

Influence of partial replacement of cement by ceramic powder and addition of steel fibers on the mechanical properties of concrete

Mayra Karolay Alegre Cornelio, Estudiante¹, Kimberly Jazmin Siancas Huayllas, Estudiante², and Karla Lopez Pasapera, Asesora³

^{1,2}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201920516@upc.edu.pe, u201920689@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pccikalop@upc.edu.pe

Abstract– *Cement production is a significant source of CO2 emissions, playing a crucial role in climate change. Consequently, reducing the cement content in concrete mixes represents a considerable challenge for researchers, who seek to replace it with recycled materials and reduce dependence on natural resources. This experimental study focuses on exploring the feasibility of partially replacing cement with ceramic tile powder and incorporating steel fibers to improve the mechanical properties of concrete. Three mixtures of 280 kg/cm² of characteristic resistance were designed: a concrete pattern (P01), one with 5% replacement of Portland cement with ceramic powder and 1.5% fibers (PC5F1.5), and another with 10% replacement . and 1.5% fibers (PC10F1.5). Slump and air content tests were carried out on the fresh concrete mixes, revealing a decrease in workability with increasing cement replacement. However, these changes remained within acceptable limits. In addition, compression, tensile and flexural strength tests were carried out at ages of 7, 14 and 28 days. The results highlighted the superior performance of the PC5F1.5 mixture, which showed a significant increase of 18% in tensile strength and 11% in flexural strength compared to the concrete pattern at 28 days. In the case of the PC10F1.5 mix, more moderate increases of 8.5% and 3% in tensile and flexural strength, respectively, will be observed, but a 4% reduction in compressive strength will be recorded. In conclusion, it is considered that the replacement of cement with ceramic powder and the incorporation of steel fibers have a positive impact on the mechanical properties of the concrete, especially highlighting the mixture with a replacement of 5% Portland cement.*

Keywords– *Ceramic powder, sustainable concrete, steel fibers, mechanical properties*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Influencia del reemplazo parcial de cemento con polvo de baldosas cerámicas y la adición de fibras de acero en las propiedades mecánicas del concreto

Mayra Karolay Alegre Cornelio, Estudiante¹, Kimberly Jazmin Siancas Huayllas, Estudiante², and Karla Lopez Pasapera, Asesora³

^{1,2}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201920516@upc.edu.pe, u201920689@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pccikalop@upc.edu.pe

Resumen– La producción de cemento es una fuente significativa de emisiones de CO₂, desempeñando un papel crucial en el cambio climático. En consecuencia, la reducción del contenido de cemento en las mezclas de concreto representa un desafío considerable para los investigadores, quienes buscan sustituirlo con materiales reciclados y disminuir la dependencia de recursos naturales. Este estudio experimental se centra en explorar la viabilidad de reemplazar parcialmente el cemento con polvo de baldosas cerámicas y la incorporación de fibras de acero para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Se diseñaron tres mezclas de 280 kg/cm² de resistencia característica: un concreto patrón (P01), uno con 5% de reemplazo de cemento Portland por polvo cerámico y 1.5% de fibras (PC5F1.5), y otro con 10% de reemplazo y 1.5% de fibras (PC10F1.5). Se llevaron a cabo ensayos de asentamiento y contenido de aire en las mezclas de concreto en estado fresco, revelando una disminución en la trabajabilidad con el aumento del reemplazo de cemento. Sin embargo, estos cambios se mantuvieron dentro de los límites aceptables. Además, se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión, tracción y flexión a edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados destacaron el desempeño superior de la mezcla PC5F1.5, que mostró un aumento significativo del 18% en resistencia a tracción y un 11% en flexión en comparación con el concreto patrón a los 28 días. En el caso de la mezcla PC10F1.5, se observaron aumentos más moderados del 8.5% y 3% en resistencia a tracción y flexión, respectivamente, pero se registró una reducción del 4% en la resistencia a compresión. En conclusión, se determinó que la sustitución de cemento por polvo de cerámica y la incorporación de fibras de acero tienen un impacto positivo en las propiedades mecánicas del concreto, resaltando especialmente la mezcla con un reemplazo del 5% de cemento Portland.

Palabras clave-- Polvo de cerámica, concreto sostenible, fibras de acero, propiedades mecánicas

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la construcción, el concreto, cuyo componente principal es el cemento, ha desempeñado un papel fundamental. Sin embargo, este componente esencial impone un impacto ambiental considerable, ya que su consumo anual en constante aumento agota los recursos naturales y contribuye significativamente a las emisiones de CO₂, siendo una causa primordial del cambio climático [1].

En Perú, las 35 plantas de fabricación de cemento generan más de 8 millones de toneladas métricas anuales [2], contribuyendo a un total mundial de alrededor de 4.100 millones de toneladas métricas de cemento por año [3]. La industria de la construcción, que depende en gran medida del uso del concreto y, por ende, del cemento, enfrenta un gran desafío ambiental, pues la producción de una tonelada de cemento genera más de una tonelada de CO₂[4]. Según el centro de estudios británico Chatham House, aproximadamente el 8% de las emisiones globales de dióxido de carbono provienen únicamente del cemento [5]. En respuesta a este desafío, investigadores han planteado la necesidad de reducir las emisiones de CO₂, las cuales están proyectadas a alcanzar su punto máximo en 2030 [6].

Esta realidad ha impulsado un creciente interés en la búsqueda de alternativas más sostenibles para la producción de concreto en las últimas décadas [7]. Propuestas como el reciclaje de residuos cerámicos en materiales de construcción pueden desempeñar un papel crucial en la reducción de las emisiones de carbono de manera significativa [5]. Se han llevado a cabo una extensa investigación acerca de la viabilidad de utilizar polvo de residuo de baldosas cerámicas (CWP) como un sustituto parcial del cemento en la producción de concreto. Además, el CWP exhibe cualidades puzolánicas que cumplen con los requisitos establecidos por la norma ASTM C618, lo que permite su empleo como un sustituto adecuado del cemento en la formulación de mezclas de concreto [8]. Además, para utilizar el CWP en la producción de concreto, los residuos de baldosas cerámicas deben someterse a un proceso de trituración, asegurando que alcancen un nivel de finura que les permita pasar a través de la malla #200. Esta condición es esencial para que el CWP pueda ser empleado con eficacia como un componente en la mezcla de concreto [9].

De acuerdo con investigaciones publicadas, se ha observado que la sustitución del 5% y del 7.5% de cemento por CWP conlleva una disminución en la resistencia a la compresión del concreto de alrededor del 2% y del 6.5%, respectivamente, cuando se evalúa a los 28 días [10]. No obstante, al aumentar el porcentaje de reemplazo a 10% y 20% de cemento por CWP, se registra una reducción más significativa en las resistencias, alcanzando alrededor del

15% y 22%, respectivamente, a los 28 días [11]. Aunque el uso de CWP como sustituto parcial del cemento conlleva una disminución en el impacto ambiental generado por el cemento, es importante reconocer que esta sustitución tiende a reducir la resistencia del concreto. Por esta razón, se han llevado a cabo evaluaciones de diversas alternativas de adiciones con el propósito de mejorar la resistencia del concreto cuando se incorpora CWP en la mezcla.

Una alternativa prometedora es la inclusión de fibras de acero (SF), ya que diversos estudios han demostrado que al añadir un 2% de fibras al concreto, se logra un incremento sustancial en la resistencia a la compresión, que puede alcanzar hasta un 18%. Además, se observa una mejora notable en la resistencia a la flexión, con aumentos de hasta un 35%, según se ha comprobado en ensayos realizados a los 28 días [12]. Además, otro estudio de investigación ha evaluado la resistencia a la compresión durante un período más prolongado. Se ha observado que después de 32 días, la resistencia aumenta en un 15%, y tras 335 días, la resistencia alcanza aproximadamente un incremento del 22% [13].

De acuerdo con los hallazgos en la literatura, existe una búsqueda constante de alternativas sostenibles para reducir el impacto ambiental sin comprometer las propiedades mecánicas del concreto. En este contexto, se plantea la idea de utilizar polvo de cerámica como sustituto parcial del cemento y la incorporación de fibras de acero para mejorar dichas propiedades. El objetivo de esta investigación es realizar un estudio para evaluar las propiedades mecánicas del concreto con sustitución parcial del cemento por polvo de baldosas cerámicas, en proporciones del 5% y 10%, junto con la adición del 1.5% de fibras de acero. Esta composición específica se ha diseñado para lograr una resistencia a la compresión de 280 kg/cm² y ha sido sometida a ensayos a los 7, 14 y 28 días, con el fin de analizar y comparar los resultados de resistencia obtenidos de estas muestras con los del concreto convencional.

II. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

En el marco de la investigación se emplearon herramientas y equipos especializados para llevar a cabo ensayos cruciales. Para la evaluación del concreto fresco mediante el ensayo de cono de Abrams, se utilizaron una varilla compactadora de 60 cm de longitud y 5/8" de diámetro, un martillo de goma, un molde cónico de Abrams con forma de tronco de cono que presentaba un diámetro inferior de 20 cm, uno superior de 10 cm y una altura de 30 cm, acompañado de una plancha metálica, un cucharón y una cinta métrica. En cuanto al ensayo de contenido de aire contó con el empleo de un molde metálico con un diámetro de 20.2 cm y una altura de 21.6 cm, así como la utilización de la olla Washington, un dispositivo compuesto por un molde metálico equipado con un medidor de contenido de aire en porcentaje (%). Por otro lado, para los ensayos de resistencia a la compresión, tracción y flexión en el concreto endurecido, se utilizaron herramientas precisas como el

vernier, tapas de almohadillas de neopreno y platinos de metal, asegurando una correcta disposición de las probetas en la Máquina Forney 500.

III. MATERIALES

A. Agregado fino

La Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) suministró los agregados fino y grueso para las mezclas de concreto, provenientes de la cantera Jicamarca y gestionados por la empresa Unicon, especializada en la producción de agregados bajo los estándares de calidad de la Norma ASTM C33. El agregado fino, previo a su aplicación, fue sometido a pruebas físicas y sus resultados se presentan en la Tabla I.

TABLA I
TABLA PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO FINO

Prueba	Resultado	Normativa
Análisis granulométrico (%)	3.03	ASTM C136
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1452.79	ASTM C29
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1631.17	ASTM C29
Contenido de humedad (%)	3.01	ASTM C566
Peso específico (g)	2.75	ASTM C128

B. Agregado grueso

Para incorporar el agregado grueso en la mezcla, fue necesario llevar a cabo ensayos físicos con el fin de asegurar su idoneidad y cumplir con los estándares establecidos por la normativa. En este contexto, se procedió a caracterizar el agregado mediante una serie de ensayos cuyos resultados se encuentran detallados en la Tabla II.

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO

Prueba	Resultado	Normativa
Análisis granulométrico (TMN)	3/4"	ASTM C136
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1424.74	ASTM C29
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1502.72	ASTM C29
Contenido de humedad (%)	0.6	ASTM C566
Peso específico (g)	2.75	ASTM C127

C. Fibras de acero

Se adquirieron fibras de acero de alta calidad marca BUNDREX, las cuales están disponibles en bolsas de 20 kg y son comercializadas por Z Aditivos. Estas fibras se destacan por sus propiedades excepcionales que mejoran la tenacidad del concreto. Cumplen con las normas de calidad ASTM A 820. En la Tabla III se detallan las propiedades específicas de esta fibra. Además, es importante destacar que presentan una relación entre el largo y el diámetro de 80/60, como se observa en la Figura 1.

TABLA III
PROPIEDADES DE LA FIBRA DE ACERO

Código	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Relación de aspecto (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Densidad (Kg/m3)
BUNDREX 80/60CH	0.75	60	80	1000-1200	20

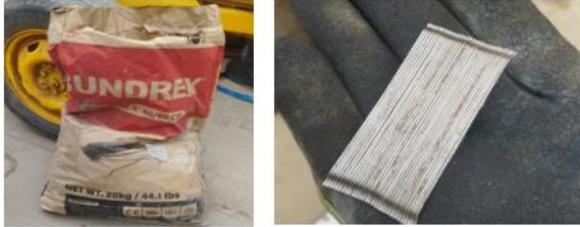


Fig. 1 Fibras de acero BUNDREX

D. Polvo de cerámica

Para la obtención del polvo de cerámica, se recolectaron las baldosas dañadas del depósito de la empresa Celima. Luego, fueron sometidas a un proceso de trituración mediante el Molino de martillos COW 1000 para disminuir el su tamaño. Además, el polvo resultante paso por el proceso de tamizado, específicamente utilizando el tamiz número 200 como se muestra en la Figura 2, lo que permitió que el polvo de cerámica procedente fuera adecuado para su incorporación en las mezclas de concreto.



Fig. 2 Proceso de tamizado del polvo de cerámica

E. Cemento

En la elaboración de las mezclas de concreto, se empleó exclusivamente cemento Portland Tipo I de la reconocida marca Cemento SOL.

IV. METODOLOGIA

A. Preparación de las mezclas de concreto

Las proporciones de las mezclas fueron diseñadas considerando una resistencia de $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ del concreto a los 28 días, siguiendo los estándares establecidos por la normativa de ACI 211. La relación agua-cemento se determinó como 0.47, teniendo en cuenta esta resistencia específica. En las muestras de diseño subsiguientes, se procedió a reemplazar parcialmente el cemento con polvo de residuos de baldosas cerámicas en porcentajes del 5% y 10%. Además, se introdujo un 1.5% de fibras de acero.

Estas mezclas modificadas se identificaron como sigue: P01 para el concreto patrón, PC5F1.5 para la variante con un reemplazo del 5% de cemento y adición de 1.5% de fibras de acero, y PC10F1.5 para la muestra con un reemplazo del 10% de cemento y la misma proporción de fibras de acero. Los detalles específicos se encuentran en la tabla IV.

TABLA IV
DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS POR M3

Mezcla	Cemento kg/m3	Polvo de cerámica kg/m3	Fibras de acero kg/m3	Agua L/m3	Agregado fino kg/m3	Agregado grueso kg/m3
P01	437	0	0	208	829	902
PC5F1.5	415	22	30	208	829	902
PC10F1.5	397	44	30	208	829	902

Tras la preparación de las mezclas, se avanzó con los ensayos correspondientes al concreto fresco. En primer lugar, se llevó a cabo el ensayo de asentamiento, con el objetivo de asegurar el cumplimiento de la normativa ASTM C143. Además, se realizó el ensayo de contenido de aire, conforme a las pautas establecidas por ASTM C231. Estos procedimientos se llevaron a cabo para garantizar la calidad y las propiedades deseadas en el concreto resultante.

B. Curado y pruebas mecánicas

Después de un periodo de 24 horas, las muestras fueron desmoldadas según la normativa ASTM C31, iniciándose un proceso continuo de curado en agua y exposición a la atmósfera abierta, con temperaturas fluctuantes entre 16 y 26 °C. Se realizó una evaluación de la resistencia de las muestras a los 7, 14 y 28 días, con énfasis en la resistencia a la compresión, tracción y flexión de las mezclas de concreto. Para el ensayo de resistencia a la compresión se emplearon 36 probetas, para el ensayo a la tracción 18 probetas y para el ensayo a la flexión 18 vigas. Además, la Tabla V proporciona detalles sobre las especificaciones de las dimensiones de la muestra, su tamaño, la edad de la prueba y las normas aplicadas.

TABLA V
ESPECIFICACIONES DE LAS DIMENSIONES DE LA MUESTRA, EL TAMAÑO, LA EDAD DE LA PRUEBA Y LOS ESTÁNDARES.

Prueba	Normativa	Dimensión	Edad
Resistencia a la compresión	ASTM C39	Probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro × 20 cm de altura	Curado en agua y exposición a la atmósfera abierta, con temperaturas fluctuantes entre 16 y 26 °C por 7, 14 y 28 días.
Resistencia a la tracción por compresión diametral - Tracción Indirecta	ASTM C496	Probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro × 30 cm de altura	
Resistencia a la flexión	ASTM C78	Prismas de concreto de 15 cm × 15 cm × 50 cm	

V. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados detallados de las distintas pruebas realizadas en las mezclas de tipo P01, PC5F1.5 Y PC10F1.5.

A. Ensayos en concreto fresco

Los ensayos que se llevaron a cabo en el concreto en estado fresco incluyeron la medición del asentamiento y la determinación del contenido de aire.

1) *Asentamiento*: Se llevaron a cabo ensayos de asentamiento siguiendo las pautas estipuladas por la norma ASTM C143 en las muestras de concreto propuestas. En la Tabla VI, se muestran los resultados del ensayo realizado en concreto en estado fresco.

TABLA VI
RESULTADOS DEL ENSAYO DE ASENTAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Ensayo de asentamiento (ASTM C143)		
Código	Reemplazo de cemento	Slump (plg)
P01	0%	3.27
PC5F1.5	5%	2.95
PC10F1.5	10%	2.80

2) *Contenido de aire*: Se realizaron pruebas para determinar el contenido de aire de acuerdo con las directrices establecidas por la norma ASTM C231 en las muestras de concreto identificadas como PC1, PC5F1.5 y PC10F1.5. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla VII.

TABLA VII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE AIRE DE LAS MUESTRAS

Ensayo de contenido de aire (ASTM C231)	
Código	Contenido de aire (%)
P01	1.7
PC5F1.5	1.8
PC10F1.5	1.9

B. Ensayos mecánicos en concreto endurecido

Las pruebas realizadas en el concreto en su estado endurecido comprendieron la evaluación de su resistencia a la compresión, tracción y flexión.

1) *Ensayo de resistencia a la compresión*: Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión siguiendo las pautas estipuladas por la norma ASTM C39 en las distintas muestras de concreto. Los resultados se resumen en la Tabla III, que presenta la resistencia a la compresión en kg/cm²

registrada por las muestras cilíndricas después de 7, 14 y 28 días de período de curado.

TABLA VIII
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ENSAYADAS A 7, 14 Y 28 DÍAS

Resistencia a la compresión del concreto (ASTM C 39)							
Edad	Código	Reemplazo de cemento	f _c 1 (kg/cm ²)	f _c 2 (kg/cm ²)	f _c 3 (kg/cm ²)	f _c 4 (kg/cm ²)	f _c promedio (kg/cm ²)
7 días	P01	0%	256.68	265.73	234.47	264.64	255.38
	PC5F1.5	5%	269.04	266.09	250.14	259.43	261.18
	PC10F1.5	10%	216.93	231.97	258.28	256.94	241.03
14 días	P01	0%	317.65	281.52	260.40	296.77	289.09
	PC5F1.5	5%	309.38	301.49	317.61	286.86	303.84
	PC10F1.5	10%	266.98	266.11	306.01	215.56	263.67
28 días	P01	0%	313.91	319.18	316.90	313.42	315.85
	PC5F1.5	5%	322.58	325.02	324.08	323.41	323.77
	PC10F1.5	10%	308.49	304.00	301.41	304.87	304.69

2) *Ensayo de resistencia a la tracción*: Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la tracción siguiendo las pautas estipuladas por la norma ASTM C496 en las distintas muestras de concreto. Los resultados se resumen en la Tabla IX, donde se encuentran los cálculos del ensayo realizados en las muestras después de 7, 14 y 28 días de período de curado.

TABLA IX
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ENSAYADAS A 7, 14 Y 28 DÍAS

Resistencia a la tracción del concreto (ASTM C496)					
Edad	Código	Reemplazo de cemento	f _c 1 (kg/cm ²)	f _c 2 (kg/cm ²)	f _c promedio (kg/cm ²)
7 días	P01	0%	19.98	20.29	20.14
	PC5F1.5	5%	25.68	25.93	25.80
	PC10F1.5	10%	24.02	24.09	24.06
14 días	P01	0%	22.91	23.52	23.22
	PC5F1.5	5%	30.13	30.36	30.24
	PC10F1.5	10%	26.53	26.69	26.61
28 días	P01	0%	26.63	26.80	26.71
	PC5F1.5	5%	33.26	33.42	33.34
	PC10F1.5	10%	30.37	30.49	30.43

3) *Ensayo de resistencia a la flexión*: Se realizaron pruebas de flexión de resistencia de acuerdo con las directrices establecidas en la normativa ASTM C78 en las muestras de concreto. Los resultados se presentan en la

Tabla X, que resume los resultados de las pruebas realizadas en las vigas después de 7, 14 y 28 días de período de curado.

TABLA X
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO
ENSAYADAS A 7, 14 Y 28 DÍAS

Resistencia a la flexión del concreto (ASTM C78)					
Edad	Código	Reemplazo de cemento	MR 1 (kg/cm ²)	MR 2 (kg/cm ²)	MR promedio (kg/cm ²)
7 días	P01	0%	41.75	39.47	40.61
	PC5F1.5	5%	45.85	45.27	45.56
	PC10F1.5	10%	43.72	43.42	43.57
14 días	P01	0%	44.07	43.69	43.88
	PC5F1.5	5%	48.38	49.33	48.85
	PC10F1.5	10%	47.88	47.22	47.55
28 días	P01	0%	45.20	43.88	44.54
	PC5F1.5	5%	49.48	49.93	49.71
	PC10F1.5	10%	46.22	45.52	45.87

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Asentamiento

La Figura 3 revela que las mezclas de concreto con reemplazo de cemento y adición de fibras de acero muestran asentamientos por debajo del rango aceptable de 3 a 4 pulgadas. La mezcla de concreto patrón, con un asentamiento de 3.27 pulgadas, se encuentra dentro del rango. Por otro lado, las mezclas modificadas (PC5F1.5 y PC10F1.5) presentan asentamientos bajos el límite inferior, a 2.95 pulgadas y 2.80 pulgadas respectivamente, lo que sugiere una disminución significativa en la trabajabilidad del concreto fresco, es decir, la facilidad con la que puede ser manipulado.

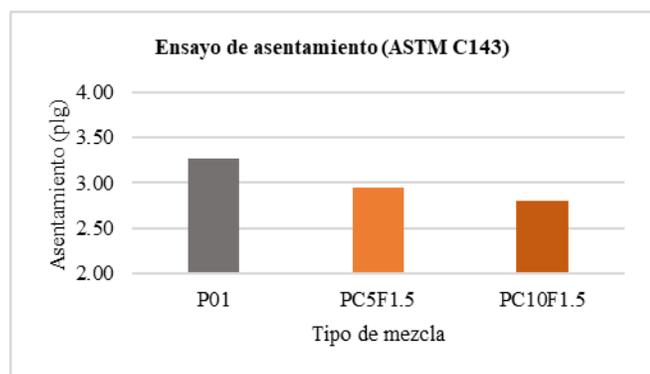


Fig. 3 Ensayo de asentamiento de las diferentes mezclas de concreto

Esta reducción en trabajabilidad se atribuye al efecto del uso de polvo de cerámica y las fibras de acero, que actúan como relleno, disminuyendo la cantidad de agua

disponible para lubricar los agregados y proporcionando resistencia al corte, lo que dificulta la fluidez del concreto.

B. Contenido de aire

En el diseño se consideró un contenido de aire igual al 2% tanto para el diseño del concreto patrón y las otras muestras. Por consiguiente, la tendencia observada en la Figura 4 indica un aumento constante en el contenido de aire. Al comparar los resultados obtenidos de las muestras de diseño con los del patrón de referencia, se constató que se presentó una variación del 1% en el caso de la mezcla PC5F1.5, mientras que en la mezcla PC10F1.5 la variación fue del 2%.

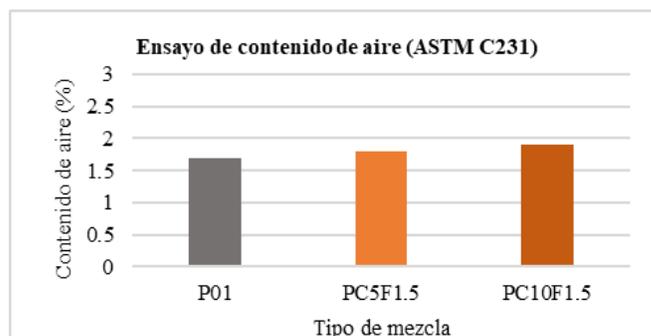


Fig. 4 Ensayo de contenido de aire de las diferentes mezclas de concreto

La interacción entre las fibras y la mezcla de concreto se refleja en la cantidad de aire atrapado de la mezcla. Además, al sustituir el cemento por polvo de baldosas cerámicas, se podría modificar la relación agua-cemento, lo que podría generar este fenómeno. Asimismo, a pesar de que la adición de fibras al concreto puede introducir burbujas de aire en el material, los resultados son considerados aceptables, ya que la variación se mantiene dentro de los límites establecidos.

C. Resistencia a la compresión

Las mezclas de concreto (P01, PC5F1.5 y PC10F1.5) cumplen con los requisitos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. Como se observa en la Figura 5, a los 7 días, el concreto patrón alcanzó una resistencia de 255.38 kg/cm², mientras que la muestra PC5F1.5 mostró un aumento del 2%, registrando una resistencia promedio de 261.18 kg/cm². Por otro. Así mismo, al llegar a los 14 días, el concreto P01 aumentó su resistencia a 289.09 kg/cm². La muestra PC5F1.5 demostró un incremento del 5%, con una resistencia promedio de 303.84 kg/cm². Luego, a los 28 días, el concreto P01 alcanzó una resistencia de 315.85 kg/cm², la muestra PC5F1.5 continuó su tendencia ascendente con un aumento del 3%, registrando una resistencia promedio de 323.77 kg/cm².

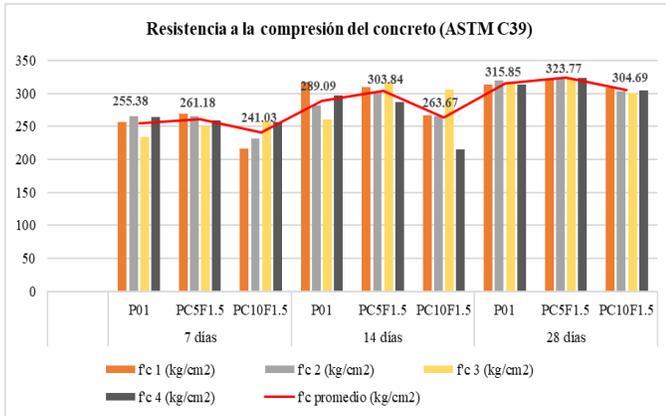


Fig. 5 Resistencia la compresión de las mezclas de concreto ensayadas a 7, 14 y 28 días.

D. Resistencia a la tracción

En la Figura 6 se observa que durante los primeros 7 días, la muestra con el mejor desempeño es PC5F1.5, con una resistencia promedio de 25.80 kg/cm², mientras que P01 muestra la resistencia más baja, con solo 20.14 kg/cm², representando un aumento del 28% en la resistencia de PC5F1.5 en comparación con P01. A los 14 días, la tendencia continúa, donde PC5F1.5 muestra la mayor resistencia con un promedio de 30.24 kg/cm², en comparación con 23.22 kg/cm² para el concreto P01, lo que representa un aumento del 30%. Esta diferencia se mantiene a los 28 días, donde PC5F1.5 alcanza una resistencia de 33.34 kg/cm², un aumento del 24% en comparación con P01, alcanzando una resistencia de 26.71 kg/cm².

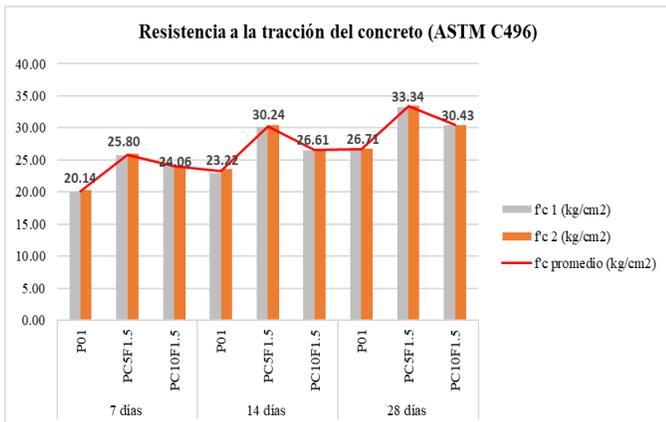


Fig. 6 Resistencia la tracción de las mezclas de concreto ensayadas a 7, 14 y 28 días.

E. Resistencia a la flexión

La Figura 7 muestra la resistencia a la flexión a diferentes periodos de tiempo. A los 7 días, PC5F1.5 aumenta un 12%, alcanzando una resistencia promedio de 45.56 kg/cm², mientras que PC10F1.5 aumenta un 7%, con una resistencia promedio de 43.57 kg/cm², en comparación con P01 que tiene 40.61 kg/cm². A los 14 días, los aumentos se mantienen con PC5F1.5 en un 11%, resistencia promedio de 48.85 kg/cm², y PC10F1.5 en un 8%, resistencia promedio de 47.55 kg/cm², comparado con P01 con 43.88 kg/cm². Finalmente, a los 28 días, PC5F1.5 tiene un aumento del 12%, con una resistencia promedio de 49.71 kg/cm², y PC10F1.5 un aumento del 3%, con una resistencia promedio de 45.87 kg/cm², en comparación con P01 con 44.54 kg/cm².

con P01 que tiene 40.61 kg/cm². A los 14 días, los aumentos se mantienen con PC5F1.5 en un 11%, resistencia promedio de 48.85 kg/cm², y PC10F1.5 en un 8%, resistencia promedio de 47.55 kg/cm², comparado con P01 con 43.88 kg/cm². Finalmente, a los 28 días, PC5F1.5 tiene un aumento del 12%, con una resistencia promedio de 49.71 kg/cm², y PC10F1.5 un aumento del 3%, con una resistencia promedio de 45.87 kg/cm², en comparación con P01 con 44.54 kg/cm².

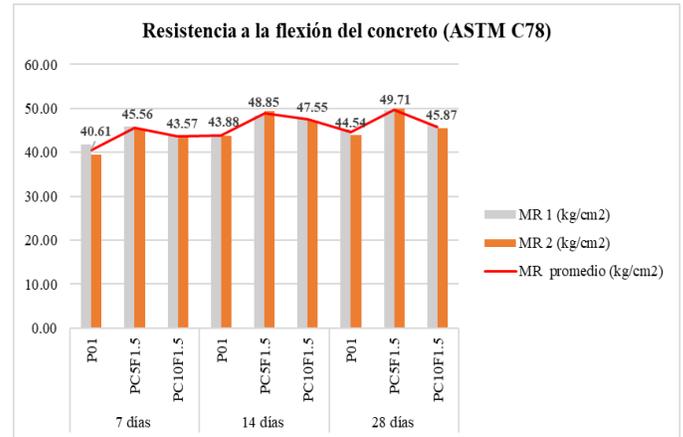


Fig. 7 Ensayo de resistencia a la flexión de las diferentes mezclas de concreto.

VIII. CONCLUSIONES

Este estudio respalda la viabilidad de mejorar la sostenibilidad del concreto mediante el reemplazo parcial de cemento con polvo de baldosas cerámicas y la adición de fibras de acero, sin comprometer significativamente sus propiedades en estado fresco y endurecido. La combinación de un reemplazo del 5% y 10% de cemento por polvo cerámico, junto con la adición del 1.5% de fibras de acero, resulta en una disminución de la trabajabilidad del concreto fresco, evidenciada por la reducción del asentamiento y un aumento del contenido de aire, en 1% y 2% a medida que se varían las proporciones. No obstante, es importante destacar que los resultados se mantienen dentro de límites aceptables.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los resultados indican que al sustituir el 5% del cemento por polvo cerámico y añadir el 1.5% de fibras de acero, se logra un aumento notable en la resistencia a la tracción y flexión del concreto, superando al concreto patrón en 18% y 11% a los 28 días, respectivamente. Por otro lado, la resistencia a la compresión se mantiene en niveles óptimos con un aumento del 3%.

En relación con la mezcla que presenta un reemplazo del 10% de cemento por polvo cerámico y la adición del 1.5% de fibras de acero (PC10F1.5), se observa un ligero aumento del 8.5% en la resistencia a la tracción y del 3% en la resistencia a la flexión en comparación con el concreto patrón a los 28 días. Sin embargo, se registra una reducción

del 4% en la resistencia a la compresión, atribuible al aumento en la relación agua/cemento.

Este fenómeno sugiere que el incremento en el porcentaje de reemplazo de cemento por polvo cerámico al 10% tiene un impacto más moderado en las propiedades mecánicas del concreto en comparación con la mezcla con solo un 5% de reemplazo. La disminución en la resistencia a la compresión, aunque presente, se equilibra en cierta medida gracias a la incorporación de fibras de acero, lo que contribuye a mantener la resistencia general del concreto a niveles aceptables.

REFERENCIAS

- [1] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production," *Earth System Science Data*, vol. 10, no. 1, pp. 195–217, Jan. 2018, doi: 10.5194/essd-10-195-2018.
- [2] G. Pulido Toledo. "¡Sorprendente! ¿Cuántas Fabricas de Cemento Hay En El Perú! - CeficPeru.org". *CeficPeru.org*. Accedido el 18 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://ceficperu.org/sorprendente-cuantas-fabricas-de-cemento-hay-en-el/>
- [3] "Market review," Malaysia Competition Commission (MyCC), Oct. 05, 2021. <https://www.mycc.gov.my/market-review>
- [4] P. Pliya and D. Cree, "Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 1–9, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.103.
- [5] L. Rodgers, "La enorme fuente de emisiones de CO₂ que está por todas partes y que quizás no conocías", *BBC News*, 17 de diciembre de 2018. Accedido el 10 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>.
- [6] Lee, C. T., Lim, J. S., Van Fan, Y., Liu, X., Fujiwara, T., & Klemeš, J. J. (2018). Enabling low-carbon emissions for sustainable development in Asia and beyond. *Journal of Cleaner Production*, 176, 726-735. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.110>
- [7] T. Proske, S. Hainer, M. Rezvani, and C. Graubner, "Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents — Mix design principles and laboratory tests," *Cement and Concrete Research*, vol. 51, pp. 38–46, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.04.011.
- [8] Taher, M. J., Abed, E. H., & Hashim, M. S. (2023). Using ceramic waste tile powder as a sustainable and eco-friendly partial cement replacement in concrete production. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.060>
- [9] Ay, N., & Ünal, M. (2000). The use of waste ceramic tile in cement production. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 497–499. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00202-7)
- [10] B. Molina y Pamela Terán, "ANÁLISIS DEL FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PASTAS DE CEMENTO SUSTITUIDAS PARCIALMENTE POR POLVO CERÁMICO", UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, QUITO, 2019.
- [11] Alabi, S. A., & Mahachi, J. (2022). Mechanical properties of sustainable concrete made with ceramic and sandcrete block wastes. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.086>
- [12] Lee, M.-G., Wang, W.-C., Wang, Y.-C., Hsieh, Y.-C., & Lin, Y.-C. (2022). Mechanical Properties of High-Strength Pervious Concrete with Steel Fiber or Glass Fiber. *Buildings*, 12(5), 620. <https://doi.org/10.3390/buildings12050620>
- [13] Gallo Arciniegas, L. P., González Peñuela, G., & Carrillo León, J. (2013). Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1), 117. <https://doi.org/10.18359/rcin.236>