superiores a 0,05 a los 7 y 28 días, lo que sugiere una menor variabilidad estadística entre niveles de sustitución y una respuesta más estable de esta propiedad. En cambio, el caucho y CCA mostraron valores p inferiores a 0,05 en ambos periodos, reflejando diferencias estadísticamente significativas.

Para el módulo de elasticidad a los 28 días, el ANOVA indicó diferencias significativas en PET y CCA ($p < 0,05$), confirmando que el nivel de sustitución influye directamente en la rigidez del material. Las mezclas con caucho, en cambio, no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$), lo que sugiere que, aunque este material reduce la resistencia mecánica, su impacto sobre el módulo de elasticidad es menos notable.

Tabla 3.1

Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las propiedades mecánicas del concreto con sustitución parcial de agregado fino por PET, CCA y caucho.

	Días de curado	Resistencia a la compresión			Resistencia a la tracción		Módulo de elasticidad
		3	7	28	7	28	28
PET	F Values	4.593	28.525	71.251	0.652	3.230	9.72324
	P-values	0.087	0.004	0.001	0.622	0.143	0.02615
Caucho triturado	F Values	89.896	11.510	111.039	197.142	23.611	2.51763
	P-values	0.000	0.019	0.000	0.000	0.005	0.19686
Cenizas de cascarilla de arroz	F Values	312.520	136.653	154.006	105.728	1355.696	18.42400
	P-values	0.0000	0.0002	0.0001	0.000	0.000	0.00834

3.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Figura 3.7 presenta micrografías SEM con aumentos de 1000× y 5000×, que permiten evaluar la interacción entre los materiales reciclados y la matriz cementosa, con especial atención a la zona de transición interfacial (ZTI).

En el hormigón con PET (Figura 3.7a), la ZTI se caracteriza por una estructura porosa y poco compacta, atribuida a la baja fricción superficial y a la forma irregular del PET frente a la arena natural (Askar et al., 2023). Además, el mayor tamaño de partícula empleado genera zonas de débil adherencia, favoreciendo la formación de vacíos en la interfaz (Spósito et al., 2020). Esta

microestructura deficiente explica la reducción progresiva en la resistencia a compresión y tracción a partir del 5 % de sustitución (Figuras 3.4 y 3.5), debido al debilitamiento de la matriz cementante.

En las mezclas con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) (Figura 3.7b), la ZTI se observa más densa y cohesionada, atribuida a su alto contenido de sílice amorfa, que reacciona con el Ca(OH)_2 para formar geles C-S-H, refinando la microestructura (Sandhu & Siddique, 2017). Aunque la morfología de la CCA es porosa, esta geometría favorece el anclaje físico y la formación de productos de hidratación secundarios. Esto justifica que, a bajos porcentajes de sustitución, las mezclas con CCA mantengan o incluso mejoren la resistencia a compresión y tracción (Figuras 3.4 y 3.5).

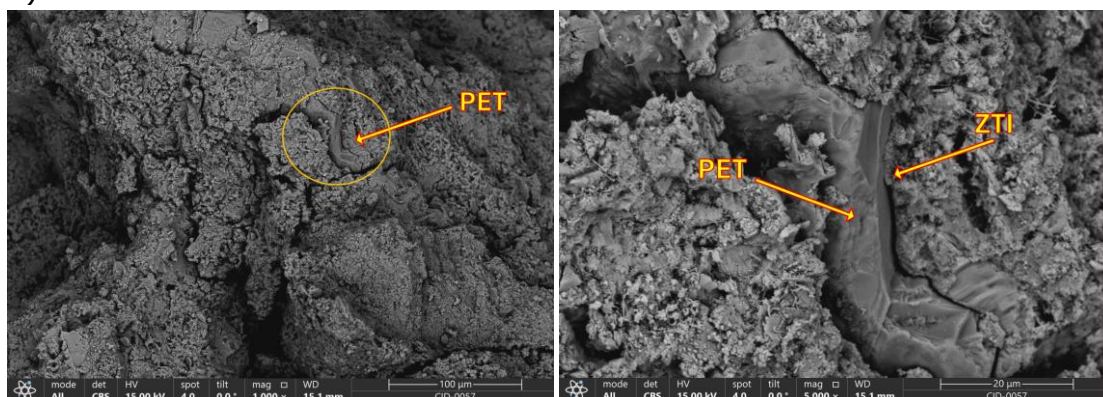
En el caso del caucho (Figura 3.7 c), la ZTI es la menos definida entre los tres materiales, presentando discontinuidades y separación parcial respecto a la matriz, atribuibles a su naturaleza hidrófoba y superficie lisa (Siddika et al., 2019). Estas características favorecen la formación de huecos y micro fisuras, reduciendo la cohesión estructural y justificando la significativa disminución de la resistencia a compresión (Figura 3.4). No obstante, la elasticidad del caucho permite que el módulo de elasticidad se vea menos afectado (Figura 3.6), ya que parte de la energía aplicada se disipa por deformación controlada.

En conjunto, los resultados SEM correlacionan la microestructura con el desempeño mecánico: la porosidad y baja adherencia del PET y el caucho explican la pérdida de resistencia, mientras que la densificación de la matriz con CCA respalda su mejor respuesta mecánica, particularmente en bajos niveles de sustitución.

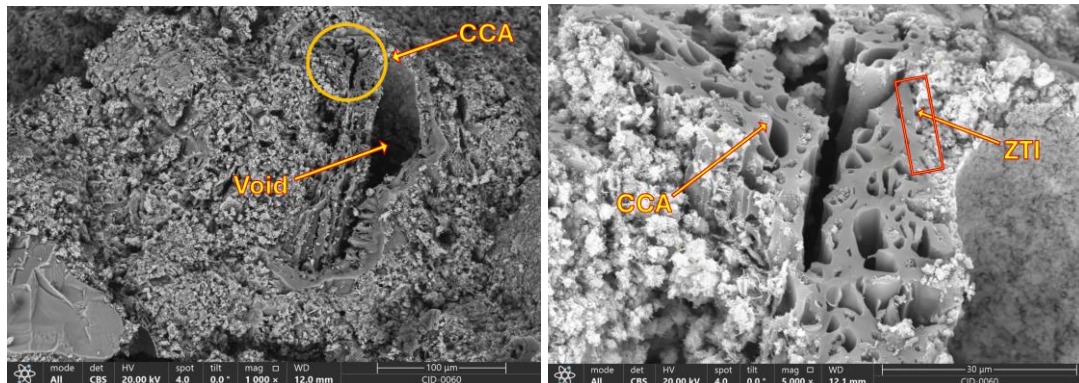
Figura 3.7

Imágenes SEM de la microestructura del concreto con sustitución de agregados finos por materiales reciclados, a aumentos de 1000x y 8000x: (a) PET; (b) CCA; (c) Caucho triturado. Se observa alta porosidad con PET, refinamiento de la matriz con CCA y pobre adherencia del caucho con la pasta cementante.

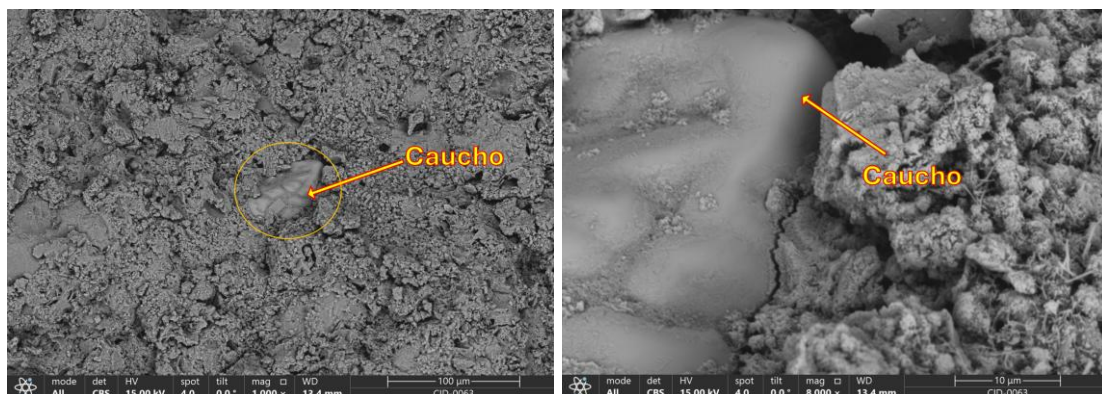
a)



b)



c)



3.5 Análisis Termogravimétrico

La figura 3.8 muestra las curvas TGA para los tres tipos de sustitutos, en la que se evidencia un deceso de masa según incrementa la temperatura, pero esta varía significativamente de acuerdo al porcentaje y tipo de material reciclado. Según Villain et al., (2007), la descomposición térmica de fases hidratadas del cemento, como la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ocurre entre 430–530 °C, rango que permite su identificación y cuantificación mediante análisis TGA. Asimismo, este método distingue entre diferentes formas de carbonatos de calcio: la calcita, que se descompone entre 760–950 °C, y los productos de carbonatación del C-S-H, como la vaterita y la aragonita, que lo hacen entre 530–760 °C. En torno a 100 °C, todas las mezclas registraron un pequeño pico endotérmico acompañado de una ligera pérdida de masa, atribuida a la deshidratación inicial de productos como ettringita y C-S-H (Pico-Moliner et al., (2025); C. Wang et al., (2024)).

En las mezclas con PET, la mayor pérdida de masa se observó entre 400–500 °C (Figura 3.8 a), asociada a la descomposición térmica del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y a la degradación principal del polímero PET,

en la que se rompen enlaces moleculares y se liberan compuestos volátiles. Este comportamiento concuerda con Pereira et al., (2017), quienes reportan la degradación más rápida del PET alrededor de 434 °C. Las mezclas con PET mostraron pérdidas de masa más elevadas que las de CCA y caucho, sin seguir una tendencia lineal con el porcentaje de sustitución: el mayor valor se registró con 5 % de reemplazo, patrón similar al descrito por Aziz et al. (2021). Esta menor estabilidad térmica, junto con la porosidad y baja adherencia observadas en SEM, explica la reducción progresiva de resistencia a compresión y tracción desde el 5 % de sustitución (Figuras 3.4 y 3.5).

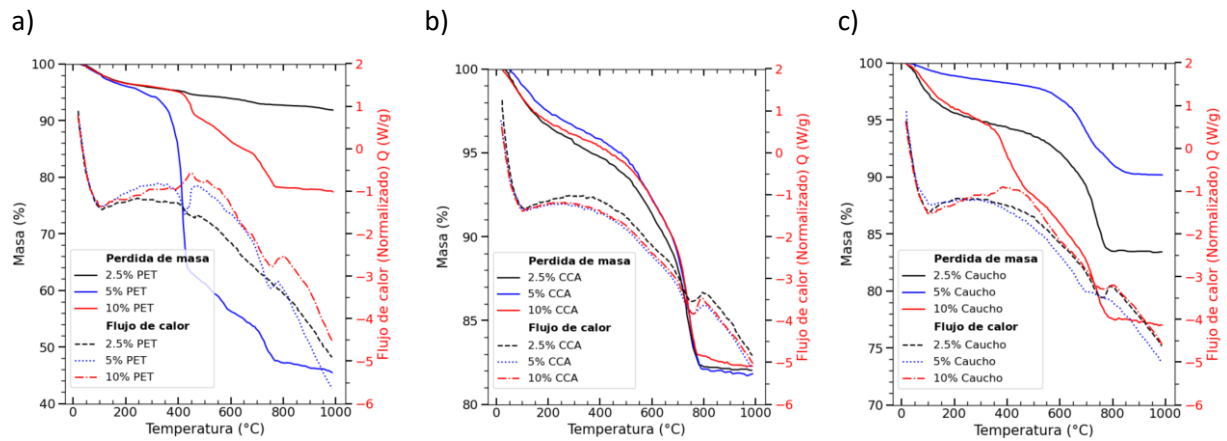
En el caso de CCA, las mayores pérdidas de masa se produjeron entre 600–800 °C (Figura 3.8 b), atribuibles principalmente a la descomposición de carbonatos cálcicos (Abolhasani et al., 2022). Las curvas TGA mostraron un comportamiento más homogéneo entre los tres porcentajes evaluados, lo que sugiere una mejor compatibilidad química con los productos de hidratación, favorecida por su alto contenido de sílice amorfa y elevada superficie específica (Liu et al., 2024). Esta mayor estabilidad térmica se relaciona directamente con la mejor conservación de la resistencia mecánica observada en las mezclas con bajos porcentajes de CCA, coherente con la microestructura más compacta evidenciada en SEM (Figura 3.7b).

Para el caucho, la pérdida de masa se concentró entre 400–800 °C (Figura 3.8 c), siendo más pronunciada con 10 % de sustitución, donde la degradación comenzó cerca de 400 °C, en concordancia con Muhammad et al., (2011). Con 2.5 % y 5 %, la degradación principal ocurrió entre 500–600 °C, lo que sugiere que un mayor contenido acelera la descomposición térmica, mientras que menores proporciones, al estar mejor embebidas en la matriz, retrasan el inicio de la degradación (Jing et al., 2024). Esta inestabilidad térmica y la débil adherencia interfacial observada en SEM explican la significativa disminución de la resistencia a compresión (Figura 3.4). Sin embargo, debido a la elasticidad inherente del caucho, el módulo de elasticidad se ve menos afectado (Figura 3.6), ya que parte de la energía aplicada se disipa por deformación controlada.

En conjunto, los resultados de TGA permiten correlacionar la estabilidad térmica con el desempeño mecánico: la CCA mostró el mejor comportamiento gracias a su interacción química con la matriz cementante; el PET y el caucho, en cambio, presentaron mayores pérdidas de masa y menor resistencia térmica, lo que, sumado a la porosidad y discontinuidades observadas en SEM, justifica la disminución de propiedades mecánicas en altos porcentajes de sustitución.

Figura 3.8

Perfiles TGA de las mezclas de concreto que contienen: a) PET, b) CCA y c) Caucho triturado. El PET presenta mayores pérdidas de masa mientras que las CCA muestra una estabilidad térmica más homogénea



Capítulo 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Revenimiento

La incorporación de ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del agregado fino reduce considerablemente la trabajabilidad del concreto, lo cual se atribuye a su alta porosidad y capacidad de absorción.

A porcentajes del 5% o más de CCA, es necesario ajustar la relación agua/cemento para recuperar el asentamiento deseado.

Por otro lado, tanto el PET reciclado como el caucho de neumático mostraron mínimo impacto sobre el asentamiento, incluso a niveles del 10%, sin requerir variaciones en la dosificación de agua. Estos resultados evidencian que la elección del material reciclado influye directamente en el comportamiento del concreto en estado fresco y puede determinar la necesidad de ajustes en la mezcla.

Contenido de aire

El análisis del contenido de aire en mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado fino por materiales reciclados mostró variaciones según el tipo de material. La ceniza de cascarilla de arroz (CCA) incrementó el contenido de aire al 2.5 % debido a su porosidad, aunque disminuyó en mayores sustituciones por el aumento de la fluidez. El caucho reciclado elevó progresivamente el aire atrapado desde el 5 %, alcanzando un 56 % al 10 %, asociado a su baja densidad y carácter hidrofóbico. El PET presentó el mayor efecto, con un incremento del 131 % al 10 %, por su rigidez y escasa adherencia.

Densidad

El uso de materiales reciclados como sustitutos parciales del agregado fino reduce la densidad del hormigón fresco, siendo este efecto más notorio a niveles de reemplazo del 10%. Esta disminución está directamente relacionada con la densidad propia de los materiales incorporados, lo cual puede influir favorablemente en la fabricación de elementos de concreto más livianos, con beneficios potenciales en aplicaciones estructurales donde se requiera una reducción de cargas muertas.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón disminuye con el aumento en la sustitución del agregado fino por materiales reciclados. Si bien niveles bajos de reemplazo pueden mantener o incluso mejorar la rigidez, sustituciones superiores al 5 % tienden a comprometer esta propiedad. El caucho de neumático se perfila como el material más estable en términos de rigidez, mientras

que la ceniza de cascarilla de arroz y el PET muestran reducciones significativas, especialmente a mayores proporciones de reemplazo.

Resistencia a la compresión

Los resultados evidencian que la sustitución parcial del agregado fino con ceniza de cascarilla de arroz (CCA), PET reciclado y caucho de neumáticos afecta de manera significativa la resistencia a la compresión del hormigón, dependiendo del material y el porcentaje de reemplazo. Las CCA mostraron el mejor desempeño a largo plazo, destacando al 2.5 %, donde la resistencia a 28 días fue similar a la del concreto de control gracias a su carácter puzolánico, que densifica la microestructura. Sin embargo, al aumentar al 5 % y 10 %, la resistencia disminuyó por el incremento en la relación agua/cemento requerido. El PET presentó buen comportamiento en edades tempranas, especialmente a los 3 días, aunque en porcentajes mayores generó pérdidas de resistencia debido a su baja adherencia a la matriz cementicia. El caucho fue el material con el desempeño más desfavorable, ya que su baja densidad, elasticidad y carácter hidrofóbico debilitaron la zona de transición interfacial y redujeron la resistencia global.

Resistencia a la tracción

Los resultados evidencian que todos los materiales reciclados generan una reducción en la resistencia a la tracción del hormigón, aunque con distintos comportamientos a corto y largo plazo. La ceniza de cascarilla de arroz demostró ser la alternativa más viable, particularmente con una tasa de sustitución del 2.5 % y 5 %, ya que a los 28 días presentó una recuperación significativa de resistencia. Esta evolución positiva con el tiempo está asociada al desarrollo de reacciones puzolánicas, que densifican la microestructura del hormigón.

En cambio, el PET mostró un comportamiento más favorable en edades tempranas, pero su efecto negativo se acentuó a 28 días. Esto sugiere que su incorporación podría ser útil en elementos que requieren resistencia inicial, aunque comprometería el desempeño estructural a largo plazo. Por su parte, el caucho reciclado fue el material que generó mayores pérdidas tanto a 7 como a 28 días, debido a su baja compatibilidad con la matriz cementicia y su efecto en la hidratación.

Por tanto, la elección del material y el porcentaje de sustitución deben ser cuidadosamente seleccionados de acuerdo con los requerimientos estructurales del proyecto. Para aplicaciones no estructurales o con menor exigencia mecánica, puede considerarse el uso de caucho o PET con tasas bajas de reemplazo. En cambio, la ceniza de cascarilla de arroz se perfila como un sustituto más equilibrado entre sostenibilidad y desempeño técnico.

Análisis ANOVA

El análisis ANOVA confirma que el caucho y las cenizas tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia mecánica del hormigón desde las primeras edades, mientras que el PET muestra un impacto más moderado y estable. En resistencia a tracción, el PET no genera diferencias significativas, lo que lo posiciona como un material con comportamiento más

uniforme en esta propiedad, a diferencia del caucho y las cenizas. Finalmente, en el módulo de elasticidad, el PET y las cenizas sí muestran una dependencia significativa del porcentaje de sustitución, lo que debe considerarse en diseños estructurales donde la rigidez sea crítica.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis por microscopía electrónica de barrido mostró variaciones notables en la ZTI de los concretos con materiales reciclados. El PET presentó una interfaz más porosa y menos compacta, asociada a su baja compatibilidad química y menor fricción superficial, lo que favoreció vacíos y explicó la reducción de propiedades mecánicas. Las cenizas generaron una ZTI más densa y cohesionada gracias a su sílice amorfa, que forma gel C-S-H y mejora la cohesión pese a su porosidad. En contraste, el caucho exhibió la ZTI menos desarrollada, con escasa adhesión, aunque aportó tenacidad y mejor respuesta en el módulo de elasticidad.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis TGA evidenció que los materiales reciclados generan variaciones térmicas no lineales en las pérdidas de masa del hormigón. El PET presentó el mayor impacto, con pérdidas significativas entre 400–500 °C, asociadas a la descomposición de portlandita y del polímero. Las cenizas de cascarilla de arroz mostraron un comportamiento más estable y homogéneo, con pérdidas en 600–800 °C, lo que refleja su compatibilidad con la matriz cementicia. El caucho registró una degradación amplia en 400–800 °C, iniciando antes en altas sustituciones. En conclusión, la estabilidad térmica depende tanto del tipo y porcentaje de sustitución como de la interacción microestructural con la pasta de cemento.

4.2 Recomendaciones

En función de los resultados obtenidos, se recomienda limitar los porcentajes de sustitución del agregado fino con materiales reciclados para equilibrar el desempeño mecánico, la trabajabilidad y la durabilidad. Para el PET, un reemplazo máximo del 5 % resulta óptimo, ya que permite mantener resistencias aceptables y un buen desarrollo inicial; sin embargo, es necesario controlar su influencia en la resistencia a tracción y la estabilidad térmica. Además, se sugiere explorar tratamientos superficiales que mejoren su adherencia a la matriz cementicia y reduzcan la formación de vacíos en la zona de transición interfacial. En el caso de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), se aconseja mantener sustituciones entre 2.5 % y 5 %, ya que en estos rangos

contribuye a una matriz más densa y estable térmicamente. Se recomienda controlar la relación agua/cemento y estandarizar la calcinación para maximizar su reactividad puzolánica. Además del uso de aditivos para evitar la pérdida de trabajabilidad en las mezclas con CCA.

Respecto al caucho de neumáticos, se recomienda limitar su uso al 5 % en aplicaciones donde prime la absorción de energía y elasticidad, evitando comprometer excesivamente la resistencia mecánica.

Finalmente, la elección del material reciclado debe adecuarse al tipo de sollicitación: la ceniza es más idónea en ambientes térmicamente exigentes, el PET en desarrollos de resistencia temprana y el caucho en elementos no portantes o con requerimientos de amortiguamiento.

Referencias

- Abellan-Garcia, J., Abbas, Y. M., Khan, M. I., & Pellicer-Martínez, F. (2024). ANOVA-guided assessment of waste glass and limestone powder influence on ultra-high-performance concrete properties. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03231. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03231>
- Abolhasani, A., Samali, B., & Aslani, F. (2022). Rice Husk Ash Incorporation in Calcium Aluminate Cement Concrete: Life Cycle Assessment, Hydration and Strength Development. *Sustainability*, 14(2), 1012. <https://doi.org/10.3390/su14021012>
- ACI 211.1-91. (n.d.). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- Alava, D., & Cevallos, E. (2014). *HORMIGONES*. <https://hormigonesfau.blogspot.com/2014/12/el-cono-de-abrams.html>
- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Mohamed, A. M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4631–4643. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090>
- Alzubi, Y., & Al Adwan, J. (2022). OVERVIEW OF RECYCLING RUBBER TIRE AS AGGREGATES IN CONCRETE: AN APPROACH FOR SOLID WASTE MANAGEMENT. *Journal of Engineering & Technological Advances*, 7(2). <https://doi.org/10.35934/segi.v7i2.54>
- 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 (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043085>
- Arguello, J., Salazar, D., & Muñoz, J. (2023). INEC. *Gestión de Residuos Sólidos 2022.Documento Metodológico*.
- Askar, M. K., Al-Kamaki, Y. S. S., & Hassan, A. (2023). Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review. *Polymers*, 15(15), 3320. <https://doi.org/10.3390/polym15153320>
- ASTM C138. (2017). *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content*

(Gravimetric) of Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C143. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.*

ASTM C231. (2022). *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.*

ASTM C33/C33M. (2018). *Specification for Concrete Aggregates. ASTM International.*
https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18

ASTM C39. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.*

ASTM C469. (2022). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.*

ASTM D448-12. (2022). *Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. ASTM International.* <https://doi.org/10.1520/D0448-12R22>

Aziz, S. Q., Ismael, S. O., & Omar, I. A. (2023). New Approaches in Solid Waste Recycling and Management in Erbil City. *Environmental Protection Research*, 1–13.
<https://doi.org/10.37256/epr.3120231758>

Bakhtiari Ghaleh, M., Asadi, P., & Eftekhari, M. R. (2022). Enhancing mechanical performance of waste tire concrete with surface double pre-coating by resin and micro-silica. *Journal of Building Engineering*, 50, 104084. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104084>

Baykara, H., Riofrio, A., Garcia-Troncoso, N., Cornejo, M., Tello-Ayala, K., Flores Rada, J., & Caceres, J. (2024). Chitosan-Cement Composite Mortars: Exploring Interactions, Structural Evolution, Environmental Footprint and Mechanical Performance. *ACS Omega*, 9(23), 24978–24986.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02040>

Bheel, N., Meghwar, S. L., Abbasi, S. A., Marwari, L. C., Muger, J. A., & Abbasi, R. A. (2018). Effect of Rice Husk Ash and Water-Cement Ratio on Strength of Concrete. *Civil Engineering Journal*, 4(10),

2373. <https://doi.org/10.28991/cej-03091166>

Chinchillas-Chinchillas, M. J., Rosas-Casarez, C. A., Arredondo-Rea, S. P., Gómez-Soberón, J. M., & Corral-Higuera, R. (2019). SEM image analysis in permeable recycled concretes with silica fume. A quantitative comparison of porosity and the ITZ. *Materials*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/ma12132201>

Choi, Y., Kim, I.-H., Lim, H.-J., & Cho, C.-G. (2022). Investigation of Strength Properties for Concrete Containing Fine-Rubber Particles Using UPV. *Materials*, 15(10), 3452. <https://doi.org/10.3390/ma15103452>

Chou, L. H., Lu, C.-K., Chang, J.-R., & Lee, M. T. (2007). Use of waste rubber as concrete additive. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 25(1), 68–76. <https://doi.org/10.1177/0734242X07067448>

Farzadkia, M., Mahvi, A. H., Norouzian Baghani, A., Sorooshian, A., Delikhoon, M., Sheikhi, R., & Ashournejad, Q. (2021). Municipal solid waste recycling: Impacts on energy savings and air pollution. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 71(6), 737–753. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1883770>

Franus, W., Panek, R., & Wdowin, M. (2015). *SEM Investigation of Microstructures in Hydration Products of Portland Cement* (pp. 105–112). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16919-4_14

Garcia-Troncoso, N., Acosta-Calderon, S., Flores-Rada, J., Baykara, H., Cornejo, M. H., Riofrio, A., & Vargas-Moreno, K. (2023). Effects of Recycled Rubber Particles Incorporated as Partial Sand Replacement on Fresh and Hardened Properties of Cement-Based Concrete: Mechanical, Microstructural and Life Cycle Analyses. *Materials*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/ma16010063>

Hasan-Ghasemi, A., & Nematzadeh, M. (2021). Tensile and compressive behavior of self-compacting concrete incorporating PET as fine aggregate substitution after thermal exposure: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*, 289, 123067. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123067>

Holcim Ecuador. (2022). *Ficha técnica: Cemento Premium Tipo HE*.

- Huang, H., Gao, X., Wang, H., & Ye, H. (2017). Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.155>
- Huang, J., Zou, C., Sun, D., Yang, B., & Yan, J. (2021). Effect of recycled fine aggregates on alkali-activated slag concrete properties. *Structures*, 30, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.064>
- Huang, X., Yue, T., Zhang, J., & Zhang, J. (2024). Experimental Research on the Impact Resistance Mechanical Properties and Damage Mechanism of Rubberized Concrete under Freeze–Thaw Cycling. *Journal of Composites Science*, 8(3), 87. <https://doi.org/10.3390/jcs8030087>
- INEC. (2023). Gestión de residuos sólidos 2022 [dataset]. *Estadística de Información Ambiental Económica En Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/>
- Jing, Y., Zhang, C., Lin, G., Niu, Y., & Zhao, M. (2024). Studies on the mechanical properties of rubber concrete reinforced with high-temperature stirred pretreated waste rubber particles. *Construction and Building Materials*, 440, 137516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137516>
- Khan, A. H., Sharholly, M., Alam, P., Al-Mansour, A. I., Ahmad, K., Kamal, M. A., Alam, S., Pervez, M. N., & Naddeo, V. (2022). Evaluation of cost benefit analysis of municipal solid waste management systems. *Journal of King Saud University - Science*, 34(4). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101997>
- Kumar, S., Singh, B. K., & Pandey, V. K. (2018). Impact of Rice Husk Ash on Cement Concrete. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, Volume-2(Issue-3), 1786–1790. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd11558>
- Lin, J., Tian, B., Liang, Z., Hu, E., Liu, Z., Wang, K., & Sang, T. (2024). Impact of Water–Cement Ratio on Concrete Mechanical Performance: Insights into Energy Evolution and Ultrasonic Wave Velocity. *Materials*, 17(15), 3651. <https://doi.org/10.3390/ma17153651>
- Liu, B., Wang, S., Jia, W., Ying, H., Lu, Z., & Hong, Z. (2024). The Effect of RHA as a Supplementary Cementitious Material on the Performance of PCM Aggregate Concrete. *Buildings*, 14(7), 2150.

<https://doi.org/10.3390/buildings14072150>

- Meddah, M. S., Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M., Manigandan, S., & Arunachalam, R. (2020). Mechanical and microstructural characterization of rice husk ash and Al₂O₃ nanoparticles modified cement concrete. *Construction and Building Materials*, 255, 119358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119358>
- Miah, M. J., Huaping, R., Paul, S. C., Babafemi, A. J., Sharma, R., & Jang, J. G. (2023). Performance of eco-friendly concrete made from recycled waste tire fine aggregate as a replacement for river sand. *Structures*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105463>
- Muhammad, B., Ismail, M., Haron, Z., & Ali Yussuf, A. (2011). Elastomeric Effect of Natural Rubber Latex on Compressive Strength of Concrete at High Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12), 1697–1702. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000338)
- Neghabat Shirazi, B., Almutlaqah, A., Balzano, B., & Maddalena, R. (2024). Agricultural Waste as a Cementitious Material — Rice Husk Ash. *Proceedings of the Cardiff University Engineering Research Conference 2023*, 48–51. <https://doi.org/10.18573/conf1.1>
- NTE INEN 2380. (2011). *Cementos Hidráulicos - Requisitos de Desempeño, Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- Nursyamsi, N., & Febrizal Aruan, A. (2021). Application of rice husk ash in high strength concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1122(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1122/1/012013>
- Padhi, R. S., Patra, R. K., Mukharjee, B. B., & Dey, T. (2018). Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.270>
- Pereira, A. P. dos S., Silva, M. H. P. da, Lima Júnior, É. P., Paula, A. dos S., & Tommasini, F. J. (2017). Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete Waste. *Materials Research*, 20(suppl 2), 411–420. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0734>
- Pico-Molineros, A., García-Troncoso, N., Flores-Rada, J., & Bompa, D. V. (2025). Effects of sodium

- tripolyphosphate on the rheological properties of concrete: Mechanical, microstructural and carbon footprint. *Results in Engineering*, 25, 103869. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103869>
- Qaidi, S., Al-Kamaki, Y., Hakeem, I., Dulaimi, A. F., Özkılıç, Y., Sabri, M., & Sergeev, V. (2023). Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1101146>
- S.K., K., Singh, S. K., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122089. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122089>
- Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 153, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165>
- Sharma, K. D., & Jain, S. (2020). Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. *Social Responsibility Journal*, 16(6), 917–948. <https://doi.org/10.1108/SRJ-06-2019-0210>
- Siddika, A., Mamun, M. A. Al, Alyousef, R., Amran, Y. H. M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711–731. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
- Singh, A., Miao, X., Zhou, X., Deng, Q., Li, J., Zou, S., & Duan, Z. (2023). Use of recycled fine aggregates and recycled powders in sustainable recycled concrete. *Journal of Building Engineering*, 77, 107370. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107370>
- Singh, S., & Shukla, D. A. (2023). Effect of Rice Husk Ash on the Properties of Concrete. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(10), 1056–1062. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.56100>
- Sinha, V., Patel, M. R., & Patel, J. V. (2010). Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(1), 8–25. <https://doi.org/10.1007/s10924-008-0106-7>

- Spósito, F. A., Higuti, R. T., Tashima, M. M., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Assunção, C. C., Bortoletto, M., Silva, R. G., & Fioriti, C. F. (2020). Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime. *Journal of Building Engineering*, 32, 101506. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101506>
- Stanley, C. (2011). *THE USE AND ABUSE OF THE SLUMP TEST FOR MEASURING THE WORKABILITY OF CONCRETE*.
- Stratoura, M. C., Lazari, G. E. D., Badogiannis, E. G., & Papadakis, V. G. (2023). Perlite and Rice Husk Ash Re-Use As Fine Aggregates in Lightweight Aggregate Structural Concrete—Durability Assessment. *Sustainability (Switzerland)*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15054217>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>
- Villain, G., Thiery, M., & Platret, G. (2007). Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1182–1192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015>
- Vivek, S., Hari Krishna, P., & Gunneswara Rao, T. D. (2023). A study on the mechanical behavior of concrete made with partial replacement of fine aggregate with waste plastic (LDPE). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.059>
- Wang, C., Chazallon, C., Braymand, S., & Horny, P. (2024). Thermogravimetric analysis (TGA) for characterization of self-cementation of recycled concrete aggregates in pavement. *Thermochimica Acta*, 733, 179680. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179680>
- Wang, Y., Peng, Y., Kamel, M. M. A., & Gong, L. (2020). Modeling interfacial transition zone of RAC based on a degenerate element of BFEM. *Construction and Building Materials*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119063>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical

properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 73–81.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>

Zega, C. J., Sosa, M. E., & Maio, A. A. Di. (2017). *HORMIGONES RECICLADOS: UNA ALTERNATIVA PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE*.

Zeyad, A. M., Bayraktar, O. Y., Tayeh, B. A., Öz, A., Özkan, İ. G. M., & Kaplan, G. (2024). Impact of rice husk ash on physico-mechanical, durability and microstructural features of rubberized lightweight geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, 427(March).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136265>