

Evaluation of the Compressive Strength of Rigid Pavements Modified with FbA and CCA

Franz, Sánchez Rivera¹ ; Bily, Hancoccallo Huarcaya² ; Gerby Giovanna, Rondan-Sanabria³ 
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú; U19206896@utp.edu.pe; U19103719@utp.edu.pe; c16238@utp.edu.pe

Abstract: *The challenges in the durability and strength of rigid pavements in the city of Arequipa require innovative solutions. Therefore, this experimental and quantitative research has as its main objective to determine, among the four proposed dosages, which is the most optimal dosage that enhances resistance to compressive loads. The methodology consisted of designing a control mix using the American Concrete Institute method (ACI 211.1) to achieve a compressive strength of 280 kg/cm², after prior characterization of the aggregates. Subsequently, based on the control sample, 3 modified dosages were created: 1.5% FbA, 5% CCA + 1.5% FbA, and 10% CCA + 1.5% FbA. A total of 16 cylindrical specimens of 100 mm x 200 mm were molded (4 for each dosage); after 28 days of curing, the compressive strength test was carried out. The findings demonstrated that the characterization of fine and coarse aggregates did meet the conditions to be used in the ACI 211.1 design; the compressive strength test at 28 days showed that the dosage with 1.5% FbA and 5% CCA was the most optimal, reaching an average strength of 300.33 kg/cm², exceeding the control by 7.31%. Consequently, it is concluded that the ACI 211.1 method is effective for the design of pavement structures; furthermore, the dosage of 1.5% FbA and 5% CCA increases resistance to compressive loads, demonstrating that this dosage is a viable alternative to improve the durability and strength of rigid pavements in the city of Arequipa.*

Keywords: Rice husk ash (CCA); steel fiber (FbA); compressive strength; rigid pavements; sustainable materials.

Evaluación de la resistencia a la compresión de pavimentos rígidos modificados con FbA y CCA

Franz, Sánchez Rivera¹; Bily, Hancoccallo Huarcaya²; Gerby Giovanna, Rondan-Sanabria³
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú; U19206896@utp.edu.pe; U19103719@utp.edu.pe; c16238@utp.edu.pe

Resumen: Los retos en la durabilidad y resistencia de los pavimentos rígidos en la ciudad de Arequipa requieren soluciones innovadoras. Por lo tanto, esta investigación experimental y cuantitativa tiene como objetivo principal determinar, entre las cuatro dosificaciones propuestas, cuál es la dosificación óptima que potencie la resistencia a cargas compresivas. La metodología consistió en diseñar una mezcla patrón mediante el método de American Concrete Institute (ACI 211.1) para alcanzar una resistencia a la compresión de 280 kg/cm², previa caracterización de los agregados. Posteriormente, a partir de la muestra patrón, se crearon 3 dosificaciones modificadas de 1,5% FbA, 5% CCA + 1,5% FbA y 10% CCA + 1,5% FbA. Se moldearon 16 probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm (4 para cada dosificación); tras el curado de 28 días, se procedió con el ensayo a la resistencia a la compresión. Los hallazgos demostraron que la caracterización de los agregados finos y gruesos sí cumplió con las condiciones para ser utilizados en el diseño ACI 211.1; el ensayo a compresión a los 28 días demostró que la dosificación con 1,5% de FbA y 5% de CCA fue la óptima, alcanzando la resistencia promedio de 300,33 kg/cm², superando en un 7,31% a la del patrón. En consecuencia, se concluye que el método ACI 211.1 es efectivo para el diseño de estructuras de pavimentos; además, la dosificación de 1,5% de FbA y 5% de CCA aumenta la resistencia a las cargas compresivas, demostrando que dicha dosificación es la alternativa viable para mejorar la durabilidad y la resistencia de los pavimentos en la ciudad de Arequipa.

Palabras clave: Ceniza de cáscara de arroz (CCA); fibra de acero (FbA); resistencia a la compresión; pavimentos rígidos; materiales sostenibles.

I. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles son afectados por factores como los ahuellamientos, las rugosidades y el agrietamiento. Diversos estudios demuestran que el deterioro prematuro en los pavimentos está relacionado con factores primordiales, como son el proceso constructivo, el flujo automotor y las condiciones climatológicas. Además, la falta de resistencia de la losa de la vía se origina por una construcción ineficaz con los insumos inadecuados; esto puede ser el elemento que genere las primeras fallas en el pavimento flexible [1]. Por esta razón, los pavimentos rígidos representan una alternativa de diseño segura y reconocida por la seguridad que brinda, dada su elevada capacidad de resistencia a las altas cargas y su larga vida útil. Hoy en día, se aplican diversos métodos para el diseño y construcción de dichas vías, considerando diversos factores técnicos. Según la norma técnica CE.010, las dimensiones de dichas vías van a depender de la intensidad del tráfico, la cantidad y tipo de unidades de transporte, la capacidad de resistencia del suelo de fundación y las cargas vehiculares [2].

No obstante, este tipo de estructura puede tener diversas anomalías, como daños, imperfecciones y desgaste, que impactan directamente su estructura, lo que provoca un funcionamiento inadecuado y una reducción en su periodo de servicio. A esta problemática se le suma el factor de conciencia ambiental generado por una alta huella de carbono vinculado con el uso del cemento Portland, el componente fundamental para la creación del concreto empleado en los pavimentos rígidos [3]. Por lo tanto, se vuelve indispensable buscar alternativas rentables para la sostenibilidad económica y que así se pueda mejorar el desempeño de dichos pavimentos.

Respecto de la FbA, estudios científicos proponen que dicho material es capaz de preservar las características mecánicas al incrementar la temperatura por un cierto tiempo. En un artículo de investigación, se afirmó que, al incorporarle altas temperaturas, las resistencias mecánicas al pavimento disminuían, dando como una alternativa de solución la incorporación de la FbA. Esto posibilitó que las muestras expuestas a altas temperaturas de calor conservaran un mayor porcentaje de su resistencia original en contraste con un pavimento sin alterar [4]. Asimismo, otro trabajo apoyó que, al incorporar FbA, aumentó la estabilidad, oposición al deslizamiento y la solidez frente a fuerzas compresivas, incluso cuando el material era expuesto a temperaturas elevadas [5]. En la misma línea, otra investigación destacó que, al exponer las muestras a un calentamiento generado por un campo electromagnético, las fibras tenían el rol de ser un conductor, donde dichas fibras provocaban una temperatura elevada en los aglutinantes, ocasionando que pasaran de un estado sólido a un estado líquido viscoso, conllevando que nuevamente se fundieran y pudieran rellenar las microfisuras existentes, añadiendo más resistencia frente a cargas compresivas [6].

De igual forma, otra investigación demostró que la incorporación de la FbA permitía optimizar notablemente al hormigón del pavimento, resultando así una alta capacidad para resistir fuerzas compresivas [7].

Por otra parte, la adición de CCA fue debatida en pavimentos, donde se utilizó dicho material reciclado como relleno en reemplazo del carbonato de calcio para así evaluar sus efectos [8]. De igual forma, se investigó su uso como relleno de la mezcla del pavimento [9]. En otro caso, se combinó CCA con agregados y polvo de horno de cemento para evaluar las combinaciones resultantes [10]. Además, se incorporó la CCA como un modificador para el ligante asfáltico [11]. Asimismo, se empleó la CCA como material cementante, al sustituir el cemento con el objetivo de examinar su efecto en las propiedades del concreto [12]. Adicionalmente, se prepararon

dosificaciones de concreto autocompactante con CCA, con la intención de sustituir el cemento [13][14].

Finalmente, es fundamental señalar que existe una escasez de trabajos e investigaciones que empleen la adición de estos dos componentes, conllevando que no estén siendo explotados en los pavimentos rígidos de la ciudad de Arequipa.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

Los principales materiales utilizados fueron los siguientes: En primer lugar, el cemento Portland “Yura Max HS” adquirido en tiendas Promart ubicadas en la ciudad de Arequipa. La empresa proveedora denominada “Yura S.A.” cuenta con reconocimientos internacionales y es una empresa altamente conocida que cuenta con el cumplimiento de la Normativa Técnica Peruana (NTP 334.009) [15]. En segundo lugar, los agregados provinieron de la empresa concretera “HORMIGONERAS DEL SUR”, que se encuentra ubicada en Arequipa. En tercer lugar, la fibra de acero (FbA) se obtuvo de una distribuidora Sika ubicada en Arequipa. El producto se denomina “SikaFiber® CHO 65/35 NB” [16], el cual cumple con la normativa de la American Society for Testing and Materials (ASTM A 820) [17], garantizado por el proveedor. Y, por último, el material que reemplazó parcialmente al cemento en algunas dosificaciones fue la ceniza de cáscara de arroz (CCA), este fue adquirido de la empresa “SOMOS PERLA DEL NORTE”, ubicada en Chiclayo, Perú. La composición química se obtuvo directamente de la página de la empresa; esta información fue utilizada para verificar el cumplimiento de la normativa NTP 334.104 [18]. Como se muestra en la TABLA 1.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LA CCA DE LA EMPRESA
“SOMOS PERLA DEL NORTE”

Proveedor:	SOMOS PERLA DEL NORTE	
Clase de producto	Clase N	
COMPONENTES QUÍMICOS	CONCENTRACIÓN (%)	REQUISITO NTP 334.104
Óxido de sílice (SiO ₂)	94,1	70 min
Trióxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	0,12	
Otros óxidos (P ₂ O ₅ , Fe ₂ O ₃)	1,91	
Óxido de calcio (CaO)	0,55	
Óxido de magnesio (MgO)	0,95	Solo informar
Óxido de potasio (K ₂ O)	2,1	
Óxido de sodio (Na ₂ O)	0,11	
Trióxido de azufre (SO ₃)	0,06	4 máx.
Cloro	0,05	
Óxido de titanio (TiO ₂)	0,05	
TOTAL	100	

B. Proceso de la investigación

Para una mejor organización de los procesos que se desarrollaron dentro de la investigación se creó un diagrama de procesos en el cual se representaron las etapas que existían para poder llegar al término de la investigación, en la primera etapa se realizó la recolección de materiales, en la segunda etapa se realizó la caracterización de los materiales, en la tercera etapa se incluyó el diseño de mezcla para obtener un concreto con una resistencia de 280 kg/cm² empleando el método ACI 211.1 [19] y la elaboración de la mezcla patrón y mezclas modificadas, como cuarta etapa se realizó la evaluación de las propiedades mecánicas en este caso únicamente se llevó a cabo la prueba de resistencia a la compresión, como quinta etapa se procedió con la interpretación de resultados, en esta se evaluó si la hipótesis fue acertada. Como se visualiza en la Fig. 1.

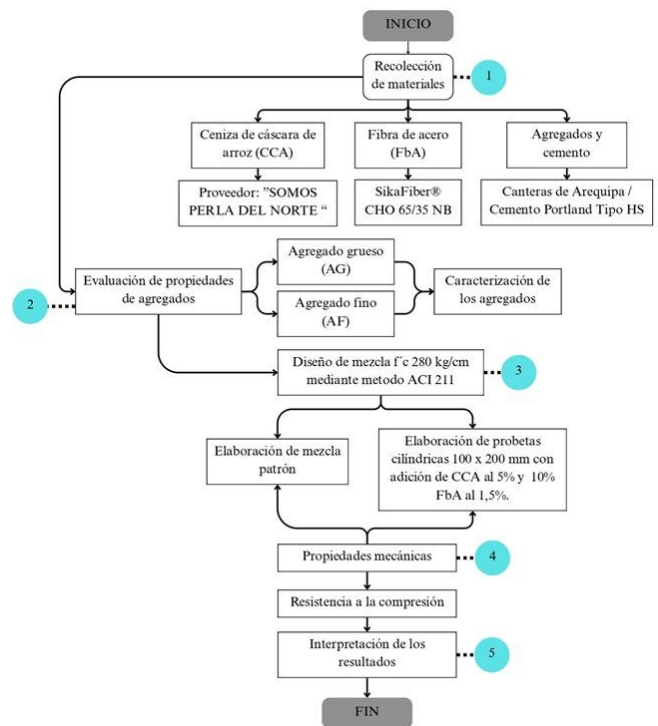


Fig. 1 Diagrama de procesos

C. Diseño de la investigación

Se consideró que pertenecía a un diseño experimental, ya que, en sus dosificaciones, los materiales fueron modificados para así evaluar el efecto que se tenía en la resistencia a cargas compresivas. Por tal motivo, se acudió a un laboratorio para caracterizar los agregados; posteriormente, se realizó una preparación de las mezclas patrón y mezclas modificadas de los materiales correspondientes a la investigación. Seguido de ello, se realizó una comparación de la mezcla patrón y las mezclas con la FbA y CCA como reemplazo del cemento. Los grupos de mezclas experimentales que estaban dentro de la experimentación fueron los siguientes: Mezcla patrón (Mc-01: 0% FbA+0% CCA), mezcla modificada con FbA (Mc-02: 1,5% FbA+0% CCA), mezclas modificadas con FbA y CCA al 5%

(Mc-03: 1,5% FbA+5% CCA) y, por último, la mezcla modificada con FbA y CCA al 10% (Mc-04: 1,5% FbA+10% CCA). Adicionalmente, cada una de estas muestras contó con 4 probetas para obtener el valor promedio, cumpliendo lo especificado según norma NTP 339.034 [20]. Como se muestra en la TABLA 2.

TABLA 2
COMPOSICIÓN DE LAS DOSIFICACIONES Y CANTIDAD DE
PROBETAS

Mezclas	Dosificación	Cantidad de probetas
Mc-01	Dosificación Patrón	4
Mc-02	Dosificación modificada: 1,5% FbA	4
Mc-03	Dosificación modificada: 1,5% FbA + 5% CCA	4
Mc-04	Dosificación modificada: 1,5% FbA + 10% CCA	4

Para la elección de la FbA se optó por una dosificación del 1,5% respecto al volumen de la mezcla de concreto, representando así una dosificación dependiente que se encontraba dentro del rango aceptable por la norma ACI 544.1 R-96 [21]. De la misma manera, se optó por una dosificación independiente del 5% y 10% de la CCA como sustitución parcial del material cementante. Para la elección de los porcentajes, se seleccionó por medio de una base de datos de investigaciones similares que demostraron tener una influencia positiva en sus resultados, como el aumento de la resistencia a la compresión debido a las propiedades puzolánicas que tiene la CCA en las mezclas de concreto.

D. Caracterización de los agregados gruesos (AG) y agregados finos (AF)

Para hallar las características de los agregados, se realizó el ensayo granulométrico por tamizado de acuerdo con la normativa ASTM C33M [22]; de este se halló principalmente el tamaño máximo nominal y el módulo de fineza. Adicionalmente, se tomó en cuenta la normativa NTP 400.037 [23] como recomendación para la obtención de la curva granulométrica para fines de uso de concreto para carreteras de pavimento rígido; para esto se consideró usar el Huso N°6 correspondiente a la norma y un Huso único no correspondiente a la norma, los cuales permiten la interpretación en función de las condiciones reales, uso de concreto y la gradación de los agregados. También se determinó el porcentaje de contenido de humedad por medio del ensayo de contenido de humedad de acuerdo con los parámetros de normativa NTP 339.185:2021 [24]. Sumado a esto, se obtuvo el peso unitario compactado seco y suelto seco para los AF y gruesos mediante el ensayo de pesos unitarios de acuerdo con la NTP 400.017:2017 [25]. Finalmente, se determinó la absorción para los agregados y peso específico mediante el ensayo absorción de agregados y gravedad específica, cumpliendo así la normativa NTP 400.021.18 [26].

E. Diseño de mezclas mediante el método ACI 211.1 y preparación de probetas

Para la elaboración de las proporciones del diseño de mezclas de concreto se usó principalmente el método ACI 211.1.

1. Método ACI 211.1:

El método ACI 211.1 para diseño de mezclas de concreto se definió como el procedimiento mediante el cual se cuantifica cada uno de los materiales que comprenden la mezcla de concreto en peso por metro cúbico o en peso por bolsas de cemento. Para usar este método, es necesario conocer la resistencia a la que se quiere llegar y, adicionalmente, se deben conocer las características de los agregados, principalmente las siguientes: Peso específico, contenido de humedad, porcentaje de absorción, módulo de fineza, tamaño máximo nominal y, por último, peso unitario suelto y compactado. El método ACI 211.1 utiliza tablas y fórmulas estandarizadas que permiten determinar las proporciones adecuadas de los materiales para así alcanzar la resistencia requerida (280 kg/cm²).

2. Preparación de probetas de concreto:

Tamizado de la CCA: Se tamizó con la malla #200 la muestra de CCA y se colocó en un envase o recipiente.

Preparación de moldes: Antes del vaciado de concreto en los moldes, se tuvo que preparar; esto se hizo principalmente para que no hubiera errores en los resultados de la prueba a realizar. Primeramente, se ajustó los moldes hasta el punto en el que la abertura lateral de la probeta estuviera sellada; luego de esto se limpió por dentro y fuera de la probeta, esto con el fin de que no hubiera material residual de anteriores vaciados, y por último se engrasó la probeta en su parte interna; esto se realizó con el fin de que, al momento de desmoldar, la probeta se realice de manera sencilla.

Preparación de polvo de CCA: Se tuvo que uniformizar el polvo de CCA; por esta razón se mezcló en un recipiente con un 15% de agua total de diseño de la mezcla de concreto. Este material se mezcló durante 2 a 3 minutos aproximadamente hasta que alcanzó una textura pastosa.

Proceso de tarado y pesado de los materiales: Como primer paso, se pesó cada uno de los recipientes correspondientes a cada uno de los materiales del diseño de mezclas; para esto se etiquetó cada recipiente. Como segundo paso, se tuvo que pesar el recipiente y el material agregado al recipiente.

Proceso de mezclado y vaciado de concreto a moldes: Antes del mezclado de los materiales se tuvo que verificar que la máquina o herramienta de mezclado tenga las condiciones adecuadas para su uso, siendo así, como primer paso se mezcló los materiales en el trompo, luego de esto se vació a un recipiente en este caso una bandeja metálica, como último paso se colocó la mezcla en las probetas para compactarla en dos capas de 25 golpes y 15 golpes laterales mediante el martillo de goma; finalmente, se tomó la temperatura a cada una de las probetas de concreto.

Desmolde de probetas de concreto: Se desmoldó cada probeta de concreto al día siguiente de vaciado; posteriormente,

Curado de probetas de concreto: Luego de desmoldar las probetas de concreto, se llevó inmediatamente a una poza de curado, en este caso una tina de proporciones suficientes para albergar las 16 probetas de concreto. Como primer punto, se registró la temperatura del agua que debió estar a 23 ± 2 °C. El primer día se reguló la temperatura a 23 °C; el tercer día se tomó registro de la temperatura que resultó ser de 22,1 °C, para el décimo día resultó de 22,3 °C y, por último, en el día décimo séptimo se registró 24,3 °C.

PUs (g/cm ³)	1,3	1,42
MF	7,77	2,35
P#200		11,50%
FP	Sub Angular	Sub Angular

Los resultados obtenidos en las Fig.2 y Fig. 3 evidencian que la distribución granulométrica de los agregados es de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma ASTM C33, asegurando una adecuada proporción entre partículas finas y gruesas. Según [28], la resistencia a la compresión aumenta al incrementarse el tamaño de los agregados de 13 mm a 19 mm, mientras que [29] indica que este comportamiento se mantiene en concretos de resistencia normal, pero se invierte en concretos de alta resistencia, donde tamaños menores favorecen la cohesión. En concordancia con estos hallazgos, el comportamiento observado en la Fig. 3 confirma que un mayor porcentaje de AG, comprendidos principalmente entre 19 mm y 25 mm, favorece a la resistencia de la mezcla de concreto. Se sugiere investigar respecto a cómo influye la variación concentrada de partículas por encima del 19 mm y por debajo de 13 mm en la resistencia a la compresión.

B. Diseño de mezclas para un concreto de 280 kg/cm²

utilizando el método ACI 211.1

La TABLA 4 muestra las dosificaciones calculadas mediante el diseño ACI para una f_c de 280 kg/cm², correspondientes a una dosificación en peso por m³ y a una dosificación en peso por bolsa de cemento. Para la dosificación por m³, los resultados fueron los siguientes: AG con un valor de 739,9 kg, AF con un valor de 780,8 kg, cemento con un valor de 540,5 kg y, por último, agua con un valor de 254,8 Lt. Para la dosificación por bolsa de cemento, los resultados fueron los siguientes: Cemento con un valor de 42,5 kg (1 bolsa de cemento), AF con un valor de 61,4 kg, AG con un valor de 62,4 kg y, por último, agua con un valor de 20,8 kg.

TABLA 4
DISEÑO DE MEZCLA CON MÉTODO ACI

DISEÑO DE MEZCLA		DOSIFICACIÓN EN PESO POR M3	DOSIFICACIÓN EN PESO POR BOLSA DE CEMENTO
f_c	280		
Materiales		Unidades	
Cemento	kg	540,5	42,5
AF	kg	780,8	61,4
AG	kg	739,9	62,4
Agua	L	254,8	20,8

De la tabla anterior se usó principalmente la dosificación en peso por m³ con la finalidad de determinar las dosificaciones reales de los materiales para cada una de las 16 probetas. Para ello, se calculó la cantidad específica de cada material mediante un cálculo matemático en el cual se utilizan las dimensiones de las probetas (20 cm x 10 cm) donde 20 cm representa la altura de la probeta y 10 cm representa el diámetro de la probeta. En la TABLA 5 se muestran las dosificaciones reales para cada una de las probetas.

En la TABLA 5, se muestra sus dosificaciones para cada mezcla de concreto que se denominan Mc-01, Mc-02, Mc-03 y

Mc-04; así mismo, se está considerando que por cada mezcla se está calculando el valor en “kg y L” para 4 probetas.

Para la Mezcla Mc-01 se utilizó 3,394 kg de cemento, 4,903 kg de AF, 4,647 kg de AG y, por último, 1,663 litros de agua. Esta mezcla representa la muestra patrón que no considera ni adición de FbA ni sustitución de CCA. Para la mezcla Mc-02 se utilizó la misma proporción de AG Y AF, cemento y agua; sin embargo, a esta mezcla se le añadió 0,739 kg de FbA. Esta muestra representa una adición del 1,5% de FbA a la mezcla. Para la mezcla Mc-03 se utilizó la misma cantidad de agregados y agua de la mezcla patrón; también se usó 0,170 kg de CCA, 3,225 kg de cemento y 0,739 kg de FbA. Esta muestra representa una sustitución del cemento por CCA del 5% y una adición de 1,5% de FbA a la mezcla. Para la mezcla Mc-04 también se usó la misma cantidad de agregados y agua de la mezcla patrón; se usó 3,055 kg de cemento, 0,339 de CCA y 0,739 de FbA. Esta mezcla representa una sustitución del 10% de cemento por CCA y una adición de 1,5% de FbA a la mezcla.

TABLA 5
CANTIDAD DE LOS MATERIALES POR DOSIFICACIÓN PARA
CADA UNA DE LAS PROBETAS.

DOSIFICACIÓN POR TIPO DE MEZCLA SIN PÉRDIDAS (0%)	UNID ADES	Mc-01: PATR ON	Mc-02: 1,5% DE FbA	Mc-03: 1,5% DE FbA + 5% DE CCA	Mc-04: 1,5% DE FbA + 10% DE CCA
Cemento	kg	3,394	3,394	3,225	3,055
CCA	kg	-	-	0,170	0,339
AF	kg	4,903	4,903	4,903	4,903
AG	kg	4,647	4,647	4,647	4,647
FbA	kg	-	0,739	0,739	0,739
Agua	L	1,663	1,663	1,663	1,663

Dentro de los cálculos considerados en el diseño ACI 211.1 se encuentra principalmente la proporción de relación cemento/arena/grava (C: A: G) de 1:1,5:1,7, que nos indica que por cada unidad de volumen de cemento hay 1,5 unidades de volumen de arena (AF) y 1,7 unidades de volumen de grava (AG) aproximadamente, y por último una relación agua/cemento (a/c) de 0,49.

La relación agua/cemento es un factor determinante en la resistencia a compresión del concreto, porque influye en la hidratación del material de cemento y en la porosidad de la mezcla. Según [30], al comparar relaciones a/c de 0,30, 0,35 y 0,40, la resistencia aumenta ligeramente, siendo la mejor a/c de 0,40 la que alcanza el mayor desempeño dentro de este rango. Por el contrario, según [31], al comparar relación a/c de 0,45, 0,50 y 0,60, la resistencia disminuye progresivamente, resultando en que la a/c de 0,60 presenta el menor desempeño.

En esta investigación se empleó una relación a/c de 0,49, valor promedio calculado según el método ACI 211.1. Esto sugiere que, aunque un aumento moderado de agua puede mejorar ligeramente la resistencia, como indica [30], valores más altos comienzan a reducirla, tal como evidencia [31]. Se

sugiere que para futuras investigaciones se investigue sobre cuál es la óptima relación a/c para que adquiera una resistencia máxima a la compresión bajo condiciones naturales usando la metodología ACI 211.1.

C. Evaluación a la resistencia a la compresión de las cuatro dosificaciones

1. Caracterización de desempeño a la rotura

Se le asigna un código a cada probeta para ser llevados al laboratorio, como se aprecia en la TABLA 6

TABLA 6
IDENTIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN DE LAS PROBETAS

Grupo de mezclas	Identificación de la probeta	Dosificación	Cantidad de probetas
Mc-01	M - 1 al M - 4	Muestra Patrón	4
Mc-02	M - 5 al M - 8	Muestra modificada: 1,5% FbA	4
Mc-03	M - 9 al M - 12	Muestra modificada: 1,5% FbA + 5% CCA	4
Mc-04	M - 13 al M - 16	Muestra modificada: 1,5% FbA + 10% CCA	4

Se realizó el ensayo a la compresión en un solo día, recolectando sus resistencias a las cargas compresivas y su forma de rotura, como se visualiza en la Fig. 4.

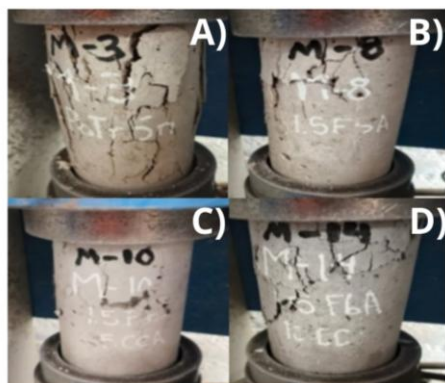


Fig. 4 Tipos de roturas presentes en las probetas, (A) Mc-01, (B) Mc-02, (C) Mc-03 (D) Mc-04

La forma de rotura en las probetas fue documentada y clasificada siguiendo los patrones establecidos en la normativa ASTM C39 [27]. De esta manera, se determinó que las mezclas Mc-01, Mc-02 y Mc-03 mostraron un patrón de rotura clasificado como Tipo III. Este tipo de falla se caracteriza específicamente por mostrar grietas verticales, diferenciándose de fallas en tipo cono. Por otra parte, la excepción se presentó en la dosificación con el mayor contenido de ceniza, Mc-04, la cual evidenció una rotura de Tipo II. A diferencia de la rotura anterior, estas se distinguen por presentar grietas formando un cono en una esquina acompañado por grietas verticales.

La Rotura Tipo III, caracterizada por ser de colapso frágil, es observada en las probetas de Mc-01, Mc-02 y Mc-03. Siendo la última un resultado inesperado. A pesar de ser la dosificación

con la mayor resistencia a la compresión, este resultado se relaciona con otras investigaciones precedentes que afirman el rol importante de la CCA en el incremento de las propiedades mecánicas del concreto [3]. No obstante, la forma de rotura no fue alterada; la rotura de tipo III es un resultado inesperado que contradice directamente el objetivo estructural de la FbA mencionado en [7], que establece que la FbA debe lograr un amarre a la mezcla endurecida que asegure un control del agrietamiento y un mejoramiento en sus resistencias mecánicas. Por ello, la aparición del Tipo III sugiere que, a pesar del aumento de la resistencia, aún se conserva su fragilidad. El 1,5% de FbA fue insuficiente para contrarrestar la alta capacidad de carga de la mezcla del concreto mejorada por el 5% de CCA, dificultando la capacidad de puentear las fracturas ocasionadas. En contraste, la Rotura Tipo II fue detectada en la mezcla Mc-04. Este cambio de tipo de falla demuestra que el 1,5% de FbA logró controlar la generación de fisuras, pero dicha dosificación presenta la resistencia más baja, contradiciendo la optimización esperada de la mezcla. Por otro lado, reafirma el principio de que la FbA aporta ductilidad al concreto mencionado en la investigación [32] sobre la combinación de CCA y FbA.

Estos resultados demostraron que fueron limitados por el porcentaje del 1,5% FbA. Ya que fue insuficiente el porcentaje para modificar el tipo de rotura, esta incapacidad se mostró en la rotura de Tipo III, demostrando que no se pudo tener una resistencia máxima de carga compresiva y un control de fisuras a la vez, la cual era la función de la fibra. Por lo tanto, se sugiere que para futuras investigaciones se considere tomar un porcentaje mayor al 1,5% de FbA con el 5% de CCA y así ver si aún se tendría una rotura de Tipo III.

2. Evaluación cuantitativa de la resistencia final.

Con el propósito de mostrar de manera detallada los resultados obtenidos, se muestra en la TABLA 7 las resistencias a la compresión individuales de las probetas ensayadas, las cuales son la base para el análisis estadístico posterior.

TABLA 7
RESULTADOS INDIVIDUALES DE RESISTENCIA

Código	Descripción	Resistencia (kg/ cm ²)
M- 1	Mc-01: Patrón	292,4
M- 2	Mc-01: Patrón	283,2
M- 3	Mc-01: Patrón	268,6
M- 4	Mc-01: Patrón	275,3
M- 5	Mc-02: 1,5% FbA	269,9
M- 6	Mc-02: 1,5% FbA	288,2
M- 7	Mc-02: 1,5% FbA	249,6
M- 8	Mc-02: 1,5% FbA	270,2
M- 9	Mc-03: 1,5% FbA + 5% CCA	291
M- 10	Mc-03: 1,5% FbA + 5% CCA	301,4
M- 11	Mc-03: 1,5% FbA + 5% CCA	300,6
M- 12	Mc-03: 1,5% FbA + 5% CCA	308,3
M- 13	Mc-04: 1,5% FbA + 10% CCA	279,4
M- 14	Mc-04: 1,5% FbA + 10% CCA	261
M- 15	Mc-04: 1,5% FbA + 10% CCA	268
M- 16	Mc-04: 1,5% FbA + 10% CCA	253,4

Los resultados demuestran que existe una diferencia la resistencia a la compresión entre probetas de una misma dosificación, se le puede asociar a que existe una variabilidad en la mezcla del concreto. A partir de estos datos, se realiza un análisis estadístico presentado en la TABLA 8.

TABLA 8
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
POR CADA DOSIFICACIÓN

Mezcla	Promedio (kg/cm ²)	Máx. (kg/cm ²)	Mín. (kg/cm ²)	Desviación estándar (kg/cm ²)	Coefficiente de variación (%)
Mc-01: Patrón	279,88	292,40	268,60	10,26	3,67
Mc-02: 1,5% FbA	269,48	288,20	249,60	15,77	5,85
Mc-03: 1,5% FbA + 5% CCA	300,33	308,30	291,00	7,11	2,37
Mc-04: 1,5% FbA + 10% CCA	265,45	279,40	253,40	11,05	4,16

Los resultados señalaron que existen diferencias en la variabilidad de la resistencia a la compresión entre las distintas dosificaciones. La mezcla Mc-03 mostró los menores valores de coeficiente de variación con un 2,37% y una desviación estándar de 7,11 kg/cm², mientras que la mezcla Mc-02 presentó los mayores valores de 5,85% y 15,77 kg/cm², respectivamente, por otra parte, las mezclas Mc-01 y Mc-04 registraron valores intermedios.

Con base en lo anterior, se realizó un cálculo para sacar el promedio de las 4 probetas correspondientes a cada dosificación, donde se indica que la dosificación patrón llegó a 279,875 kg/cm² de resistencia. Para las probetas con el 1,5% de FbA se obtuvo un valor de 269,475 kg/cm², menor a la dosificación patrón con una diferencia de 10,4 kg/cm²; respecto a la Mc-04, alcanzó un 265,45 kg/cm²; siendo aún menor a la Mc-01 y a la Mc-02. Por último, para la Mc-03, se consiguió un 300,325 kg/cm² de resistencia, siendo el resultado más alto de las 4 dosificaciones, demostrando así que dicha dosificación es la óptima para mejorar la resistencia en este estudio, tal como se demuestra en la Fig. 5.

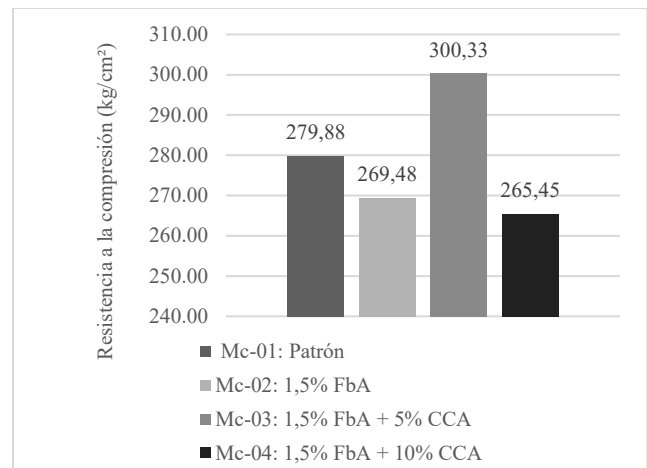


Fig. 5 Comparación de la resistencia a la compresión de las 4 dosificaciones.

La Mc-01 establece un punto de referencia de 279,875 kg/cm², la Mc-02 fue de 269,475 kg/cm². Se relaciona esta caída de resistencia con la interferencia física de la FbA, que dificultó la correcta compactación de la mezcla y, por consiguiente, incrementó su contenido de vacíos. Este fenómeno se menciona en un estudio previo [33].

Por otro lado, el valor óptimo de resistencia se obtuvo en la Mc-03, alcanzando 300,325 kg/cm². Este incremento demuestra un claro efecto sinérgico justificado por dos mecanismos interrelacionados, la FbA que actúa como un refuerzo interno y la CCA que, según [18], sirve como puzolana natural. Y así, ser el reemplazo parcial del cemento. De igual forma, el gel de C-S-H (silicato cal hidratado) brinda la resistencia y su efecto microestructural, tal como reporta [3]. Por último, la Mc-04 arrojó el resultado más bajo de 265,45 kg/cm²; este porcentaje del 10% de CCA fue excesivo para la mezcla del concreto, comprometiendo su resistencia a cargas compresivas.

La dosificación más efectiva para alcanzar una mayor resistencia a las cargas compresivas dentro de las 4 dosificaciones se obtuvo exactamente en la Mc-03. Por lo tanto, se sugiere que es necesario ampliar el estudio a una mayor variación de porcentajes para ambas variables en dos líneas de acción: si al disminuir el porcentaje de CCA aumentaría aún más la resistencia a las cargas compresivas o el aumento de la FbA con el 5% de CCA aumentaría su resistencia o solo se conservaría.

IV. CONCLUSIONES

La caracterización de los agregados permitió definir las cualidades físicas requeridas para realizar el diseño de mezclas de concreto. Se observó que la granulometría satisfizo los requisitos del rango aceptable mencionado por la norma ASTM C33. No obstante, en la gráfica granulométrica de los AF se observó una ligera desviación en las mallas N.º 16, N.º 30 y N.º 50, las cuales se encontraban por encima del límite del Huso Único correspondiente para pavimentos rígidos. Esta variación no representó una anomalía significativa ni afectó la calidad de

la mezcla, dado que la muestra patrón alcanzó la resistencia esperada de 280 kg/cm² a los 28 días, confirmando la idoneidad de los agregados empleados.

Asimismo, las propiedades de peso unitario suelto y compactado, peso específico, contenido de humedad, porcentaje de absorción, módulo de fineza y tamaño máximo nominal se mantuvieron dentro de los valores establecidos y siguieron los lineamientos de las normas correspondientes, garantizando que el material posea una adecuada densidad, estabilidad y adherencia con la pasta de cemento. En general, los resultados confirman que los agregados presentan una calidad adecuada y cumplen las condiciones requeridas para su utilización en concreto destinado a pavimentos.

Se diseñó las mezclas estipuladas conforme al método ACI 211.1, produciendo concretos con una relación agua/cemento de 0,49 y una proporción cemento/arena/grava (C: A: G = 1:1,5:1,7); esto estableció una composición por metro cúbico: 540,5 kg de cemento, 780,8 kg de AF, 739,9 kg de AG y 254,8 L de agua.

El análisis estadístico validó la precisión del estudio, indicando que la mezcla Mc-03 obtuvo la desviación estándar más baja con un valor de 7,11 kg/cm². Este resultado, sumado a un coeficiente de variación de 2,37% comprobaron una dispersión mínima, lo que aseguró que todas sus probetas superaran los 280 kg/cm² de diseño. Por otra parte, la variabilidad de desviación estándar de 15,77 kg/cm² y un coeficiente de variación de 5,85% en Mc-02 evidenciaron una mayor inestabilidad, validando la uniformidad técnica de la mezcla con el 5% de CCA.

Dentro de las cuatro mezclas, la Mc-03 fue la mejor alternativa para una mayor eficiencia mecánica en el concreto, ya que fue destinado a pavimentos rígidos. Los ensayos confirmaron que dicha proporción superó la resistencia establecida en 280 kg/cm², con un resultado promedio de 300,325 kg/cm², lo que representó un incremento del 7,31% sobre la Mc-01. Además, este desempeño se debió a la interacción efectiva de la FbA, que actuó como refuerzo interno para la transferencia de cargas, con la CCA, que optimizó la densificación puzolánica de la pasta de cemento. Sin embargo, se estableció que la CCA era el parámetro crítico para la resistencia final. La incorporación del 5% de CCA incrementó notablemente la capacidad compresiva. Por otro lado, un incremento al 10% generó un efecto de saturación de finos, comprometiendo la resistencia a la compresión final.

REFERENCIAS

- [1] S. Bhandari, X. Luo, and F. Wang, "Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 258–272, Mar. 2023. DOI.
- [2] C. y S. Ministerio de Vivienda, "Norma Técnica CE.010: Pavimentos Urbanos," Lima, 2014. [Online]. [Accessed: Aug. 29, 2025].
- [3] N. V. S. Kumar and Satyanarayana S. V., "View of Agricultural waste ash in the domain of sustainable concrete," vol. 6, pp. 350–360, 2022, DOI.
- [4] M. Doğruyol, E. Ayhan, and A. Karaşin, "Effect of waste steel fiber use on concrete behavior at high temperature," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Jul. 2024, DOI.
- [5] W. Liu et al., "Research on the Mechanical, Thermal and Induction Healing Properties of Asphalt Wearing Course with Steel Fibers," *Materials*, vol. 17, no. 9, May 2024, DOI.
- [6] A. Gupta, J. Rodriguez-Hernandez, and D. Castro-Fresno, "Incorporation of additives and fibers in porous asphalt mixtures: A review," Oct. 01, 2019, MDPI AG. DOI.
- [7] N. Chusai, P. Jitsangiam, and T. Suwan, "Mechanical Performance of Steel-Fiber-Incorporated Rubberized Concrete for Rigid Pavement Applications," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. DOI.
- [8] R. Camargo-Perez, F. Moreno-Navarro, A. E. Alvarez, L. F. Walubita, and L. Fuentes, "Influence of recycled rice husk ash filler on the mechanical performance of asphalt mixtures: A mortar scale analysis," *Constr Build Mater*, vol. 414, p. 134832, Feb. 2024, DOI.
- [9] M. Helal, H. Mahdy, and M. Ibrahim, "Effect of Rice Husk Ash on the Performance of Hot Asphalt Mixes," *Bulletin of the Faculty of Engineering. Mansoura University*, vol. 45, no. 2, pp. 8–19, Jun. 2020, DOI.
- [10] V. Rikambura, M. M'tulatia, and S. Waweru, "Investigation of the Effect of Cement Kiln Dust-Rice Husk Ash Composite Fillers on Volumetrics and Durability Properties of Recycled Hot-Mix Asphalt," *International Journal of Civil Engineering*, vol. Volume 11, no. 3, pp. 94–106, Mar. 2024, DOI.
- [11] M. Arabani and S. A. Tahami, "Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture," *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 350–358, Sep. 2017, DOI.
- [12] B. Kannur and H. S. Chore, "Low-fines self-consolidating concrete using rice husk ash for road pavement: An environment-friendly and sustainable approach," *Constr Build Mater*, vol. 365, p. 130036, Feb. 2023, DOI.
- [13] M. A. Getahun, S. M. Shitote, and Z. C. A. Gariy, "Experimental Investigation on Engineering Properties of Concrete Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement and Rice Husk Ash," *Buildings* 2018, Vol. 8, Page 115, vol. 8, no. 9, p. 115, Aug. 2018, DOI.
- [14] S. Hesami, S. Ahmadi, and M. Nematzadeh, "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement," *Constr Build Mater*, vol. 53, pp. 680–691, Feb. 2014, DOI.
- [15] Instituto Nacional de Calidad, "NTP 334.009: Cementos. Cemento Portland. Requisitos," Lima, 2016. [Online]. [Accessed: Sep. 15, 2025].
- [16] "Hoja Técnica Sika® Fiber CHO 65/35 NB." [Online]. [Accessed: Sep. 15, 2025].
- [17] ASTM International, "ASTM A 820: Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete," West Conshohocken, 2001. [Online]. [Accessed: Sep. 15, 2025].
- [18] Instituto Nacional de Calidad, "NTP 334.104: Ceniza volante y puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto. Especificaciones," Lima, 2011. [Online]. [Accessed: Sep. 15, 2025].
- [19] American Concrete Institute, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)," Farmington Hills, 1991. [Online]. [Accessed: Sep. 22, 2025].

- [20] Instituto Nacional de Calidad, “NTP 339.034: Concreto. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas,” Lima, 2015. [Online]. [Accessed: Sep. 22, 2025].
- [21] American Concrete Institute, “Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96),” Farmington Hills, 2001. [Online]. [Accessed: Sep. 12, 2025].
- [22] ASTM International, “ASTM C33M: Standard specification for concrete aggregates,” West Conshohocken, 2003. [Online]. [Accessed: Sep. 22, 2025]. DOI
- [23] Instituto Nacional de Calidad, “NTP 400.037: Agregados. Agregados para concreto. Requisitos,” Lima, 2018. [Online]. [Accessed: Oct. 6, 2025].
- [24] Instituto Nacional de Calidad, “NTP 339.185: Agregados. determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo,” Lima, 2021. [Online]. [Accessed: Oct. 6, 2025].
- [25] Instituto Nacional de Calidad, “NTP 400.017: AGREGADOS. Metodo de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (‘Peso Unitario’) y los vacios en los agregados,” Lima, 2011. [Online]. [Accessed: Oct. 6, 2025].
- [26] Instituto Nacional de Calidad, “NTP 400.021: AGREGADOS. Metodo de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorcion del agregado grueso,” Lima, 2018. [Online]. [Accessed: Oct. 13, 2025].
- [27] ASTM International, “ASTM C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens1,” West Conshohocken, 2014. [Online]. [Accessed: Oct. 13, 2025].
- [28] A. S. Olalere, J. A. Ige, S. O. Ajamu, and J. A. Ige, “Effect of Coarse Aggregate Size on the Compressive Strength and the Flexural Strength of Concrete Beam,” 2015. [Online]. [Accessed: Oct. 13, 2025].
- [29] M. S. Meddah, S. Zitouni, and S. Belâabes, “Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 4, pp. 505–512, Apr. 2010, DOI.
- [30] H. O. Ugorji, M. E. Ephraim, and A. Adetiloye, “Effects of varying water-cement ratios on different grades of concrete using locally materials,” 2020, DOI.
- [31] N. Bheel, S. L. Meghwar, S. A. Abbasi, L. C. Marwari, J. A. Muger, and R. A. Abbasi, “Effect of Rice Husk Ash and Water-Cement Ratio on Strength of Concrete,” *Civil Engineering Journal*, vol. 4, no. 10, pp. 2373–2382, Oct. 2018, DOI.
- [32] O. Zaid, J. Ahmad, M. S. Siddique, and F. Aslam, “Effect of Incorporation of Rice Husk Ash Instead of Cement on the Performance of Steel Fibers Reinforced Concrete,” *Front Mater*, vol. 8, Jun. 2021, DOI.
- [33] M. G. Lee, W. C. Wang, Y. C. Wang, Y. C. Hsieh, and Y. C. Lin, “Mechanical Properties of High-Strength Pervious Concrete with Steel Fiber or Glass Fiber,” *Buildings*, vol. 12, no. 5, May 2022, DOI.