

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v9i17.0325>

ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN CON AGREGADOS RECICLADOS DE ADOQUINES IBARRA – ECUADOR

ESTIMATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES FROM PAVING STONES IBARRA – ECUADOR

Guano-Zambrano Margarita Paulina ¹; Gaibor-Lombeida Aurelia Magaly ²;
Escorza-Troya Daniel Fernando ³; Rivera-Bolaños Miguel Eduardo ⁴;
Beltrán-Romero Raúl Eduardo ⁵; Pinto-Villalva Jorge Lucas ⁶

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador.
Correo: mpguano@pucesi.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8534-8390>

² Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador.
Correo: amgaibor@pucesi.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5614-7049>

³ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador.
Correo: dfescorza@pucesi.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7562-7591>

⁴ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador.
Correo: meriverabo@pucesi.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-1199-2115>

⁵ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador.
Correo: rebeltranr@pucesi.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-0087-6911>

⁶ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador.
Correo: jlpintov@pucesi.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-8404-0769>

Resumen

Esta investigación experimental descriptiva tuvo como objetivo desarrollar una ecuación para determinar el módulo de elasticidad en hormigón estructural de 240 kg/cm², incorporando agregados reciclados provenientes de adoquines de desecho de la ciudad de Ibarra, Ecuador. Motivada por la gestión inadecuada de residuos y la necesidad de ajustar las normativas a materiales locales, la metodología incluyó la caracterización de materiales y el diseño de mezclas bajo normas INEN y ASTM, sustituyendo el agregado fino en porcentajes del 4%, 8% y 12%. Los ensayos realizados a los 28 días demostraron una relación directa entre el nivel de sustitución y el comportamiento elástico, permitiendo formular ecuaciones empíricas que resultaron ser más precisas que la propuesta estándar del ACI 318-19, la cual mostró limitaciones para estos materiales específicos. Finalmente, se concluyó que la incorporación de hasta un 12% de material reciclado es técnicamente viable sin comprometer la resistencia a la compresión, validando así una herramienta de cálculo que favorece el diseño sostenible y la valorización de residuos de construcción en el contexto regional.

Palabras clave: Hormigón estructural, módulo de elasticidad, agregados reciclados, adoquines de desecho, diseño sostenible, valorización de residuos.

Abstract

This descriptive experimental research aimed to develop an equation to determine the modulus of elasticity for structural concrete with a compressive strength of 240 kg/cm² incorporating recycled aggregates from waste pavers in Ibarra, Ecuador. Driven by the environmental issues regarding inadequate waste management and the need to adapt regulatory equations to local materials, the methodology involved material characterization and mix design following INEN and ASTM standards, substituting fine aggregate at percentages of 4%, 8%, and 12%. Tests conducted at 28 days demonstrated a direct relationship between the substitution level and elastic

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 13 de octubre de 2025.

Fecha de aceptación: 17 de diciembre de 2025.

Fecha de publicación: 12 de enero de 2026.



behavior, enabling the formulation of empirical equations that proved more accurate than the standard ACI 318-19 proposal, which exhibited limitations for these specific materials. Ultimately, it was concluded that incorporating up to 12% of recycled material is technically feasible without compromising compressive strength, validating a calculation tool that supports sustainable structural design and the valorization of construction waste in the regional context.

Keywords: Structural concrete, modulus of elasticity, recycled aggregates, waste pavers, sustainable design, waste valorization.

1. Introducción

El hormigón es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, con un consumo anual que supera los 10 mil millones de toneladas métricas, lo que lo convierte en un componente esencial para el desarrollo de infraestructuras modernas (Meyer, 2009). Sin embargo, su elevada demanda implica una explotación intensiva de recursos naturales no renovables, particularmente agregados pétreos, así como la generación significativa de residuos derivados de procesos constructivos, demoliciones y actividades de control de calidad en laboratorio. Esta problemática ha impulsado, en las últimas décadas, la búsqueda de alternativas sostenibles orientadas a la reutilización de residuos y a la reducción del impacto ambiental asociado a la industria de la

construcción (Etxeberria et al., 2007).

En el contexto ecuatoriano, y específicamente en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura, la gestión de residuos de construcción presenta deficiencias notables. Entre estos residuos se encuentran los restos de adoquines y fragmentos de probetas de hormigón generados durante ensayos de laboratorio, los cuales, en muchos casos, son dispuestos de manera inadecuada en botaderos informales, cuerpos de agua o rellenos sanitarios sin tratamiento técnico previo. Esta práctica no solo contribuye a la degradación ambiental, sino que también representa una pérdida de materiales con potencial de reutilización dentro de nuevos procesos productivos del hormigón, en contraposición a los principios de economía circular promovidos en la

ingeniería contemporánea (Etxeberria et al., 2007).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de agregados reciclados en el hormigón puede constituir una alternativa técnica y ambientalmente viable, siempre que se controle adecuadamente su origen, procesamiento y porcentaje de sustitución (Hansen, 1986; Mehta & Monteiro, 2014). No obstante, la reutilización de agregados reciclados introduce modificaciones en la microestructura del material compuesto, principalmente debido a la presencia de mortero adherido, mayor porosidad y variabilidad granulométrica, lo que puede afectar de manera significativa sus propiedades mecánicas, en particular el módulo de elasticidad (Rahal, 2007; Yang et al., 2011).

El módulo de elasticidad es una propiedad mecánica fundamental del hormigón estructural, ya que controla su rigidez y su comportamiento frente a deformaciones elásticas bajo carga. Esta propiedad es determinante en el cálculo de flechas, redistribución de esfuerzos y análisis de rigidez lateral de estructuras, por lo que una estimación imprecisa puede

conducir a diseños no conservadores o a una subestimación de las deformaciones reales en servicio (ACI, 2019). Las normativas internacionales, como el ACI 318-19, proponen ecuaciones empíricas que relacionan el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión; sin embargo, dichas formulaciones fueron desarrolladas a partir de bases de datos experimentales obtenidas con materiales típicos de Estados Unidos, cuyas características geológicas y mecánicas difieren significativamente de los materiales disponibles en regiones como América Latina (ACI, 2019).

Estudios realizados en países latinoamericanos han evidenciado discrepancias sustanciales entre los valores del módulo de elasticidad calculados mediante las ecuaciones normativas del ACI y los valores obtenidos experimentalmente utilizando agregados locales, tanto naturales como reciclados (Silva et al., 2016). Esta situación se agrava cuando se incorporan agregados reciclados, ya que las ecuaciones normativas no consideran explícitamente la influencia del porcentaje de sustitución ni las

particularidades físicas de estos materiales. En consecuencia, el uso directo de dichas ecuaciones puede generar sobreestimaciones significativas del módulo de elasticidad, comprometiendo la seguridad y el desempeño estructural de los elementos diseñados.

A pesar del creciente interés en el uso de agregados reciclados, existe una limitada cantidad de estudios enfocados específicamente en el desarrollo de ecuaciones locales del módulo de elasticidad para hormigones elaborados con agregados reciclados provenientes de residuos de laboratorio, particularmente en el contexto ecuatoriano. Esta carencia de modelos experimentales ajustados a las condiciones locales constituye una barrera técnica para la incorporación de estos materiales sostenibles en el diseño estructural y para su eventual inclusión en normativas nacionales.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar experimentalmente la influencia de la incorporación de agregados reciclados de adoquines, en porcentajes de sustitución del 4%,

8% y 12% del agregado fino natural, sobre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón estructural con resistencia especificada $f'_c = 24$ MPa, elaborado con materiales de la provincia de Imbabura, Ecuador. A partir de los resultados obtenidos, se propone el desarrollo de ecuaciones experimentales específicas para la estimación del módulo de elasticidad, y se realiza una comparación directa con la ecuación propuesta por el ACI 318-19, con el fin de evidenciar las diferencias y analizar sus implicaciones para el diseño estructural.

2. Metodología

Enfoque y diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, cuantitativo y comparativo, orientado a analizar el efecto de la incorporación de agregados reciclados sobre el comportamiento mecánico del hormigón estructural, con énfasis en la variación del módulo de elasticidad estático. El diseño experimental se estructuró para garantizar la comparabilidad directa entre una mezcla de referencia y

mezclas modificadas, manteniendo constantes los parámetros de dosificación y controlando exclusivamente el porcentaje de sustitución del agregado fino natural por agregado reciclado.

Selección y origen de los materiales

Se empleó cemento Portland Tipo I, conforme a ASTM C150, seleccionado por su uso generalizado en hormigón estructural en el Ecuador. Los agregados naturales (fino y grueso) procedieron de la mina Punto Azul, localizada en la provincia de Imbabura, fuente representativa de los materiales utilizados en proyectos estructurales de la región norte del país.

El agregado reciclado se obtuvo a partir de residuos sólidos generados durante ensayos de control de calidad en laboratorio, específicamente fragmentos de adoquines y probetas de hormigón estructural previamente ensayadas. Este origen garantiza la homogeneidad del material reciclado, una condición fundamental para reducir la

variabilidad experimental y asegurar la trazabilidad del residuo reutilizado.

Procesamiento del agregado reciclado

Los residuos de hormigón fueron sometidos a un proceso de trituración mecánica controlada, seguido de tamizado y clasificación granulométrica, con el objetivo de obtener partículas con dimensiones equivalentes al agregado fino natural. Este procedimiento permitió minimizar la influencia de variaciones granulométricas en el comportamiento del hormigón y aislar el efecto del agregado reciclado sobre el módulo de elasticidad. El agregado reciclado fue acondicionado previamente al mezclado para considerar su mayor absorción, característica inherente a materiales reciclados con mortero adherido.

Caracterización física de los agregados

Con el fin de verificar la idoneidad de los materiales y evaluar las diferencias entre agregados naturales y reciclados, se realizó una caracterización física completa de ambos tipos de agregados. Se

determinaron la distribución granulométrica, peso específico, absorción, peso volumétrico y resistencia al desgaste, conforme a las normas ASTM C136, ASTM C127, ASTM C128, ASTM C29 y ASTM C131. Esta caracterización permitió identificar variaciones asociadas al proceso de reciclaje y establecer su posible incidencia en las propiedades mecánicas del hormigón.

Diseño de mezclas de hormigón

Se diseñó una mezcla patrón de hormigón estructural con resistencia especificada $f'_c = 24$ MPa, valor representativo de aplicaciones estructurales comunes en edificaciones de la región. A partir de esta mezcla base, se elaboraron tres mezclas adicionales con sustituciones parciales del 4%, 8% y 12% del agregado fino natural por agregado reciclado.

La selección de estos porcentajes se fundamentó en estudios previos que indican que sustituciones bajas y moderadas permiten evaluar la viabilidad estructural del uso de agregados reciclados sin comprometer significativamente la resistencia mecánica del material.

En todas las mezclas se mantuvieron constantes la relación agua/cemento ($a/c = 0,62$), el contenido de cemento y el tamaño máximo nominal del agregado grueso, con el objetivo de aislar el efecto del agregado reciclado.

Generalidades

En esta sección se describe la metodología experimental aplicada para la caracterización de los materiales empleados en la investigación, así como los procedimientos normalizados utilizados en la elaboración y evaluación de las probetas de hormigón estructural. La adecuada caracterización de los agregados, tanto naturales como reciclados, constituye un aspecto esencial para asegurar la confiabilidad de los resultados experimentales y para establecer relaciones consistentes entre las propiedades de los materiales constituyentes y el comportamiento mecánico del hormigón producido (Mehta & Monteiro, 2014).

Los ensayos de caracterización se desarrollaron conforme a los lineamientos establecidos en las Normas Técnicas Ecuatorianas

(NTE INEN) y en las normas internacionales ASTM, garantizando la validez técnica y la comparabilidad de los resultados obtenidos con estudios similares reportados en la literatura especializada.

Caracterización de los agregados convencionales

Agregados naturales

Los agregados convencionales utilizados en el presente estudio fueron suministrados por la Mina Punto Azul, localizada en la provincia de Imbabura. Estos materiales, de origen natural, provienen de la roca madre y presentan características mineralógicas asociadas a formaciones volcánicas propias de la región, lo que explica su uso extendido en proyectos de infraestructura y edificación del sector.

El agregado fino corresponde a una arena natural compuesta por partículas que atraviesan el tamiz No. 4 (4,75 mm), mientras que el agregado grueso está conformado por partículas de mayor tamaño retenidas en dicho tamiz, de acuerdo con la clasificación establecida por ASTM International.

Material reciclado proveniente de adoquines

El material reciclado empleado en esta investigación estuvo constituido por fragmentos de adoquines de desecho, recolectados en distintos sectores de la ciudad de Ibarra. Estos adoquines, originalmente utilizados en pavimentos urbanos, fueron sometidos a un proceso de trituración manual controlada, con el propósito de obtener un agregado reciclado con una granulometría compatible con la del agregado fino convencional (Sánchez de Juan, 2004).

El proceso de obtención del agregado reciclado comprendió las siguientes etapas:

1. **Recolección selectiva:** Los adoquines fueron recuperados de escombreras autorizadas y zonas de demolición controladas, verificando previamente su procedencia y condiciones físicas generales.
2. **Limpieza preliminar:** Se eliminaron contaminantes superficiales, restos de mortero adherido, materiales orgánicos y partículas extrañas mediante cepillado y lavado con agua,

siguiendo recomendaciones establecidas en estudios previos (González Fonteboa, 2002).

3. Trituración manual: Los fragmentos de adoquines fueron reducidos de tamaño mediante herramientas de impacto, obteniéndose partículas de dimensiones variables.
4. Clasificación granulométrica: El material triturado fue sometido a un proceso de tamizado, seleccionando únicamente las fracciones que cumplieran con los requisitos dimensionales del agregado fino y descartando las partículas sobredimensionadas o excesivamente finas.

Ensayos de caracterización de agregados

Los ensayos de caracterización de los agregados naturales y reciclados se realizaron siguiendo estrictamente los procedimientos

establecidos en las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN y en las normas ASTM correspondientes, con el objetivo de evaluar sus propiedades físicas y verificar su aptitud para su uso en hormigón estructural.

A continuación, se presenta un resumen de los ensayos efectuados:

- Análisis granulométrico (ASTM C136)
- Determinación de densidad y absorción (ASTM C127 y ASTM C128)
- Peso unitario suelto y compactado (ASTM C29)
- Contenido de humedad (ASTM C566)
- Resistencia a la abrasión para agregado grueso (ASTM C131)
- Contenido de materia orgánica para agregado fino (ASTM C40)

3. Resultados y discusión

Tabla 1. Resultados de los Ensayos de Compresión para la Muestra Patrón (Relación a/c = 0.62)

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	MUESTRA PATRÓN			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-07-30	2025-07-30	2025-07-30	2025-07-30
Fecha de ensayo*	2025-08-27	2025-08-27	2025-08-27	2025-08-27
Edad (días)	28	28	28	28

Probeta N°:	1	2	3	4
Hora de ensayo*	10:00	10:15	10:30	10:45
Diámetro 1(mm)	151.87	152.04	152.23	151.80
Diámetro 2(mm)	151.98	152.14	152.36	151.60
Diámetro promedio (mm)	152.00	152.00	152.20	151.60
Relación entre diámetros (%)	0.07	0.07	0.09	0.13
Altura promedio (mm)	306.00	305.00	303.00	305.00
Relación H/D	2.01	2.01	1.99	2.01
Área (mm²)	18146	18146	18194	18050
Volumen (m³)	0.0056	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)	12.37	12.30	12.30	12.21
Peso Unitario (kg/m³)	2230	2220	2230	2220
Carga Máxima (KN)	480	473	465	478
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	26.45	26.07	25.56	26.48
Módulo de Elasticidad (Mpa)	16600.00	16700.00	16100.00	16700.00
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

Determinación del Módulo de Elasticidad

Fundamentación del Ensayo

El módulo de elasticidad representa la rigidez del material y su determinación se realizó conforme a la norma ASTM C469.

Cálculo del Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad se calculó mediante la expresión establecida en ASTM C469:

Donde:

E= Módulo de elasticidad (Mpa)

S2= Corresponde al 40% del esfuerzo último

S1= Esfuerzo producido en una deformación de 0.00005

ε_2 = Deformación longitudinal producida por S2

Ecuación 1. Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Tabla 2. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas de la muestra Patrón

	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (Mpa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)
MUESTRA PATRÓN	1	16600	169320	16525	168555
	2	16700	170340		
	3	16100	164220		
	4	16700	170340		

Fuente propia 2025

La Tabla 3 presenta los resultados experimentales del módulo de elasticidad correspondientes a la mezcla patrón, elaborada sin incorporación de agregado reciclado y con una relación agua/cemento de 0,62. El valor promedio obtenido para el módulo de elasticidad fue de 16 525 MPa, lo que refleja la rigidez característica del hormigón convencional producido con agregados naturales.

Este valor constituye la referencia base del estudio y permite establecer una comparación directa con las mezclas que incorporan agregado fino reciclado, facilitando la evaluación del efecto de la sustitución parcial del agregado natural sobre el comportamiento elástico del hormigón estructural.

Tabla 3. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 4%

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	4% de Material Reciclado			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-08-07	2025-08-07	2025-08-07	2025-08-07
Fecha de ensayo*	2025-09-04	2025-09-04	2025-09-04	2025-09-04
Edad (días)	28	28	28	28
Hora de ensayo*	10:15	10:30	10:45	11:00
Diámetro 1(mm)	151.88	151.76	151.80	151.79
Diámetro 2(mm)	151.98	151.94	152.25	151.60
Diámetro promedio (mm)*	152	151.80	152	151.6
Relación entre diámetros (%)	0.07	0.12	0.30	0.13
Altura promedio (mm)	306.00	304.00	305.00	305.00
Relación H/D	2.01	2.00	2.01	2.01

Probeta N°:	1	2	3	4
Área (mm ²)	18146	18098	18146	18050
Volumen (m ³)	0.0056	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)*	12.37	12.33	12.37	12.21
Peso Unitario (kg/m ³)*	2230	2240	2240	2220
Carga Máxima (KN)*	478	477.8	428.1	474.9
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	26.34	26.40	23.59	26.31
Módulo de Elasticidad (Mpa)	16600	16200	16600	16600
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

Tabla 4. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 8%

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	8% de Material Reciclado			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-08-12	2025-08-12	2025-08-12	2025-08-12
Fecha de ensayo*	2025-09-10	2025-09-10	2025-09-10	2025-09-10
Edad (días)	29	29	29	29
Hora de ensayo*	9:45	10:00	10:15	10:30
Diámetro 1(mm)	151.55	151.66	149.68	151.71
Diámetro 2(mm)	151.85	152.00	150.01	152.11
Diámetro promedio (mm)*	151.60	151.80	150	152.0
Relación entre diámetros (%)	0.20	0.22	0.22	0.26
Altura promedio (mm)*	305.00	305.00	304.00	305.00
Relación H/D	2.01	2.01	2.03	2.01
Área (mm ²)	18050	18098	17624	18146
Volumen (m ³)	0.0055	0.0055	0.0054	0.0055
Masa (kg)*	12.12	12.18	11.87	12.27
Peso Unitario (kg/m ³)*	2200	2210	2220	2220
Carga Máxima (KN)*	459.3	448.65	439.95	472.7
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	25.45	24.79	24.96	26.05
Módulo de Elasticidad (Mpa)	16200.00	16200.00	15400.00	15400.00
Tipo de falla				
			5	5

Fuente propia 2025

Tabla 5. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 12%

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	12% de Material Reciclado			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-08-21	2025-08-21	2025-08-21	2025-08-21
Fecha de ensayo*	2025-09-18	2025-09-18	2025-09-18	2025-09-18
Edad (días)	28	28	28	28
Hora de ensayo*	11:00	11:15	11:30	11:45
Diámetro 1(mm)	151.77	152.16	152.22	151.96
Diámetro 2(mm)	151.88	151.61	151.93	151.81
Diámetro promedio (mm)*	151.80	151.80	152.00	151.8
Relación entre diámetros (%)	0.07	0.36	0.19	0.10
Altura promedio (mm)*	305.00	305.00	305.00	304.00
Relación H/D	2.01	2.01	2.01	2.00
Área (mm ²)	18098	18098	18146	18098
Volumen (m ³)	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)*	12.02	12.03	11.97	12
Peso Unitario (kg/m ³)*	2180	2180	2160	2180
Carga Máxima (KN)*	440.6	419.5	451.8	470.5
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	24.35	23.18	24.90	26.00
Módulo de Elasticidad (Mpa)	15600	15200	15200.00	15200
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

Discusión

Resultados de la Caracterización de Agregados

Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización física confirmaron que los agregados naturales provenientes de la Mina Punto Azul cumplen con los requisitos establecidos por las normas ASTM para su utilización en

hormigón estructural. Este cumplimiento normativo garantiza que las propiedades físicas de los agregados no constituyen una variable limitante en el desempeño mecánico del hormigón, permitiendo que las variaciones observadas en las mezclas experimentales se atribuyan principalmente a la incorporación del agregado fino reciclado.

Resultados de Resistencia a la Compresión

Muestra Patrón

La resistencia promedio a la compresión obtenida para la mezcla patrón fue de 256,97 kg/cm², valor que supera en 1,07% la resistencia especificada de 240 kg/cm². Este resultado confirma la adecuada selección de los materiales y la correcta dosificación de la mezcla de referencia, de acuerdo con los criterios establecidos por el ACI, lo que valida su uso como base comparativa para el análisis de las mezclas modificadas.

Mezclas con Material Reciclado

Resultados del Módulo de Elasticidad

Análisis Comparativo

El análisis de los resultados experimentales del módulo de elasticidad muestra una tendencia decreciente conforme se incrementa el contenido de agregado fino

reciclado en las mezclas. El valor del módulo de elasticidad disminuyó progresivamente desde aproximadamente 16 500 MPa en la mezcla con 4% de sustitución hasta cerca de 15 300 MPa en la mezcla con 12% de sustitución, lo que refleja una reducción en la rigidez del hormigón asociada a la incorporación del material reciclado.

Este comportamiento es consistente con los resultados reportados por Rahal (2007) y Yang et al. (2011) en estudios sobre hormigones elaborados con agregados reciclados, quienes atribuyen esta disminución a la mayor porosidad del agregado reciclado, la presencia de mortero adherido y la menor calidad de la zona de transición interfacial. La comparación entre los valores obtenidos para las diferentes mezclas se presenta en la Tabla 6, donde se evidencia claramente la influencia del porcentaje de sustitución sobre el comportamiento elástico del hormigón.

Tabla 6. Módulo de Elasticidad Experimental del Concreto con Sustitución Parcial de Agregado Fino por Material Reciclado

Porcentaje de sustitución	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (Mpa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)
4%	1	16600	169320	16500	168300
	2	16200	165240		

Porcentaje de sustitución	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (Mpa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)
8%	3	16600	169320	15800	161160
	4	16600	169320		
	1	16200	165240		
	2	16200	165240		
	3	15400	157080		
	4	15400	157080		
	1	15600	159120		
	2	15200	155040		
12%	3	15200	155040	15300	156060
	4	15200	155040		

Fuente Propia 2025

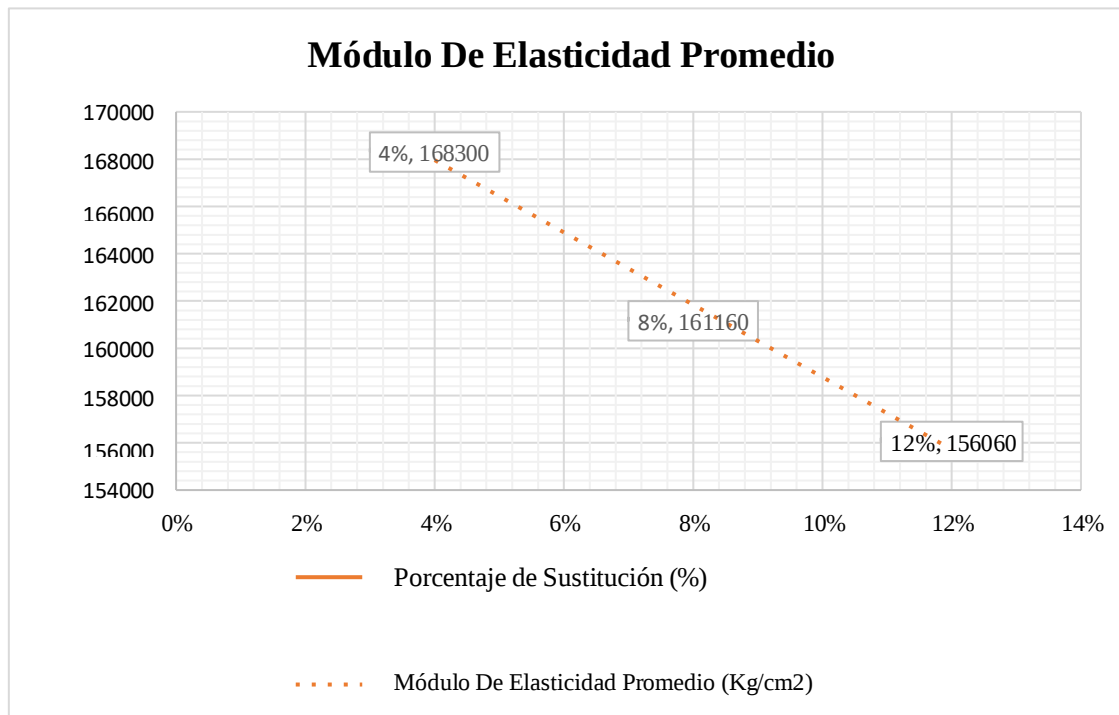
La mezcla con 4% de sustitución de agregado fino reciclado presentó el mejor desempeño mecánico, registrando un módulo de elasticidad elevado de 16 500 MPa y una alta consistencia experimental entre las probetas ensayadas. Este comportamiento evidencia que niveles bajos de sustitución no afectan de manera significativa la rigidez del hormigón, lo que respalda la viabilidad estructural de su aplicación.

En el caso de la mezcla con 8% de sustitución, se observó una disminución moderada del módulo de elasticidad, acompañada de una mayor dispersión entre los valores obtenidos, con una variabilidad aproximada del 4,9%. Esta dispersión sugiere una posible influencia de la distribución del agregado reciclado en la matriz del hormigón; sin embargo, los valores

registrados se mantienen dentro de rangos aceptables para aplicaciones estructurales convencionales.

La mezcla con 12% de sustitución presentó la mayor reducción del módulo de elasticidad entre las dosificaciones evaluadas. No obstante, los resultados mostraron una excelente uniformidad entre las probetas, con valores repetitivos cercanos a 15 200 MPa. Esta consistencia indica una adecuada homogeneidad del material, incluso con un mayor contenido de agregado reciclado, lo que demuestra la estabilidad del proceso de elaboración y la reproducibilidad de los resultados experimentales.

Ilustración 1. Tendencia observada



Determinación del Coeficiente del Módulo de Elasticidad

Con el fin de determinar el coeficiente de proporcionalidad que vincula el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión del hormigón, se aplicó un análisis dimensional a partir de los datos experimentales obtenidos. Dicho coeficiente corresponde al factor constante que, al multiplicarse por la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, permite estimar el módulo de elasticidad del material, de acuerdo con el enfoque adoptado en formulaciones normativas y estudios previos (American Concrete Institute [ACI], 2019).

Ecuación 2. Expresión para el cálculo del coeficiente de proporcionalidad

$$\text{Coeficiente} = \frac{E_c}{\sqrt{f'_c}}$$

Coeficientes experimentales para hormigones con agregado fino reciclado

La Tabla 7 presenta los coeficientes de proporcionalidad determinados a partir de los resultados experimentales para cada nivel de sustitución del agregado fino natural por material reciclado de adoquines. Los valores obtenidos ponen de manifiesto la influencia directa del contenido de material reciclado en la relación entre la rigidez y la resistencia a la compresión del

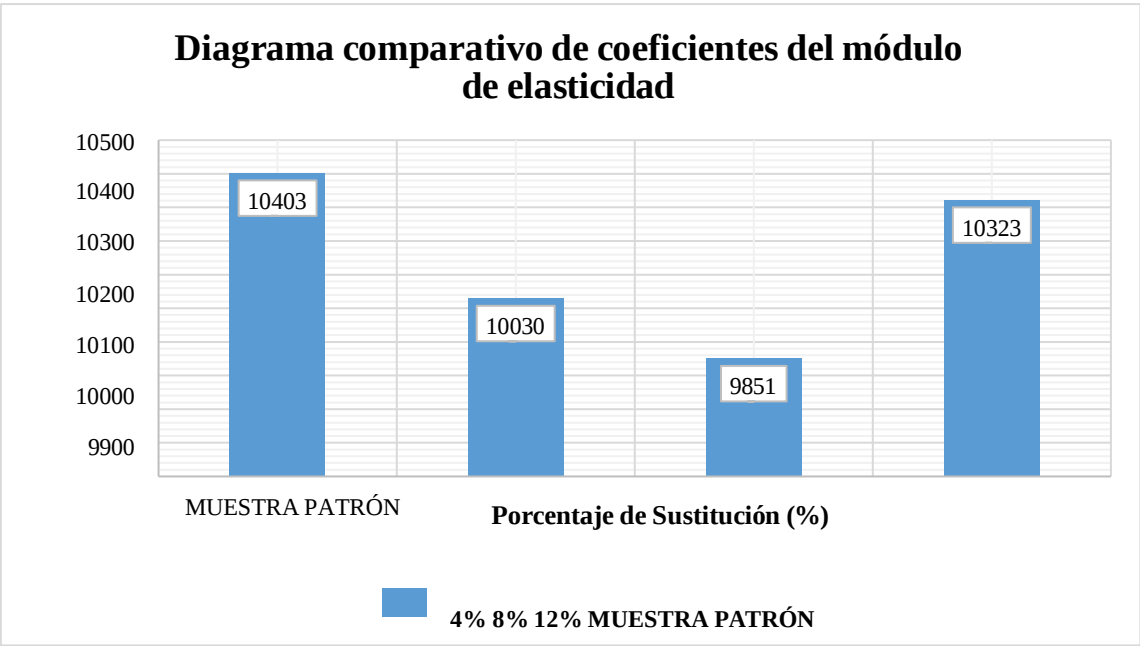
hormigón, evidenciando porcentaje de sustitución, en modificaciones progresivas en el concordancia con lo reportado por comportamiento mecánico del Silva et al. (2016). material conforme aumenta el

Tabla 7. Coeficientes del módulo de elasticidad según porcentaje de sustitución de agregado fino y muestra patrón

Factor de módulo de elasticidad sustitución de agregado fino						
% Sustitución	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia a la compresión (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)	Factor (Mpa)	Factor (Kg/cm2)
4%	26	262	16500	168300	3257.21	10403
8%	25	258	15800	161160	3140.47	10030
12%	25	251	15300	156060	3084.47	9851

Nota: Los coeficientes se calcularon mediante la relación $\text{Coeficiente} = E_c / \sqrt{f_c}$. Fuente Propia 2025.

Ilustración 2. Diagrama comparativo de coeficientes del módulo de elasticidad



Interpretación técnica y consideraciones de diseño

El coeficiente experimental correspondiente a la mezcla con 4%

de sustitución de agregado fino reciclado alcanzó un valor de 10 403 kg/cm², ligeramente superior al registrado para la mezcla patrón (10 323 kg/cm²), lo que representa un

incremento aproximado del 0,77%. Este resultado indica que niveles bajos de sustitución no solo preservan la rigidez del hormigón, sino que pueden generar una respuesta mecánica comparable a la del hormigón convencional.

No obstante, los coeficientes experimentales obtenidos para todas las mezclas evaluadas, con valores comprendidos entre 9 851 y 10 403 kg/cm², resultan significativamente inferiores al coeficiente propuesto por la ecuación normativa del ACI 318-19, que adopta un valor de 15 100 kg/cm² (ACI, 2019). Esta discrepancia evidencia que la formulación normativa sobreestima el módulo de elasticidad cuando se emplean hormigones elaborados con agregados reciclados y materiales locales, lo que puede conducir a estimaciones no conservadoras de la rigidez estructural.

En consecuencia, los resultados obtenidos confirman la necesidad de emplear coeficientes calibrados experimentalmente para el diseño de elementos estructurales que incorporen agregados reciclados. Desde una perspectiva práctica, estos hallazgos implican que los

diseñadores estructurales deben determinar el módulo de elasticidad real mediante ensayos de laboratorio, en lugar de adoptar directamente valores normativos desarrollados para materiales convencionales, especialmente en proyectos donde el control de deformaciones y la rigidez estructural son determinantes.

Implicaciones para el diseño estructural:

La relación experimental observada entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en hormigones con agregado reciclado difiere de manera sustancial de la relación propuesta por el ACI 318-19 (ACI, 2019). Desde el punto de vista del diseño estructural, esta diferencia implica que:

- La aplicación directa de la ecuación normativa puede conducir a una sobreestimación de la rigidez y a una subestimación de las deformaciones en elementos estructurales.
- El uso de ecuaciones experimentales locales permite una evaluación más precisa del

comportamiento elástico del hormigón, mejorando la confiabilidad del diseño.

- La incorporación de agregados reciclados requiere un enfoque de diseño basado en propiedades reales del material, especialmente en estructuras sensibles a flechas y control de servicio.

Ecuación ACI 318-19, resistencia 240 kg/cm²

$$E_{ACI} = 15,100x\sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuaciones experimentales propuestas:

Ecuación para 4% de sustitución (262 kg/cm²)

$$E_{4\%} = 10,403x\sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuación para 8% de sustitución (258 kg/cm²)

$$E_{8\%} = 10,030x\sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuación para 12% de sustitución (251 kg/cm²)

$$E_{12\%} = 9,851x\sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ejemplo de aplicación:

Para un hormigón con 4% de sustitución y $f'c = 258 \text{ kg/cm}^2$:

- **Módulo según ACI:** $E = 15,100 \times \sqrt{258} = 242,542 \text{ kg/cm}^2$
- **Módulo experimental:** $E = 10,403 \times \sqrt{258} = 167,096 \text{ kg/cm}^2$
- **Diferencia:** 45.14% de sobreestimación por la ecuación ACI

Los resultados obtenidos evidencian que la ecuación propuesta por el ACI 318 sobrestima el módulo de elasticidad en aproximadamente un 45,14% cuando se aplica a hormigones con 4% de sustitución de agregado fino reciclado. Esta diferencia significativa pone de manifiesto las limitaciones de la formulación normativa al emplearse en hormigones con materiales no convencionales y tiene implicaciones críticas en el análisis y diseño estructural.

Desde el punto de vista estructural, una sobreestimación del módulo de elasticidad conduce a la subestimación de las deformaciones reales, lo que implica que las flechas efectivas en vigas y losas serían mayores que las calculadas durante la etapa de diseño. Asimismo, en el análisis

estructural mediante modelos computacionales, el uso de un módulo de elasticidad sobredimensionado genera resultados no conservadores, afectando la correcta redistribución de esfuerzos en sistemas hiperestáticos.

Adicionalmente, esta sobreestimación se traduce en el cálculo de una rigidez lateral global del edificio superior a la real, lo que puede comprometer la evaluación del comportamiento frente a acciones laterales, como sismos o viento. En conjunto, estos efectos refuerzan la necesidad de emplear valores experimentales o ecuaciones calibradas localmente para el diseño estructural de hormigones que incorporan agregados reciclados.

4. Conclusiones

La incorporación de hasta un 12% de agregado fino reciclado de adoquines en hormigones estructurales con $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ es técnicamente viable, manteniéndose resistencias a la compresión superiores a la especificada. Este resultado confirma que el uso

controlado de materiales reciclados no compromete la capacidad resistente del hormigón.

El módulo de elasticidad presentó una disminución progresiva con el incremento del porcentaje de sustitución, reduciéndose aproximadamente un 7,4% al incorporar un 12% de agregado reciclado. Esta variación debe ser considerada explícitamente en el diseño estructural para evitar la subestimación de las deformaciones en servicio.

La ecuación normativa del ACI 318-19 sobrestima el módulo de elasticidad entre un 45% y 54% cuando se aplica a hormigones elaborados con agregados locales y reciclados, lo que puede conducir a evaluaciones no conservadoras de la rigidez estructural si se utiliza sin validación experimental.

Se desarrollaron ecuaciones experimentales específicas para la estimación del módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión y del porcentaje de sustitución, las cuales representan de manera más precisa el comportamiento elástico del

hormigón elaborado con materiales locales.

La mezcla con 4% de sustitución presentó el mejor equilibrio entre resistencia y rigidez, con mínima reducción del módulo de elasticidad y alta consistencia experimental, constituyéndose como la opción más favorable para aplicaciones estructurales.

El uso de agregados reciclados de adoquines contribuye a la reducción de residuos de construcción, a la disminución de la extracción de agregados naturales y al fomento de prácticas constructivas sostenibles, alineadas con los principios de la economía circular.

Bibliografía

- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C469/C469M: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742.
- Fédération Internationale du Béton. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn.
- Guimaraes, L. (2021, Julio 02). El reciclaje de hormigón gana cada vez más fuerza. *Construcción Latinoamericana*.
<https://www.construccionlatinoamericana.com/news/el-reciclaje-de-hormigon-gana-cada-vez-mas-fuerza/8013322.article>
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574-580.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Educatio

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468.

Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407-415.

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2171-2186.

Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187-1194.

Yang, K. H., Chung, H. S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289- 296.