

Effect of Polypropylene Fibres and Silica Fume on the Compressive Strength of Concrete Incorporating Recycled Aggregate

Juan Jesús Manuel Huayta Poma¹; Gilmer Challco Mamani²; Joseph Paul Linaja Ayala³
^{1,2,3} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U22332075@utp.edu.pe, c23404@utp.edu.pe, c28403@utp.edu.pe

Abstract– This article evaluates the influence of Polypropylene Fibers (FPP) and Silica Fume (HS) on the mechanical properties of a concrete with design compressive strength $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ incorporating Recycled Coarse Aggregate (AGR), as a sustainable alternative that reuses construction and demolition waste. The aggregates were characterized in accordance with ASTM standards, and the mix was designed using the ACI 211.1 method. Nine mixtures were produced in a Taguchi L9 orthogonal array, combining three levels of AGR (20, 50, and 100%), FPP (0.3, 0.5, and 0.7%), and HS (5, 7, and 9%). The slump of the nine mixtures and the 28-day compressive strength of 36 cylindrical specimens were measured. The results show that slump values ranged from 3.1 to 3.8 in, slightly lower than the theoretical slump of 4 in. Likewise, all mixtures exceeded the design strength, with values between 225.95 and 295.08 kg/cm^2 , representing increases from 7.6% up to 40.5% with respect to 210 kg/cm^2 . Furthermore, the optimal mix corresponded to 50% AGR, 0.7% FPP, and 9% HS. In conclusion, the combined incorporation of AGR, FPP, and HS makes it possible to produce concrete with $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ that exhibits controlled workability and mechanical performance superior to conventional concrete.

Keywords– recycled coarse aggregate; polypropylene fibres; silica fume; concrete; compressive strength.

Efecto de las fibras de polipropileno y el humo de sílice en la resistencia a la compresión del concreto que incorpora agregados reciclados

Juan Jesús Manuel Huayta Poma¹; Gilmer Challco Mamani²; Joseph Paul Linaja Ayala³
^{1,2,3} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U22332075@utp.edu.pe, c23404@utp.edu.pe, c28403@utp.edu.pe

Resumen– El presente artículo evalúa la influencia de las Fibras de Polipropileno (FPP) y el Humo de Sílice (HS) en las propiedades mecánicas de un concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con Agregado Grueso Reciclado (AGR), como alternativa sostenible que reutiliza residuos de construcción y demolición. Se caracterizaron los agregados según normas ASTM y el diseño de la mezcla con el método ACI 211.1. Se elaboraron nueve mezclas en un arreglo ortogonal L9 de Taguchi, combinando tres niveles de AGR (20, 50 y 100%), FPP (0.3, 0.5 y 0.7%) y HS (5, 7 y 9%). Se midieron el asentamiento de las nueve mezclas y la resistencia a la compresión a los 28 días en 36 probetas cilíndricas. Los resultados muestran que el asentamiento se ubicó entre 3.1 y 3.8 pulgadas, ligeramente inferior al asentamiento teórico de 4 pulgadas. Asimismo, las mezclas superaron la resistencia de diseño con valores entre 225.95 y 295.08 kg/cm^2 , representando incrementos de 7.6% hasta 40.5% respecto de los 210 kg/cm^2 . Además, se identificó que la dosificación óptima correspondió a 50% de AGR, 0.7% de FPP y 9% de HS. En conclusión, la incorporación combinada de AGR, FPP y HS permite formular un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con trabajabilidad controlada y un desempeño mecánico superior al concreto convencional.

Palabras clave– agregado grueso reciclado; fibras de polipropileno; humo de sílice; concreto; resistencia a la compresión.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector construcción es categorizado como una preocupación ambiental, debido a la generación masiva de residuos sólidos y al intensivo uso de recursos naturales. En esa línea, Khan et al. [1] señalaron que la construcción produce enormes volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD), en los que el concreto es un componente dominante. Asimismo, según la International Energy Agency (IEA), el sector de la construcción genera aproximadamente un 37 % de gases de efecto invernadero a nivel mundial [2]. Por ello, es considerado un sector primordial para su mitigación por ser categorizado como uno de los más contaminantes. También, según Martínez-Molina et al. [3], el aprovechamiento de los RCD como agregados en concreto reciclado contribuye de manera directa a la preservación ambiental, puesto que reduce la descarga de residuos, reutiliza materiales sin valor aparente y disminuye emisiones de CO_2 asociadas a extracción de materiales y transporte. En este contexto, el reto clave es diseñar mezclas

más sostenibles y optimizadas que controlen el desempeño del agregado reciclado y garanticen la durabilidad del material.

En estudios previos se determinaron que el uso de materiales reciclados en la producción del concreto reduce su desempeño mecánico, evidenciándose reducciones de hasta 16% en los estudios de Santos et al. [4], quienes evaluaron la influencia del empleo de agregado grueso reciclado para la elaboración de adoquines en porcentajes de 10%, 30%, 40% y 50%, determinando que la resistencia a la compresión se redujo en un 1.0%, 7.0%, 10.0% y 16.0%, respectivamente, con respecto a la muestra patrón de resistencia de 36.6 MPa; es decir que se presenta una relación directa, a mayor cantidad de agregado reciclado reemplazado se obtendrá una mayor reducción de la resistencia a la compresión.

Igualmente, Medeiros y Silva [5] determinaron reducciones de la resistencia a la compresión del 12.5% y el módulo de elasticidad en 5.0% en concretos con sustitución del 20% del agregado grueso natural por reciclado, aunque tuvieron mejoras en la resistencia a la tracción en un 12.0%.

Lo expuesto también se registra en el trabajo de Martínez et al. [3], quienes realizaron una revisión de la literatura con relación al uso de concreto de reciclado, concluyeron que el este material es una alternativa ante la falta de agregados pétreos y la protección de canteras; no obstante, estas no cumplirían con las condiciones establecidas en las normativas de construcción, recomendando explorar otros materiales para modificar las propiedades de los concretos así elaborados consiguiendo exitosas y económicas.

En ese sentido, en el Perú se viene empleando las fibras de polipropileno o humo de sílice para mejorar el desempeño de concreto elaborado con agregados naturales, con adecuados resultados. Ello también se puede corroborar en el trabajo de Do Amaral et al. [6], en el cual se evaluaron la influencia de las fibras de polipropileno y fibras de polietileno de alto modulo en el concreto, advirtiendo que el incremento de la resistencia a la compresión del concreto obtenido por dichos autores fue del orden de 3.6% para el caso de la primera fibra y una reducción de 7.2% con la segunda fibra.

Asimismo, Señas et al. [7] evaluaron la durabilidad del concreto con fibras de polipropileno (400 gr, 750 gr y 1000 gr por m^3 de concreto), obteniendo incrementos en la resistencia del concreto, y advirtieron que a mayor cantidad de fibras se obtiene una disminución del cuadro de fisuración. Mientras que Mendoza et al. [8] emplearon mayores cantidades de fibras de polipropileno (1, 3 y 5 kg/m^3), determinando una

disminución en la resistencia a la compresión debido a la reducción de la consistencia del concreto en su estado fresco.

Con relación al uso de humo de sílice, Sánchez et al. [9] emplearon nano-sílice y micro-sílice en el diseño de concreto autocompactante, determinando que los diseños con solo nano-sílice o micro-sílice incrementan la resistencia a la compresión. El caso más relevante de estos dos materiales es el caso del humo de sílice, debido a que se obtuvieron incrementos de 9.0%, 13% y 17% en la resistencia a la compresión del concreto con adición de dicho material en porcentajes de 2.5%, 5.0% y 7.5%, respectivamente.

Del mismo modo, Caballero et al. [10], Giménez et al. [11] y García et al. [12] analizaron la resistencia del concreto con adición de humo de sílice en porcentajes variados, advirtiendo incremento de hasta 15.0%, 25.0% y 33%, respectivamente.

Asimismo, se identificó trabajos de investigación en el cual se estudiaron el concreto empleando agregado reciclado y ceniza volante. Al respecto, Guardián et al. [13] estudiaron las propiedades mecánicas del concreto de bajo impacto ambiental empleando 35% de cenizas volantes, 15% de catalizador de craqueo catalítico y 20% y 100% de agregado gruesos reciclados, advirtiendo que las propiedades mecánicas se reducen con el aumento de agregado reciclado, a pesar de ello señalan que es adecuado su uso estructural.

De esta forma, la literatura evidencia que los RCD pueden valorizarse como agregado reciclado (AR) al triturarlos y cribarlos hasta obtener fracciones granulométricas especificadas, permitiendo sustituir parcialmente a los agregados naturales. Sin embargo, su uso aislado puede conllevar a desventajas técnicas, como menor resistencia a la compresión, mayor absorción de agua y menor trabajabilidad [14]. Por esta razón, se proponen soluciones complementarias como las fibras de polipropileno (FPP), que limitan la fisuración plástica y por retracción y aumentan la tenacidad, y el humo de sílice (HS), puzolana que aporta en la resistencia a la compresión y reduce la permeabilidad del concreto [15].

A pesar de estos hallazgos, la aplicación conjunta de estas tres soluciones sigue siendo muy limitada. Esta brecha entre la investigación y la práctica representa una oportunidad para innovar en la formulación de concretos más sostenibles. En este sentido, el objetivo principal de la investigación es evaluar la influencia combinada de las fibras de polipropileno y del humo de sílice en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión de un concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con agregado grueso reciclado.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

1) Agregado fino y grueso

Se realizó la caracterización de los agregados: la distribución granulométrica se determinó por tamizado según ASTM C136; la humedad total mediante secado en horno mediante ASTM C566; el peso específico y la absorción con los procedimientos específicos para grueso y fino según

ASTM C127 y C128; y el peso unitario suelto y varillado de los agregados con ASTM C29. En el caso del agregado fino, se verificó además el material más fino que $75 \mu\text{m}$ por lavado según ASTM C117.

En la Tabla I se presentan los resultados de la caracterización de los agregados, en los cuales se determinaron los parámetros que permitieron calcular las correcciones de agua y los ajustes de dosificación requeridos por el método de diseño de mezclas ACI 211.1 [16]. Se aprecia que el AGR presenta una absorción notablemente mayor (4.84 %) que el agregado grueso natural (0.73 %), asociada a su mayor porosidad y a las microfisuras generadas en la trituración; estos valores se emplean en el diseño de mezclas tras la corrección del contenido de agua.

TABLA I
RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

AGREGADOS	AF	AG	AGR
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1560	1464	1176
Peso Unitario Seco Compactado (kg/m ³)	1744	1550	1276
Peso Específico (kg/m ³)	2657	2671	2442
Módulo de fineza	3.08	7.86	6.78
Tamaño Máximo Nominal	3/8"	1 1/2"	1"
Porcentaje de absorción	1.76%	0.73%	4.84%
Contenido de humedad	2.30%	0.20%	3.00%

2) Agregado grueso reciclado

El agregado grueso reciclado fue suministrado por CAJAS ECOLÓGICAS S.A.C., el cual fue obtenido a partir de residuos de construcción y demolición de elementos de concreto. El material fue preseleccionado para retirar impurezas como residuos de plástico, madera y acero; luego se realizó trituración mecánica y clasificación por tamices hasta conformar una gradación continua con tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ pulgada.

3) Fibra de Polipropileno

Se empleó el producto SikaFiber Force-48 como macrofibras de polipropileno. Este material se caracteriza por su elevada tenacidad y estabilidad química, para la cual se incorporaron directamente al mezclador en forma gradual para asegurar su dispersión homogénea, siguiendo los niveles de dosificación del programa experimental y las recomendaciones del fabricante, a fin de controlar la fisuración plástica y por retracción y mejorar el comportamiento post-fisura.

4) Humo de sílice

Se utilizó el producto Sika Fume como humo de sílice. Esta es una adición puzolánica de sílice amorfa ultrafina, el cual se aplicó como reemplazo parcial del cemento en porcentaje de masa.

B. Taguchi

Cuando se intenta probar todas las combinaciones de un diseño factorial completo, el número de corridas incrementa a tal punto que resulta no viable. De esta manera, la propuesta de Taguchi resuelve esto con arreglos ortogonales que permiten estimar los efectos de los factores con muchos menos experimentos y, al mismo tiempo, diseñar mezclas robustas frente a la variabilidad del proceso.

Tal como se aprecia en la tabla 2, se definieron tres factores de control y tres niveles para la metodología de Taguchi: Agregado Grueso Reciclado (20, 50 y 100 %), Fibras de Polipropileno (0.3, 0.5 y 0.7 %) y Humo de Sílice (5, 7 y 9 %), con los cuales se estructuró el plan experimental.

TABLA II
FACTORES Y NIVELES DE TAGUCHI

Variable	Descripción	Nivel		
		1	2	3
AGR	Agregado Grueso Reciclado	20 %	50 %	100 %
FPP	Fibra de Polipropileno	0.3 %	0.5 %	0.7 %
HS	Humo de Sílice	5 %	7 %	9 %

Una vez definidos los factores y sus tres niveles, se seleccionó la matriz ortogonal L9 de Taguchi. En lugar de emplear un diseño factorial completo 3^3 , que exigiría 27 combinaciones experimentales, el arreglo L9(3²) permite evaluar los mismos tres factores utilizando únicamente 9 corridas. De este modo se mantiene la posibilidad de estimar de forma independiente los efectos principales de cada factor, reduciendo el tiempo del programa experimental, el consumo de materiales y los costos asociados.

TABLA III
MATRIZ ORTOGONAL L9 DE TAGUCHI

Nº	AGR	FPP	HS
1	20 %	0.3 %	5 %
2	20 %	0.5 %	7 %
3	20 %	0.7 %	9 %
4	50 %	0.3 %	7 %
5	50 %	0.5 %	9 %
6	50 %	0.7 %	5 %
7	100 %	0.3 %	9 %
8	100 %	0.5 %	5 %
9	100 %	0.7 %	7 %

En la Tabla 3, cada columna representa un factor y cada fila una de las nueve combinaciones evaluadas. La distribución equilibrada de los niveles asegura que todos aparezcan el mismo número de veces, lo que posibilita comparaciones consistentes entre factores. Si se requiriera un análisis más detallado de las interacciones, podría recurrirse a

un arreglo mayor como el L27(3³); sin embargo, para los fines de optimización inicial de este estudio, el L9 constituye una alternativa suficiente y eficiente.

C. Diseño de experimentos

Para este estudio se diseñaron nueve dosificaciones empleando la matriz ortogonal L9 de Taguchi. Asimismo, para cada dosificación se moldearon cuatro especímenes cilíndricos y se ensayaron a compresión a los 28 días, obteniéndose un total de 36 probetas, como se resume en la tabla 4.

TABLA IV
TOTAL DE MUESTRAS Y DOSIFICACIONES EMPLEADAS SEGÚN LA METODOLOGÍA L9 DE TAGUCHI

Nº	Dosificaciones	Edad	Subtotal
1	D210 + 20 % AGR + 0.3 % FPP + 5 % HS	28	4
2	D210 + 20 % AGR + 0.5 % FPP + 7 % HS	28	4
3	D210 + 20 % AGR + 0.7 % FPP + 9 % HS	28	4
4	D210 + 50 % AGR + 0.3 % FPP + 7 % HS	28	4
5	D210 + 50 % AGR + 0.5 % FPP + 9 % HS	28	4
6	D210 + 50 % AGR + 0.7 % FPP + 5 % HS	28	4
7	D210 + 100 % AGR + 0.3 % FPP + 9 % HS	28	4
8	D210 + 100 % AGR + 0.5 % FPP + 5 % HS	28	4
9	D210 + 100 % AGR + 0.7 % FPP + 7 % HS	28	4
Total de muestras			36

1) Ensayo de asentamiento

El asentamiento del concreto fresco se determinó para cada una de las nueve dosificaciones consideradas en el diseño experimental. El ensayo se realizó según los procedimientos de la norma ASTM C143, con el fin de evaluar la consistencia y trabajabilidad de cada mezcla durante el vaciado. En total se efectuaron nueve mediciones, una por cada diseño de mezcla de la matriz ortogonal L9, lo que permitió caracterizar el comportamiento en estado fresco y verificar la uniformidad de las condiciones de elaboración.

2) Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó conforme a la ASTM C39. Para la cual, los especímenes fueron curados en laboratorio hasta la edad de ensayo. Además, la carga se aplicó en forma continua y controlada hasta la falla, registrando la carga máxima; el valor de f'_c se obtuvo dividiendo dicha carga entre el área transversal corregida del cilindro. Para cada dosificación se ensayaron cuatro probetas a 28 días, reportándose el promedio y la dispersión de los resultados y verificando el cumplimiento de los criterios de aceptación establecidos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis de los resultados de los ensayos de asentamiento y compresión

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de asentamiento o Slump realizados para cada una de las nueve dosificaciones evaluadas.

TABLA V
RESULTADOS DEL ENSAYO DE ASENTAMIENTO PARA LAS NUEVE DOSIFICACIONES DEL DISEÑO L9

Nº	Dosificación	Slump (pulgadas)
1	D210 + 20 % AR + 0.3 % FPP + 5 % HS	3.2
2	D210 + 20 % AR + 0.5 % FPP + 7 % HS	3.1
3	D210 + 20 % AR + 0.7 % FPP + 9 % HS	3.7
4	D210 + 50 % AR + 0.3 % FPP + 7 % HS	3.8
5	D210 + 50 % AR + 0.5 % FPP + 9 % HS	3.7
6	D210 + 50 % AR + 0.7 % FPP + 5 % HS	3.8
7	D210 + 100 % AR + 0.3 % FPP + 9 % HS	3.5
8	D210 + 100 % AR + 0.5 % FPP + 5 % HS	3.6
9	D210 + 100 % AR + 0.7 % FPP + 7 % HS	3.7
Promedio		3.57

Los valores registrados muestran variaciones entre 3.1 y 3.8 pulgadas, reflejando el efecto combinado del porcentaje de AGR, FPP y HS sobre la trabajabilidad del concreto fresco. El promedio general del asentamiento fue de 3.57 pulgadas, ligeramente inferior al asentamiento teórico de 4 pulgadas esperado para un concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, lo cual era previsible debido a la mayor demanda de agua y la menor fluidez asociadas al uso de AGR y FPP. Aun así, los valores obtenidos se mantienen dentro de un rango de trabajabilidad aceptable para procesos de mezclado y vaciado.

Aunque las diferencias de valores de trabajabilidad son pequeñas, resultan estadísticamente significativas en el contexto de la tecnología de concreto con adiciones. La reducción más pronunciada 3.1 pulgadas se produjo en las mezclas con mayor contenido de fibras (0.7% FPP) y humo de sílice (9% HS). Esto se atribuye a que las fibras incrementan la fricción interna de la mezcla, mientras que la alta superficie específica del humo de sílice demanda una mayor cantidad de pasta para lubricar los agregados [6], [15]. No obstante, todas las mezclas permanecieron dentro de la tolerancia de ± 1 " aceptada para aplicaciones estructurales, manteniendo una trabajabilidad adecuada [17].

A continuación, la Tabla 6 resume los resultados de resistencia a la compresión a 28 días para las nueve mezclas evaluadas. Además, se muestra el promedio de las cuatro probetas ensayadas para cada dosificación.

TABLA VI
RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS PARA LAS NUEVE DOSIFICACIONES DEL DISEÑO L9

Nº	Dosificaciones	RC1	RC2	RC3	RC4	$\bar{x}$	σ	CV (%)
		(kg/cm ²)						
1	D210 + 20%AR + 0.3%FPP + 5%HS	218.8	233.4	224.1	227.5	225.95	6.13	2.71
2	D210 + 20%AR + 0.5%FPP + 7%HS	245.6	266.9	254.0	258.2	256.18	8.89	3.47
3	D210 + 20%AR + 0.7%FPP + 9%HS	257.3	261.0	253.4	263.3	258.75	4.31	1.67
4	D210 + 50%AR + 0.3%FPP + 7%HS	259.7	258.4	263.0	256.5	259.40	2.74	1.06
5	D210 + 50%AR + 0.5%FPP + 9%HS	282.5	280.2	278.6	273.3	278.65	3.86	1.39
6	D210 + 50%AR + 0.7%FPP + 5%HS	290.6	294.1	299.1	296.5	295.08	3.65	1.24
7	D210 + 100%AR + 0.3%FPP + 9%HS	283.0	279.8	273.4	281.6	279.45	4.26	1.52
8	D210 + 100%AR + 0.5%FPP + 5%HS	257.1	262.3	272.6	268.8	265.20	6.84	2.58
9	D210 + 100%AR + 0.7%FPP + 7%HS	280.4	280.4	286.9	283.0	282.68	3.09	1.09

La tabla anterior muestra que la resistencia promedio del concreto presenta variaciones asociadas a los diferentes niveles de AGR, FPP y HS. Los valores obtenidos fluctúan entre 225.95 kg/cm² y 282.68 kg/cm², evidenciando que todas las combinaciones superan la resistencia de diseño de 210 kg/cm². Este comportamiento sugiere que tanto la fibra como el humo de sílice contribuyen a un mejor desempeño mecánico, compensando las posibles debilidades del agregado reciclado mediante un refinamiento de la matriz de cemento y una mayor cohesión interna, lo cual puede apreciarse también la imagen siguiente:

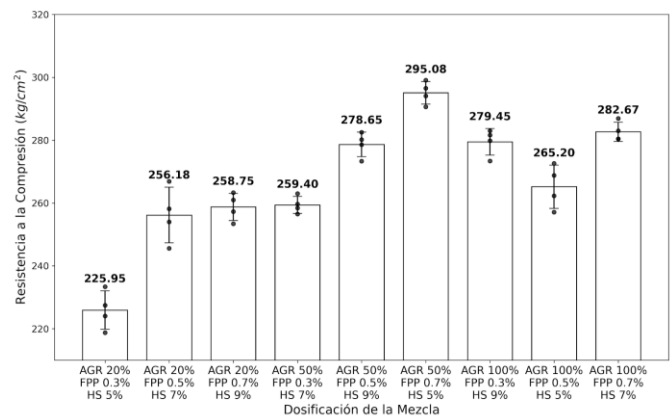


Fig. 1 Resultado del ensayo de compresión a los 28 días para las nueve dosificaciones del diseño L9

La variabilidad de la resistencia a la compresión se analizó mediante el Coeficiente de Variación (CV),

obteniendo valores que oscilan entre el 1.06% y el 3.47%. Estos resultados se consideran excelentes según los estándares del ACI, que establece un límite del 5% para ensayos de laboratorio controlados [16]. Esta baja variabilidad confirma la eficacia del HS para uniformizar la matriz cementicia y compensar la heterogeneidad intrínseca del AGR [14]. En la Tabla VIII se observa que la mezcla con 50% de AGR y 0.7% de FPP presentó la mayor estabilidad con un CV de apenas 1.24%, lo que valida la repetibilidad del diseño experimental bajo el arreglo de Taguchi.

B. Análisis estadístico de la matriz de Taguchi

El diseño experimental con el arreglo ortogonal L9 de Taguchi se implementó en el software Minitab, empleado para efectuar el análisis estadístico. En la interfaz se definieron los factores, niveles y el tipo de diseño L9, obteniéndose la matriz de experimentos y las salidas gráficas. Luego, se adoptó el criterio de optimización “más grande es mejor”, puesto que el objetivo es maximizar la resistencia a la compresión. Con esta configuración, Minitab calcula los coeficientes del modelo, las relaciones señal-ruido y las interacciones entre factores, permitiendo identificar con mayor precisión las variables de influencia significativa.

El análisis se realizó con un nivel de confianza del 95%, obteniéndose un nivel de ajuste de R^2 de 86.56 %, lo que indica que los tres factores explican una proporción elevada de la variabilidad de la resistencia promedio, mostrando una adecuada capacidad explicativa del diseño.

En la tabla 7, se detalla, entre otros, la probabilidad P para cada variable:

TABLA VII
ANÁLISIS DE VARIANZA DE RELACIONES SEÑAL-RUIDO

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajustado	MC Ajustado	F	P
AGR	2	1.994	1.994	0.997	4.060	0.198
FPP	2	0.958	0.958	0.479	1.950	0.339
HS	2	0.215	0.215	0.108	0.440	0.696
Error residual	2	0.492	0.492	0.246		
Total	8	3.659				

De lo anterior, se observa que los valores P asociados a los factores son superiores a 0.05, por lo que no se identifican efectos estadísticamente significativos sobre la variabilidad. No obstante, la magnitud de los coeficientes permite establecer una tendencia clara: el factor AR ejerce la mayor influencia en la relación S/N, seguido por la FPP, mientras que el HS presenta un efecto comparativamente menor.

La Figura 2 muestra la correspondiente gráfica de efectos principales. En conjunto, estos resultados permiten evaluar la influencia relativa de cada factor sobre el comportamiento resistente del concreto.

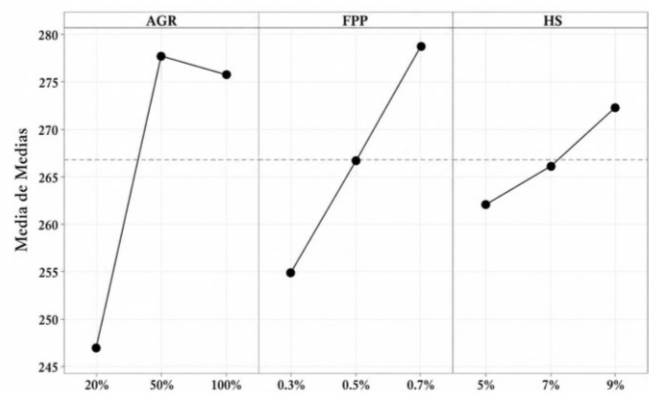


Fig. 2 Gráfica de efectos principales de las variables en la resistencia a la compresión.

De lo anterior, se permite analizar de manera integral el comportamiento del concreto tanto en términos de resistencia promedio. Por un lado, la Figura 1 corresponde a la gráfica de efectos principales para medias, la cual muestra cuánto resiste el concreto en cada nivel de los factores a partir del valor promedio.

Por otro lado, en la Tabla 8 se observa un incremento progresivo de la resistencia conforme aumentan los niveles de los factores, destacando el 50 % de agregado reciclado, el 0.7 % de fibra de polipropileno y el 9 % de humo de sílice como las combinaciones que generan los valores medios más elevados.

TABLA VIII
TABLA DE RESPUESTA PARA MEDIAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Nivel	AGR	FPP	HS
1	247.0	254.9	262.1
2	277.7	266.7	266.1
3	275.8	278.8	272.3
Delta	30.7	23.9	10.2
Clasificar	1	2	3

De la tabla anterior, se observa un incremento progresivo de la resistencia conforme aumentan los niveles de los factores, destacando el 50% de agregado reciclado, el 0.7% de fibra de polipropileno y el 9 % de humo de sílice como las combinaciones que generan los valores medios más elevados.

Aunque la investigación se centró en la resistencia a la compresión, el incremento progresivo observado (hasta un 40.5% superior al diseño) sugiere una mejora sustancial en la tenacidad y el control de la deformación. La incorporación de FPP al 0.7%, caracterizadas por su elevada tenacidad, no solo previene la propagación de microfisuras, sino que, en sinergia con el HS, optimiza la transferencia de esfuerzos en la matriz. Mientras el HS densifica la pasta mediante su acción puzolánica, las fibras actúan como puentes de unión que mitigan el comportamiento frágil típico de los concretos con altos contenidos de AGR. Esta combinación es crítica para

mantener un módulo de elasticidad competitivo, compensando la menor rigidez intrínseca del AGR

Asimismo, se realizó el ANOVA del asentamiento del concreto fresco con el propósito de evaluar la influencia de los factores AGR, FPP y HS sobre la trabajabilidad de las mezclas del diseño experimental L9. En la Tabla 9 se presentan las respuestas por medias del asentamiento para cada nivel de los factores evaluados, mientras que la Figura 3 muestra la gráfica de efectos principales correspondiente, lo cual permite analizar la influencia relativa de cada variable sobre la trabajabilidad del concreto fresco.

TABLA IX
ANÁLISIS DE VARIANZA DE RELACIONES SEÑAL-RUIDO

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
AGR	2	1.8168	1.8168	0.90840	3.25	0.235
FPP	2	0.7928	0.7928	0.39640	1.42	0.413
HS	2	0.1437	0.1437	0.07187	0.26	0.795
Error residual	2	0.5584	0.5584	0.27919		
Total	8	3.3117				

También, en la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis de varianza de las relaciones señal-ruido correspondientes al asentamiento del concreto fresco. Se observa que el factor agregado reciclado presenta la mayor suma de cuadrados ajustada de 1.8168, seguido por las fibras de polipropileno de 0.7928 y el humo de sílice de 0.1437, lo que evidencia que el contenido de agregado reciclado ejerce la mayor influencia relativa sobre la variabilidad de la trabajabilidad.

En la Tabla 10 se presentan las respuestas por medias del asentamiento del concreto fresco para cada nivel de los factores evaluados, mientras que la Figura 3 muestra la gráfica de efectos principales correspondiente. De lo anterior, se identifica que el nivel correspondiente al 50 % de agregado reciclado, 0.7 % de fibras de polipropileno y 9 % de humo de sílice presenta los mayores valores promedio de asentamiento, constituyendo la combinación más favorable en términos de trabajabilidad entre las dosificaciones evaluadas.

TABLA X
TABLA DE RESPUESTA PARA MEDIAS DE ASENTAMIENTO

Nivel	AGR	FPP	HS
1	3.333	3.500	3.533
2	3.767	3.467	3.533
3	3.600	3.733	3.633
Delta	0.433	0.267	0.100
Clasificar	1	2	3

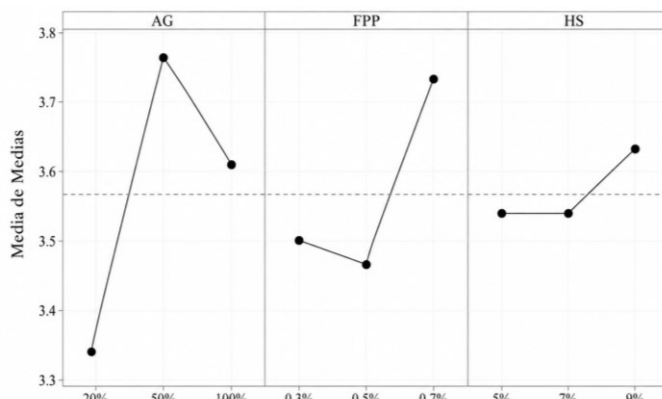


Fig. 3 Gráfica de efectos principales de las variables en el slump.

En resumen, el método de Taguchi permite analizar de manera integral el comportamiento del concreto en términos de resistencia promedio y el asentamiento, considerando cada nivel de los factores a partir del valor promedio.

C. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación combinada de AGR, FPP y HS permite mantener una trabajabilidad adecuada y, al mismo tiempo, mejorar de forma consistente la resistencia a la compresión respecto de la resistencia de diseño de 210 kg/cm². El asentamiento medido se ubicó entre 3.1 y 3.8 pulgadas, con un promedio de 3.57 pulgadas, valor ligeramente inferior al asentamiento teórico de 4 pulgadas esperado para un concreto de 210 kg/cm², lo que era previsible por la mayor absorción del AGR y el efecto de las fibras sobre la fluidez. Esta reducción moderada de consistencia se mantiene dentro de un rango operativo aceptable y es coherente con lo reportado por autores que señalan una menor trabajabilidad en concretos con RCD debido a la porosidad y al mortero adherido del agregado reciclado, lo que exige ajustes de agua y aditivos para preservar la manejabilidad de la mezcla [14]. Asimismo, la ligera disminución del asentamiento puede influir en la dispersión homogénea de las fibras dentro de la matriz y en el proceso de compactación del concreto fresco, especialmente en mezclas con alto contenido de agregado reciclado.

Asimismo, el análisis de varianza del asentamiento mostró que el agregado reciclado constituye el factor con mayor influencia relativa sobre la trabajabilidad, seguido por las fibras de polipropileno y el humo de sílice; sin embargo, ninguno de los factores evaluados presentó significancia estadística ($p > 0.05$), lo cual indica que las variaciones observadas en el asentamiento se mantienen dentro de rangos controlados compatibles con condiciones normales de colocación y compactación del concreto fresco.

En estado endurecido, todas las dosificaciones superaron la resistencia de diseño, con valores promedio entre 225.95 y 295.08 kg/cm². Esto implica que, aun en la combinación menos resistente, la mezcla excede la resistencia especificada en aproximadamente 7.6 %, mientras que la dosificación más favorable alcanza incrementos cercanos al 40.5 % respecto de

los 210 kg/cm². Este comportamiento confirma que la combinación de AGR con FPP y HS no solo compensa las debilidades asociadas al uso de agregados reciclados, sino que genera un concreto con desempeño mecánico superior al patrón de diseño, en línea con los hallazgos de de Do Amaral et al. [6] y Señas et al. [7], quienes obtuvieron incrementos de 3.6% y 10.0%, respectivamente.

De forma similar, los resultados obtenidos guardan coherencia con los reportados por [10,11,12], quien encontró que el concreto con agregado reciclado y microsílíce alcanzó en promedio una resistencia a la compresión 23.3 % superior a la del concreto con agregado natural. Este incremento se atribuye a la acción puzolánica del humo de sílice, que rellena los poros y reacciona con la cal libre para formar productos cementantes adicionales, lo que densifica la matriz y mejora la zona de transición interfacial, reduciendo su porosidad y la presencia de microfisuras. Además, la incorporación de humo de sílice contribuye a mejorar la zona de transición interfacial entre la pasta y el agregado reciclado, la cual suele presentar mayor porosidad debido al mortero adherido. La reducción del tamaño de poro y la formación adicional de gel C-S-H favorecen una mejor adherencia pasta-agregado, compensando parcialmente las debilidades mecánicas asociadas al uso de agregado reciclado.

El análisis Taguchi confirma que el porcentaje de AGR es el factor más influyente sobre la respuesta, seguido por la FPP y, en menor medida, por el HS, tanto en la tabla de ANOVA de la relación señal-ruido como en las tablas de respuesta para medias y S/N. A nivel de medias, el incremento del AGR de 20 a 50 % eleva la resistencia promedio de 247.0 a 277.7 kg/cm², es decir, un aumento de alrededor de 30.7 kg/cm², mientras que pasar de 50 a 100 % produce solo una ligera reducción hasta 275.8 kg/cm².

En términos relativos, las mezclas con 20, 50 y 100 % de AGR presentan incrementos promedio de aproximadamente 17.6, 32.2 y 31.3 % sobre la resistencia de diseño, respectivamente, lo que indica que el nivel de reemplazo del agregado reciclado puede llevarse hasta 50 % e incluso 100 % sin penalizar la resistencia, siempre que se controle la dosificación de HS y FPP. Este desempeño contrasta con lo documentado por Moreno Anselmi et al. [17], quienes reportaron reducciones de hasta 30 % de la resistencia al reemplazar 100 % del agregado grueso por ladrillo triturado, y refuerza la idea de que la combinación adecuada de puzolanas y fibras puede revertir el efecto negativo típico de un uso elevado de RCD [17,18]. Este comportamiento puede explicarse por la presencia de mortero adherido en el agregado reciclado, el cual incrementa la absorción de agua y la rugosidad superficial, favoreciendo la adherencia mecánica con la pasta de cemento. Aunque este mortero residual suele asociarse con una mayor porosidad, su efecto puede ser compensado mediante la incorporación de humo de sílice, que densifica la matriz y mejora la calidad de la zona de transición.

En cuanto al efecto de las fibras de polipropileno, la tabla de respuesta para medias muestra que al aumentar la FPP de

0.3 a 0.7 % la resistencia promedio se incrementa de 254.9 a 278.8 kg/cm², lo que supone un aumento de aproximadamente 23.9 kg/cm² y ubicaciones relativas del orden de 21.4, 27.0 y 32.8 % por encima de la resistencia de diseño para los niveles de 0.3, 0.5 y 0.7 %, respectivamente. Este comportamiento es consistente con las investigaciones que atribuyen a las FPP la capacidad de controlar la fisuración plástica y por retracción y de mejorar la tenacidad del concreto al actuar como un refuerzo tridimensional no corrosivo [3,15].

En particular, los incrementos de resistencia observados en este estudio superan el orden de 4.9 a 6.8 % reportado para concretos reciclados con FPP dosificadas entre 0.2 y 0.4 %, lo que sugiere que, en presencia de HS y con una adecuada corrección de la relación agua cemento, el aumento de la dosificación de fibras hasta 0.7 % permite aprovechar mejor su efecto de puenteo de fisuras sin comprometer de manera crítica la trabajabilidad.

Por otro lado, desde la perspectiva de la durabilidad, el uso de AGR plantea desafíos debido a su alta absorción (4.84%) y porosidad derivada del mortero adherido [14]. No obstante, la discusión técnica permite inferir una mejora en la permeabilidad del sistema. La adición de un 9% de humo de sílice actúa como un 'filler' físico y reactivo que refina la Zona de Transición Interfacial (ITZ) entre el mortero viejo del AGR y la nueva pasta de cemento [13], [15]. Este refinamiento de poros reduce la interconectividad capilar, lo que potencialmente incrementa la resistencia ante agentes agresivos, a pesar de la naturaleza porosa del agregado reciclado [13]. Asimismo, el control de la fisuración plástica por las fibras es un factor determinante para la durabilidad a largo plazo, ya que limita las vías de ingreso de humedad hacia el interior del concreto [6], [7].

Si bien el presente estudio se centró en la resistencia a la compresión como propiedad principal de evaluación, la incorporación de fibras de polipropileno suele generar mejoras más significativas en la resistencia a tracción indirecta, resistencia a flexión y comportamiento post-fisuración del concreto. En este sentido, futuras investigaciones podrían complementar la caracterización mecánica mediante la evaluación de estas propiedades, con el fin de obtener una comprensión más integral del desempeño estructural del concreto con agregado reciclado reforzado con fibras y humo de sílice.

IV. CONCLUSIONES

Las nueve mezclas diseñadas con 20 %, 50 % y 100 % de agregado reciclado, combinadas con fibras de polipropileno (0.3 %, 0.5 % y 0.7 %) y humo de sílice (5 %, 7 % y 9 %), permitieron elaborar concretos con asentamientos entre 3.1 y 3.8 pulgadas, con un promedio de 3.57 pulgadas. Aunque este valor es ligeramente inferior al asentamiento teórico de 4 pulgadas, la trabajabilidad se mantuvo en un rango adecuado para el mezclado y su colocación, confirmando que el uso conjunto de AGR, FPP y HS no compromete el desempeño del concreto en su estado fresco.

En estado endurecido, todas las dosificaciones superaron la resistencia de diseño de 210 kgf/cm², con valores promedio entre 225.95 y 295.08 kgf/cm² por dosificación. Esto implica incrementos aproximados de 7.6% en la mezcla menos resistente y de hasta 40.5% en la mezcla más favorable, evidenciando que la combinación de AGR, FPP y HS no solo compensa las debilidades del agregado reciclado, sino que mejora de manera significativa la resistencia a compresión.

El análisis con la metodología L9 de Taguchi mediante el software Minitab mostró que el porcentaje de AGR es el factor de mayor influencia sobre la resistencia, seguido por el porcentaje de fibras de polipropileno y, en menor medida, por el humo de sílice. A nivel de medias y relaciones señal/ruido, se identificó como combinación óptima teórica el nivel de 50 % de AGR, 0.7 % de FPP y 9 % de HS, mientras que, dentro de las mezclas ensayadas, la dosificación D210 + 50 % AR + 0.7 % FPP + 5 % HS alcanzó la mayor resistencia promedio de 295.08 kg/cm².

Considerando el comportamiento en estado fresco, los resultados de compresión y el análisis estadístico, se concluye que el concreto con reemplazos de 50% e incluso 100% de agregado grueso reciclado, reforzado con fibras de polipropileno y humo de sílice, es técnicamente viable como material sostenible para la construcción en elementos de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, al reducir el consumo de agregados naturales y valorizar los residuos de construcción y demolición sin sacrificar el desempeño mecánico.

En el diseño de mezclas con altos porcentajes de AGR se recomienda ajustar el contenido de agua y el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes, a fin de compensar la mayor absorción del agregado reciclado y mantener asentamientos en el entorno de 3.5 a 4.0 pulgadas, dentro de la tolerancia de ± 1 " aceptada para aplicaciones estructurales, manteniendo una trabajabilidad adecuada [17].

A pesar de la alta absorción característica del agregado reciclado (4.84%), se concluye que la inclusión de un 9% de humo de sílice actúa como un agente densificador de la zona de transición interfacial (ITZ). Este refinamiento de la estructura de poros, sumado al control de la fisuración plástica proporcionado por las fibras de polipropileno, permite inferir una mejora sustancial en la durabilidad y permeabilidad del concreto frente a entornos agresivos, consolidándolo como una alternativa sostenible y técnicamente viable [13], [15].

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Tecnológica del Perú, quienes contribuyeron con el desarrollo del presente estudio.

REFERENCIAS

- [1] M. Khan, M. Khan, R. Choudhry, S. Khahro, y Z. Memon, "Performance analysis of fiber reinforced recycled aggregate concrete at elevated temperatures using response surface methodology," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 12916, pp. 1-17, Abril 2025.
- [2] United Nations Environment Programme, "Building materials and the climate: constructing a new future," 2023.
- [3] W. Martínez, A. Torres, E. Alonso, H. Chávez, H. Hernández, C. Lara, W. Martínez, J. Pérez, J. Bedolla y F. Gonzáles, "Concreto reciclado: una

revisión," *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, vol. 5, no. 3, pp. 235-248, Diciembre 2015.

- [4] C. Santos, y M. Blas, "Evaluation of the physical and mechanical behavior of concrete $f'c = 28 \text{ MPa}$ with partial replacement of coarse recycled aggregate in paving stones, Trujillo." 23.^a *Multiconferencia Internacional LACCEI para Ingeniería, Educación y Tecnología*, DOI: 10.18687/LACCEI2025.1.1.352.
- [5] C. Medeiros, y V. Silva, "Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios," vol. 25, no. 1, 2020.
- [6] J.C. Do Amaral, L.C. Ferreira, y W. Guadagnin, "Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto," vol. 22, no. 1, 2017.
- [7] L. Señas, N. Ortega, C. Priano, y G. Cabo, "Durabilidad de hormigones con fibras de polipropileno frente a la corrosión de las armaduras," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 28, no. 1, pp.41-47, Diciembre 2006.
- [8] C.J. Mendoza, C. Aire, y P. Dávila, "Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido," *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, vol. 2, no. 2, pp. 35-47, Junio 2011.
- [9] E. Sánchez, J. Bernal, N. León, y A. Moragues, "Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice," *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, vol. 6, no. 1, pp. 1-14, Abril 2016.
- [10] P. Caballero, C. Damiani, y Á. Ruiz, "Optimización del concreto mediante la adición de nanosílice, empleando agregados de la cantera de Añashuayco de Arequipa," *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 36, no. 1, pp. 71-87, Diciembre 2021.
- [11] A. Giménez, y L. Diaz, "Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de bloques de concreto elaborados con sustitución parcial del agregado por arena y polvo de sílice," vol. 25, no. 2, pp. 46-58, Diciembre 2024.
- [12] Y. García, R. Torres, M. Saba, E. Quiñones, y J. Torres, "Combined effect of nano-silica and silica fume to improve concrete workability and compressive strength: a case study," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 25, no. 1, pp. 1-26, Junio 2023.
- [13] H. Guardián, P. Garcés, E. Zornoza, y E. García, "Durability of concrete with pozzolanic admixtures and recycled aggregates," *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, vol. 11, no. 3, pp. 17-30, Setiembre 2021.
- [14] I. Martínez, y C. Mendoza "Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados," *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, vol. 7, no. 3, pp. 151-164, Setiembre 2006.
- [15] Ö. Tan, y A. Sahin, "Optimización de la resistencia a compresión de lechadas de cemento reforzadas con aditivos," *Materiales de Construcción*, vol. 57, no. 288, pp. 91-98, Diciembre 2007.
- [16] ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete," 2002.
- [17] L. Moreno, M. Ospina, y K. Rodríguez, "Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, no. 4, pp. 635-642, Setiembre 2018.
- [18] M. Costa, D. Valões, C. Nascimento, E. Lima, G. Silva, T. Silva, y T. Santos, "Analysis of concrete characteristics with the replacement of natural fine aggregate by industrial solid waste," *Revista ALCONPAT*, vol- 12(3), pp. 328-346, Setiembre 2022.