

Optimización del concreto no estandarizado mediante la sustitución del agregado fino por escoria de cobre (0.5%, 1% y 1.5%) y la adición de 40 gr de fibra de cobre para alcanzar una resistencia mínima de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Lopez Ishpilco Alex Uver ¹; Pisco Lopez Mireya Rosita ²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, N00350215@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, N00364477@upn.pe

Abstract– *The study evaluated the improvement in compressive strength of concrete made with non-standardized aggregates through the partial substitution of fine aggregate with copper slag (0.5%, 1%, and 1.5%) and the addition of 40 g of copper fiber, considering a target strength of 210 kg/cm² according to Peruvian standards. The aggregates were characterized through physical tests, revealing deviations from the standard limits, which justified their analysis under non-standard conditions. The results showed that, at 7 days, the mixture with 1.5% copper slag and 40 g of fiber reached a strength of 146.09 kg/cm², representing the best initial performance. At 14 days, the mixture with 0.5% copper slag without fiber registered 207.26 kg/cm², demonstrating the highest performance at intermediate ages. At 28 days, the mixture with 0.5% copper slag and 40 g of fiber achieved a maximum compressive strength of 293.68 kg/cm², significantly exceeding the target value of 210 kg/cm². Statistical analysis using ANOVA ($p < 0.05$) confirmed significant differences between treatments, while Tukey's test identified the most efficient combinations. In conclusion, the partial substitution of fine aggregate with copper slag increases concrete strength, with the 1.5% slag and 0.5% slag plus 40 g of fiber mixtures standing out as the most effective alternatives. These results support the technical feasibility of the proposal and its potential as a sustainable solution.*

Keywords– *Non-standard concrete, copper slag, copper fiber, compressive strength, sustainability, alternative materials.*

I. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material estructural más empleado en la construcción civil, siendo su propiedad más relevante la resistencia a la compresión, ya que esta garantiza el adecuado comportamiento y la seguridad de los elementos estructurales. En este sentido, la calidad de los agregados resulta fundamental, debido a que influye directamente en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del concreto. No obstante, en diversas regiones del Perú, el acceso a agregados que cumplan con los requisitos establecidos en la NTP 400.037 es limitado, lo que obliga al uso de materiales no estandarizados que pueden afectar el desempeño del concreto.

Ante esta situación, surge el interés por mejorar el comportamiento mecánico del concreto, especialmente su resistencia a la compresión, mediante la evaluación de alternativas que permitan optimizar su desempeño. En este contexto, se plantea analizar el efecto de la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre, así como la incorporación de fibra de cobre, empleando agregados no estandarizados, es decir, materiales que no cumplen con las especificaciones establecidas en la Norma Técnica Peruana 400.037. El propósito es determinar si estas alternativas permiten mejorar la resistencia del concreto, reducir la dependencia de agregados convencionales y, al mismo tiempo, promover el aprovechamiento de residuos industriales bajo un enfoque sostenible.

Para esto [1] establece los requisitos de calidad que los agregados tanto finos como gruesos usados en la elaboración del concreto estructural. Indica cuales deben ser los rangos granulométricos: para el agregado fino (arena), el material que pasa por el tamiz N°4 debe ser entre 95% y 100%, y el que pasa por el tamiz N°200 no debe exceder al 3%. Para el agregado grueso (grava), el material retenido en el tamiz de 1½" debe encontrarse en el rango de 0% al 5%, y el que pasa por el tamiz N°4 de 0% a 10%, esto depende del tamaño nominal.

La [1] también indica cual debe ser el rango mínimo y máximo del módulo de finura del agregado fino (arena), el cual estaría entre 2.3 y 3.1 respectivamente.

Según [2] indica los valores mínimos y máximos respecto a la resistencia a la compresión del concreto armado, los cuales son 21 MPa y 70MPa.

La presente investigación se sustentó en una revisión bibliográfica de artículos científicos, tesis universitarias, normativas y libros especializados previamente analizados. Como principal referencia se consideró la Norma Técnica E.060: Concreto Armado, la cual establece una resistencia mínima a la compresión de 21 MPa para concreto estructural. En base a este criterio, el estudio se orientó a alcanzar dicho valor empleando agregados no estandarizados, mediante la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre y la incorporación de fibra de cobre como material de refuerzo.

Diversos estudios han evaluado la incorporación de escoria de cobre como material de adición en el concreto, evidenciando mejoras en la resistencia a la compresión. En este sentido, se ha reportado que la adición de escoria en proporciones de 5%, 10% y 15% permite alcanzar resistencias de hasta 381.38 kg/cm² a los 28 días, superando ampliamente al concreto convencional [3]. Asimismo, otros estudios han evidenciado que la incorporación en proporciones del 20% y 30% puede generar resistencias de hasta 272.5 kg/cm², superiores al concreto de referencia [4]. Estos resultados confirman que la escoria de cobre contribuye a mejorar el desempeño mecánico del concreto, aunque su efectividad depende de la dosificación empleada.

Por otro lado, las investigaciones que analizan la escoria de cobre como sustituto parcial del agregado fino son más limitadas. En este sentido, se ha reportado que sustituciones del 10%, 20% y 30% permiten alcanzar resistencias de hasta 253.79 kg/cm² a los 28 días, superando al concreto convencional [5]. Este comportamiento se atribuye a la forma angular y mayor densidad de la escoria, lo que favorece el empaquetamiento de partículas y mejora la adherencia con la pasta de cemento. Sin embargo, la evidencia sigue siendo reducida, especialmente en bajas proporciones de sustitución, lo que justifica la necesidad de continuar investigando en este campo.

Luego de revisar nuestras referencias bibliográficas, optamos por enfocar nuestra investigación siguiendo ideas y resultados más importantes que identificamos en las referencias consultadas. En ese sentido, la investigación se enfocó en analizar si los agregados no estandarizados pueden alcanzar una resistencia de $f'c = 210$ kg/cm², identificando como principal vacío el escaso estudio del uso de escoria de cobre como sustituto del agregado fino.

Al analizar la problemática, observamos que los agregados no estandarizados, en la mayoría de los casos, no logran alcanzar la resistencia mínima requerida para el concreto. Luego de revisar la bibliografía existente, se evidenció que la mayoría de investigaciones se enfocan en la adición de escoria de cobre como material complementario, por otro lado, los estudios donde se emplea la escoria de cobre como sustituto parcial del agregado fino son escasos.

Para ello, se plantearon dos propuestas experimentales: sustituir parcialmente el agregado fino con escoria de cobre

(0.5%, 1% y 1.5%) y evaluar su efecto tanto de forma individual como combinada con la adición de 40 g de fibra de cobre.

El **objetivo**: es cumplir con la Norma Técnica Peruana E.060, evaluando la resistencia a la compresión del concreto mediante la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre en diferentes porcentajes, así como analizar la influencia del uso combinado de escoria y fibra de cobre. Además, se busca determinar si estas propuestas permiten alcanzar o superar la resistencia mínima requerida de $f'c = 210$ kg/cm² y valorar su viabilidad técnica.

Siendo así nuestra **hipótesis nula (H0)**: La sustitución del agregado fino por escoria de cobre (0.5%, 1% y 1.5%) y la adición de 40 g de fibra de cobre no tiene efecto significativo sobre la resistencia a la compresión del concreto, y la resistencia $f'c$ del concreto no alcanza 210 kg/cm². Por otro lado, nuestra **hipótesis alternativa (HA)**: La sustitución del agregado fino por escoria de cobre (0.5%, 1% y 1.5%) y la adición de 40 g de fibra de cobre mejora significativamente la resistencia a la compresión del concreto, logrando que $f'c$ alcance o supere los 210 kg/cm².

II. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, dado que se manipula la variable principal “porcentaje de sustitución del agregado fino por escoria de cobre (0.5%, 1%, 1.5%) y la adición de fibra de cobre (40gr)”, para evaluar sus efectos en la **resistencia a la compresión del concreto**. Este enfoque nos permite obtener resultados objetivos y verificables, siguiendo un procedimiento secuencial y controlado, donde cada etapa depende de los datos obtenidos con anterioridad. De este modo, se puede comparar los efectos de diferentes proporciones y determinar si las alternativas propuestas cumplen con la resistencia mínima exigida por la normativa, ofreciendo soluciones prácticas y sostenibles para el uso de agregados no estandarizados.

El diseño de investigación es **experimental**, dado que se utilizan cuando no es posible asignar sujetos de forma aleatoria, ya que los grupos suelen estar preseleccionados. A diferencia de los preexperimentales, donde incluyen un grupo de control. Además, permiten medir la variable dependiente en múltiples momentos y manipular la variable independiente en distintos niveles para optimizar los resultados [6]. En este estudio se analiza cómo se comporta la resistencia a la compresión de las probetas de concreto elaboradas mediante la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre (E.C) en diferentes porcentajes siendo estas el 0.5%, 1% y 1.5%, y por otro lado también las probetas de concreto elaboradas mediante sustitución del agregado fino por escoria de cobre en los porcentajes antes mencionados pero esta vez con aditivo de fibra de cobre (F.C) (40gr), además deberán ser comparadas con las probetas de concreto sin sustitución, que

de ahora en adelante se le reconocerá como muestra patrón (M.P).

Los ensayos se desarrollarán conforme a las normas peruanas: NTP 339.185-Contenido de humedad [7]; NTP 400.012-Granulometría [8]; NTP 400.021-Peso específico y absorción del agregado grueso [9]; NTP 400.022-Peso específico y absorción del agregado fino [10]; NTP 339.046-Peso unitario del concreto [11]; NTP 339.035-Asentamiento del concreto [12]; NTP 339.033- Elaboración y curado de especímenes de concreto en campo [13]; NTP 339.034-Resistencia a la compresión [14].

Del diseño de mezcla, se empleará el método ACI “American Concrete Institute”, que nos permite definir las proporciones de cemento, agregados y agua para obtener la resistencia requerida, $f'c=210\text{kg/cm}^2$. En este caso, se utilizará una dosificación de **1: 2.25 : 2.8 : 22.91**, correspondiente a cemento, agregado fino, agregado grueso y agua efectiva, respectivamente. Este diseño garantiza que las probetas cumplan con los estándares de calidad y facilitando la evaluación de la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre y con adición de fibra de cobre.

TABLA I
Cantidad De Probetas De Concreto A Ensayar

ÍTEM	Edad de ensayos (días)		
	7	14	28
Muestra Patrón	3	3	3
0.5% E.C	3	3	3
1% E.C	3	3	3
1.5% E.C	3	3	3
0.5% E.C + F.C	3	3	3
1% E.C + F.C	3	3	3
1.5% E.C + F.C	3	3	3
Total	63		

Nota: Entendemos por E.C como escoria de cobre y F.C como fibra de cobre. Se utilizará moldes de 4"x8" para realizar las probetas a ensayar.

Decidimos incorporar escoria de cobre en la mezcla puesto que presentan características físicas similares al agregado fino, lo que permite su uso como material sustituto sin alterar significativamente la trabajabilidad del concreto. La escoria de cobre posee una granulometría fina, textura rugosa, forma angular y un peso específico 3.4 g/cm^3 , lo que contribuye a mejorar la adherencia con la pasta de cemento. Asimismo, se adicionará la fibra de cobre, el cual posee una alta resistencia a la tracción y buena capacidad de refuerzo, ayudando a mejorar la cohesión interna y reducir la aparición de fisuras en el concreto endurecido. Por otro lado, en comparación, el agregado fino tiene un peso específico de 2.56 g/cm^3 , tiene una forma más redondeada y superficie lisa. Gracias a las similitudes y ventajas, la escoria de cobre se plantea como un material alternativo viable para sustituir parcialmente el agregado fino en diferentes proporciones.

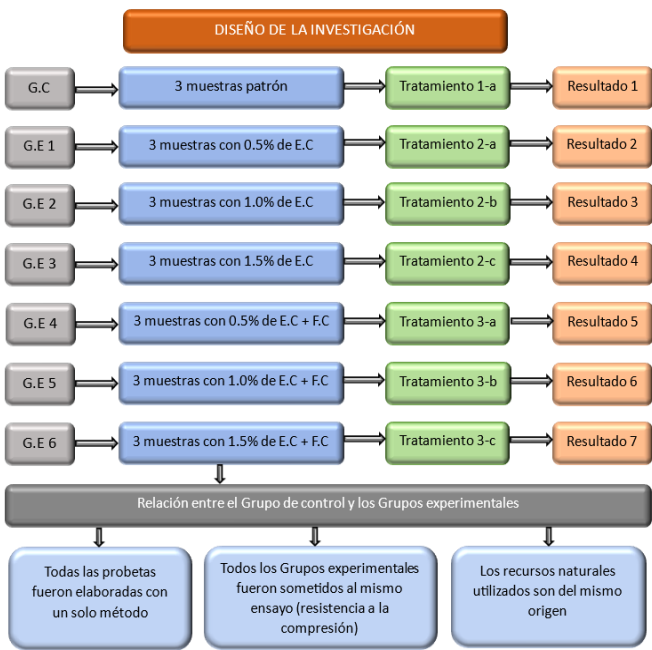


Fig. 1 Diseño de la investigación.
Nota: Esquema metodológico del estudio.

De la Fig. 1, se entiende por E.C: escoria de cobre y F.C: fibra de cobre, en esta investigación se tiene 2 variables, la primera que es la “sustitución parcial del agregado fino por la E.C en 0.5%, 1% y 1.5%”, la segunda variable es la “variable 1, más 40 gr de F.C como aditivo”.

Por otro lado, G.C: es el grupo de control conformado por 3 muestras patrón, que fueron elaboradas sin ningún tipo de adición, sustitución, correspondientes al tratamiento 1-a. Para los G.E: quienes son los grupos experimentales, se aplicaron variaciones de los tratamientos. El G.E1; G.E2; G.E3, se incorporó la E.C como sustitución del agregado fino en proporciones de 0.5%, 1% y 1.5% respectivamente, dando lugar a los **tratamientos 2-a, 2-b y 2-c**. Asimismo, los grupos G.E4; G.E5; G.E6, se combinó los mismos porcentajes de E.C pero con la adición de F.C, constituyendo los **tratamientos 3-a, 3-b y 3-c**, cada grupo experimental está constituida por 3 probetas, siendo en total 63 probetas a estudiar bajo el ensayo de la **resistencia a la compresión**, este ensayo se realizara mediante el procedimiento según la Norma Técnica Peruana NTP 339.034-Resistencia a la compresión [14].

La materia prima utilizada se obtuvo de 2 fuentes diferentes, el agregado fino y grueso, se obtuvo de la cantera “AGUILAR”, ubicada en el distrito de Baños del Inca a 1.5 km en dirección noreste de la plaza de armas de dicho distrito, por otro lado, la escoria de cobre fue obtenida de la distribuidora “DYRSERVERS SRL” ubicada en la región de Lima, en el distrito de “Comas”.

TABLA II
Coordenadas UTM de la cantera “AGUILAR” y de la empresa “DYR SERVERS S.R.L.”

	C. AGUILAR	DYR SERVERS S.R.L.”
Este:	779873.07	276566.76
Norte:	9208895.77	8684884.18

III. RESULTADOS

A) ENSAYOS DEL AGREGADO FINO

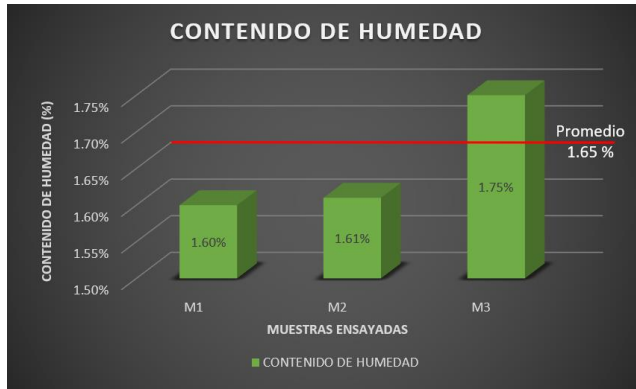


Fig. 2 Contenido de humedad del agregado fino de río.

Nota: Determinación experimental del contenido de humedad según NTP 339.185-Contenido de humedad [7].

En la **Fig. 2** los valores obtenidos evidencian la presencia de humedad en el material, lo que requiere su consideración en la dosificación, ya que influye en la relación agua/cemento efectivo y puede afectar el comportamiento del concreto. Según la NTP 339.185 [7], no existen valores de mín. y máx. establecidos para este ensayo.

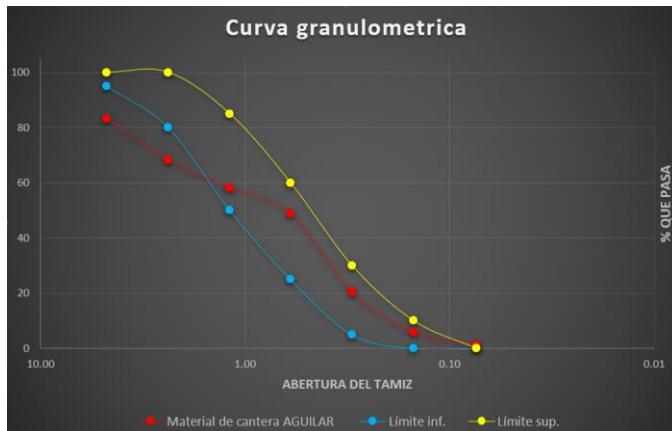


Fig. 3 Curva granulométrica del agregado fino de río.

Nota: Gradación granulométrica del agregado fino según NTP 400.012 [8].

En la **Fig. 3**, la gradación presenta desviaciones respecto a los límites de la NTP 400.037 [1], evidenciando un material

no estandarizado. Esta condición influye en la distribución de vacíos y resulta relevante para evaluar su impacto en el desempeño mecánico.



Fig. 4 Peso unitario suelto y compactado del agregado fino de río.

Nota: Evaluación del peso unitario en estado suelto y compactado.

En la **Fig. 4**, la diferencia entre ambos estados refleja la presencia de vacíos en el material. Valores relativamente bajos indican menor densidad de empaquetamiento, lo que puede incrementar la demanda de pasta y afectar la resistencia.



Fig. 5 Pesos específicos y absorción del agregado fino de río.

Nota: Peso específico y absorción del agregado fino según NTP 400.022 [10].

En la **Fig. 5**, los valores obtenidos evidencian la capacidad del material para absorber agua, lo que puede modificar la disponibilidad de agua efectiva en la mezcla y generar variaciones en la trabajabilidad y resistencia.

B) ENSAYOS DEL AGREGADO GRUESO

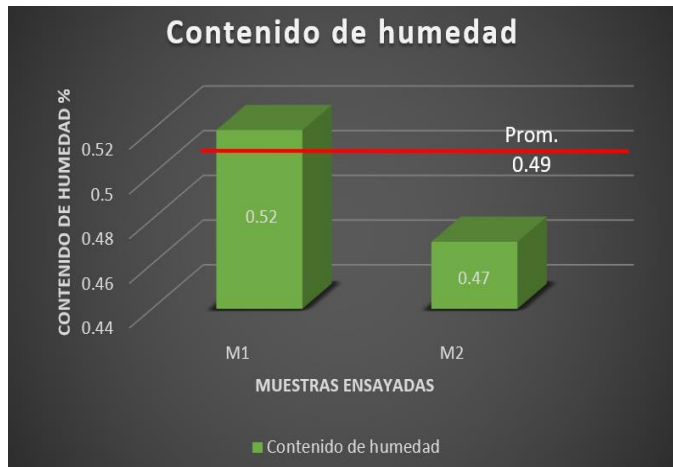


Fig. 6 Contenido de humedad del agregado grueso de río.

Nota: Contenido de humedad del agregado grueso según NTP 339.185 [7].

En la **Fig. 6**, los resultados muestran la presencia de humedad en el agregado, lo cual debe ser considerado en la dosificación para evitar alteraciones en la relación agua/cemento y en la consistencia del concreto.

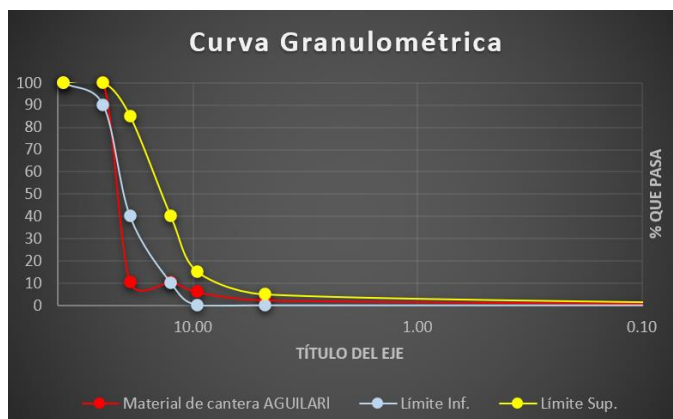


Fig. 7 Curva granulométrica del agregado grueso de río.

Nota: Gradación granulométrica del agregado grueso según NTP 400.012 [8].

En la **Fig. 7**, la distribución granulométrica se encuentra fuera de los rangos establecidos en la NTP 400.037 [1], confirmando el carácter no estandarizado del material y su influencia en la estructura interna del concreto.

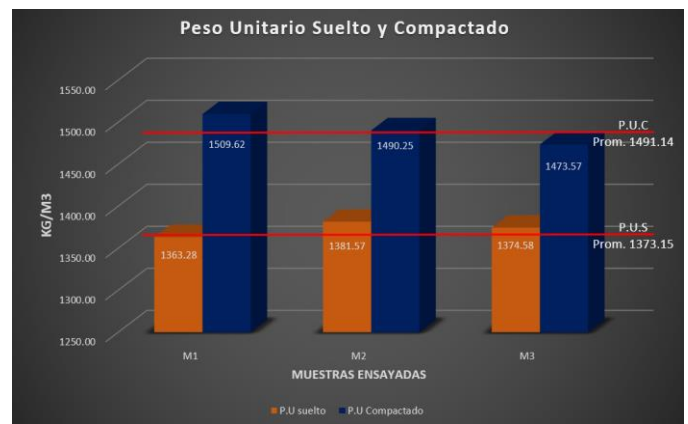


Fig. 8 Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso de río

Nota: Evaluación del peso unitario en estado suelto y compactado.

En la **Fig. 8**, los valores reflejan el grado de compactación del agregado. La diferencia entre estados indica la presencia de vacíos, lo que puede afectar la eficiencia del empaquetamiento y el comportamiento mecánico.



Fig. 9 Pesos específicos y absorción del agregado grueso de río

Nota: Peso específico y absorción del agregado grueso según NTP 400.021 [9]

En la **Fig. 9**, los resultados de peso específico y absorción son determinantes en el diseño de mezcla. Una absorción elevada sugiere mayor porosidad del agregado, lo que puede incrementar la demanda de agua y afectar la adherencia pasta-agregado, repercutiendo en la resistencia final del concreto.

C) CARACTERÍSTICAS DE LA ESCORIA DE COBRE

TABLA III
Características de la escoria de cobre

Nombre del producto:	Escoria de cobre
Color:	Negro
Forma:	Partículas angulares
Olor:	Ninguno
Peso:	1450 kg/m ³
Dureza (escala Mohs):	6.0 – 7.5
Sílice libre:	< 0.1%
pH:	6.0 – 7.5
Gravedad específica:	3.4 g/cm ³
Conductividad:	2 mS/m
Densidad:	1.87 kg/L
Cloruros:	0.01%

Nota: Las características fueron obtenidas de la ficha técnica proporcionada por la empresa DYR SERVERS S.R.L

De la **Tabla III**, La escoria de cobre, por su alta densidad (1.87 kg/L), gravedad específica (3.4 g/cm³) y forma angular, mejora el empaquetamiento del agregado fino y la adherencia con la pasta de cemento, reduciendo vacíos y fortaleciendo la zona de transición interfacial. Esto se refleja en un incremento de la resistencia a compresión.

Asimismo, su bajo contenido de sílice libre (<0.1%) y cloruros (0.01%), junto con un pH neutro (6.0–7.5), garantiza estabilidad química y evita reacciones deletéreas, favoreciendo la durabilidad. En conjunto, su efecto es principalmente físico más que químico, por lo que mejora la resistencia hasta un rango óptimo de sustitución, después del cual el desempeño puede estabilizarse o disminuir ligeramente por efectos en la trabajabilidad.

D) DISEÑO DE MEZCLA

TABLA IV
Diseño de mezcla ACI

PROPORCIÓN EN PESO			
CEMENTO	A. FINO H	A. GRUESO	AGUA EFECTIVA (l/bls)
350.1/350.1	788.1/350.1	980.2/350.1	188.7/8.2
1	2.25	2.8	22.9

Según la **TABLA IV**, se afirma que El diseño de mezcla presenta proporciones adecuadas para alcanzar la resistencia objetivo; sin embargo, la relación a/c relativamente elevada sugiere una posible limitación en términos de durabilidad y eficiencia mecánica, lo que abre la oportunidad de optimización mediante reducción de agua o incorporación de aditivos, especialmente considerando la inclusión de escoria y fibras metálicas.

E) RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

TABLA V
Resistencia a la compresión a los 7 días

N°	% sustitución de Escoria de Cobre	CARGA ÚLTIMA (Kg.f)	Criterio Acepta o Rechaza	ÁREA (cm ²)	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
1	M.P	7795	Acepta	75.43	103.34	100.51
2		7150	Acepta	73.90	96.75	
3		7650	Acepta	75.43	101.42	
1	0.5% E.C	8450	Acepta	75.43	112.02	109.47
2		7975	Acepta	73.90	107.92	
3		8015	Acepta	73.90	108.46	
1	1.0% E.C	8057	Acepta	73.90	109.03	106.58
2		7963	Acepta	73.90	107.76	
3		7765	Acepta	75.43	102.94	
1	1.5% E.C	9616	Acepta	73.90	130.13	125.44
2		8730	Acepta	75.43	115.74	
3		9840	Acepta	75.43	130.45	
1	0.5% E.C+40gr F.C	7819	Acepta	75.43	103.66	104.02
2		7730	Acepta	75.43	102.48	
3		7827	Acepta	73.90	105.92	
1	1.0% E.C+40gr F.C	8688	Acepta	73.90	117.57	113.22
2		8506	Acepta	75.43	112.77	
3		8079	Acepta	73.90	109.33	
1	1.5% E.C+40gr F.C	10120	Acepta	75.43	134.16	146.09
2		11046	Acepta	75.43	146.44	
3		11651	Acepta	73.90	157.66	

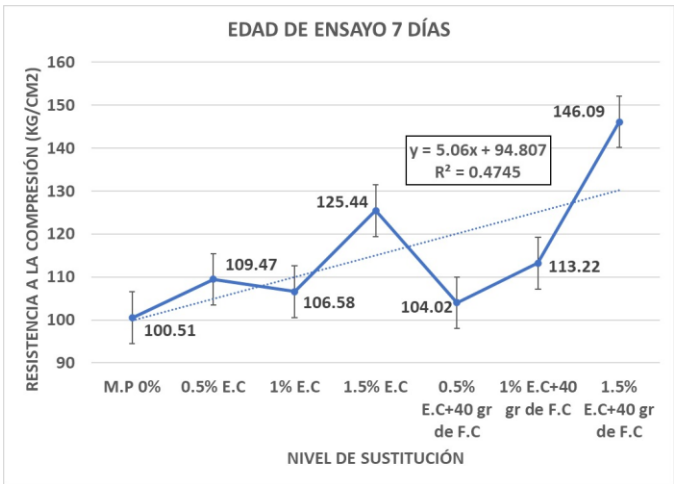


Fig. 10 Resistencia promedio a compresión en kg/cm², a los 7 días de curado.
Nota: Resistencia a compresión a 7 días según NTP 339.034 [14]

De la **TABLA V** y **Fig. 10**, se observa que el esfuerzo máximo promedio en (kg/cm²) alcanzado a los 7 días para las variables es: muestra patrón 100.51 kg/cm², 0.5% E.C 109.47 kg/cm², 1% E.C 106.58 kg/cm², 1.5% E.C 125.44 kg/cm²,

0.5 % E.C + 40 gr F.C 104.02 kg/cm², 1.0 % E.C + 40 gr F.C 113.22 kg/cm², 1.5 % E.C + 40 gr F.C 146.09 kg/cm²

TABLA VI
Resistencia a la compresión a los 14 días

N°	% sustitución de Escoria de Cobre	CARGA ÚLTIMA (Kg.f)	Criterio Acepta o Rechaza	ÁREA (cm ²)	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
1	M.P	15053	Acepta	73.90	203.70	193.97
2		13873	Acepta	75.43	183.92	
3		14656	Acepta	75.43	194.30	
1	0.5% E.C	16574	Acepta	75.43	219.73	207.26
2		14897	Acepta	73.90	201.59	
3		15122	Acepta	75.43	200.48	
1	1.0% E.C	10901	Acepta	73.90	147.51	160.51
2		11700	Acepta	73.90	158.33	
3		13524	Acepta	76.98	175.69	
1	1.5% E.C	10555	Acepta	75.43	139.93	137.55
2		10093	Acepta	75.43	133.81	
3		10266	Acepta	73.90	138.92	
1	0.5% E.C+40gr F.C	8855	Acepta	75.43	117.39	117.81
2		8816	Acepta	73.90	119.30	
3		8626	Acepta	73.90	116.73	
1	1.0% E.C+40gr F.C	11005	Acepta	75.43	145.90	134.46
2		10025	Acepta	73.90	135.66	
3		9188	Acepta	75.43	121.81	
1	1.5% E.C+40gr F.C	12948	Acepta	75.43	171.66	164.25
2		11065	Acepta	73.90	149.73	
3		12664	Acepta	73.90	171.37	

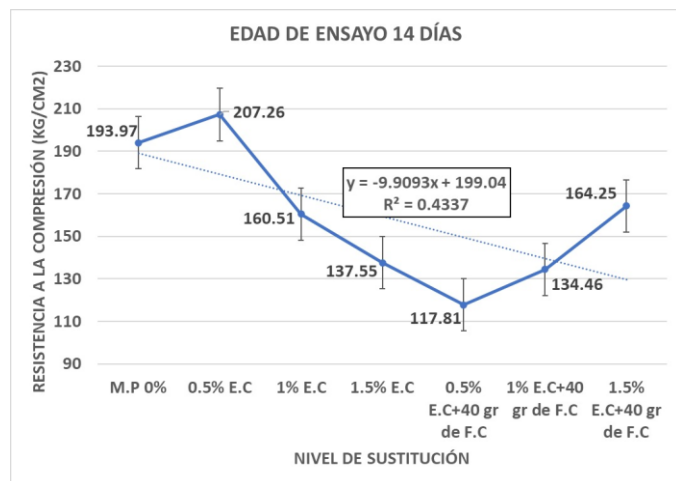


Fig. 11 Resistencia promedio a compresión en kg/cm², a los 14 días de curado.

Nota: Resistencia a compresión a 14 días según NTP 339.034 [14]

De la TABLA VI y Fig. 11, se observa que el esfuerzo máximo promedio en (kg/cm²) alcanzado a los 14 días para las variables es: muestra patrón 193.97 kg/cm², 0.5% E.C 207.26 kg/cm², 1% E.C 160.51 kg/cm², 1.5% E.C 137.55 kg/cm², 0.5 % E.C + 40 gr F.C 117.81 kg/cm², 1.0 % E.C + 40 gr F.C 134.46 kg/cm², 1.5 % E.C + 40 gr F.C 164.25 kg/cm².

TABLA VII
Resistencia a la compresión a los 28 días

N°	% sustitución de Escoria de Cobre	CARGA ÚLTIMA (Kg.f)	Criterio Acepta o Rechaza	ÁREA (cm ²)	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
1	M.P	19965	Acepta	75.43	264.68	286.20
2		22981	Acepta	76.98	298.54	
3		22280	Acepta	75.43	295.37	
1	0.5% E.C	22615	Acepta	76.98	293.79	280.91
2		21041	Acepta	75.43	278.95	
3		19952	Acepta	73.90	269.99	
1	1.0% E.C	18607	Acepta	73.90	251.79	263.36
2		20594	Acepta	76.98	267.53	
3		20841	Acepta	76.98	270.74	
1	1.5% E.C	20702	Acepta	73.90	280.14	290.43
2		22447	Acepta	75.43	297.59	
3		22144	Acepta	75.43	293.57	
1	0.5% E.C+40gr F.C	22183	Acepta	75.43	294.09	293.68
2		22602	Acepta	75.43	299.64	
3		21232	Acepta	73.90	287.31	
1	1.0% E.C+40gr F.C	15950	Acepta	73.90	215.84	215.23
2		17305	Acepta	75.43	229.42	
3		14811	Acepta	73.90	200.42	
1	1.5% E.C+40gr F.C	17243	Acepta	75.43	228.60	227.43
2		17758	Acepta	75.43	235.42	
3		16130	Acepta	73.90	218.27	

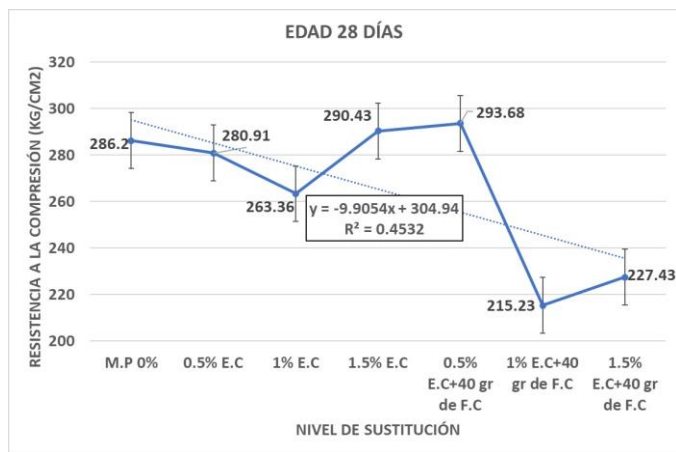


Fig. 12 Resistencia promedio a compresión en kg/cm², a los 28 días de curado.

Nota: Resistencia a compresión a 28 días según NTP 339.034 [14]

De la TABLA VII y Fig. 12, se observa que el esfuerzo máximo promedio en (kg/cm²) alcanzado a los 28 días para las variables es: muestra patrón 286.2 kg/cm², 0.5% E.C 280.91 kg/cm², 1% E.C 263.36 kg/cm², 1.5% E.C 290.43 kg/cm², 0.5 % E.C + 40 gr F.C 293.68 kg/cm², 1.0 % E.C + 40 gr F.C 215.23 kg/cm², 1.5 % E.C + 40 gr F.C 227.43 kg/cm².

F) COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Seguidamente se compara la resistencia a la compresión de las muestras ensayadas a los 7, 14 y 28 días de curado, al sustituir el agregado fino de río por escoria de cobre, a su vez adicionando en algunas varias la fibra de cobre como aditivo, en las proporciones que se menciona en la TABLA I.

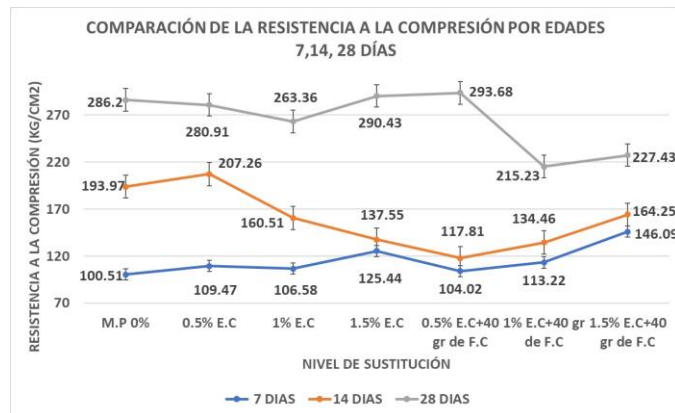


Fig. 13 Comparación de la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días.

Nota: Comparación de resistencia a compresión según edad de curado.

En la Fig. 13, se visualiza la comparación de la resistencia a la compresión de las muestras ensayadas a los 7, 14 y 28 días de curado, de donde se afirma que: a los 7 días la muestra con mayor resistencia a la compresión es la de 1.5% E.C+40 gr de F.C con un valor de 146.09 kg/cm², para los 14 días la muestra con mayor resistencia es la de 0.5% E.C con un valor de 207.26 kg/cm², y finalmente a los 28 días la muestra con mayor resistencia es la de 0.5% E.C+40 gr de F.C con un valor de 293.68 kg/cm².

G) ANÁLISIS DE VARIABILIDAD Y COMPARACIÓN DE MEDIAS

TABLA VIII
Desviación Estándar

Edad	Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	Var(n)	CV
7 días	Esfuerzo Máx. (kg/cm²)	21	115.05	15.88	252.19	240.18	13.8
14 días	Esfuerzo Máx. (kg/cm²)	21	159.4	32.01	1024.99	975.7	20.08
28 días	Esfuerzo Máx. (kg/cm²)	21	265.32	31.78	1009.79	961.7	11.98

De la **TABLA VIII**, se afirma que el coeficiente de variación mostró una dispersión moderada a los 7 días (13.8%), un incremento de la variabilidad a los 14 días (20.08%) y una mayor estabilidad a los 28 días (11.98%),

indicando que el concreto alcanza un comportamiento más uniforme y confiable en su estado final

TABLA IX

Comparación de medias de la resistencia a la compresión mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) a los 7 días

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=16.85052						
Error: 36.5293			gl:14			
Nivel de Sustitución	Medias	n	E.E			
1.5% E.C+40gr F.C	146.09	3	3.49	A		
1.5% E.C	125.44	3	3.49		B	
1.0% E.C+40gr F.C	113.22	3	3.49		B	C
0.5% E.C	109.47	3	3.49		B	C
1.0% E.C	106.58	3	3.49			C
0.5% E.C+40gr F.C	104.02	3	3.49			C
Muestra Patrón	100.50	3	3.49			C

De la **TABLA IX**, el análisis de varianza (ANOVA) evidenció la existencia de diferencias significativas entre las mezclas evaluadas a los 7 días ($\alpha = 0.05$). La prueba de Tukey confirmó estas diferencias, destacando la mezcla 1.5% E.C + F.C como el grupo con mayor resistencia, diferenciándose estadísticamente del resto. Las demás combinaciones se agrupan en niveles intermedios y bajos, mostrando comportamientos similares entre sí, lo que indica que el efecto de la fibra es más notable en edades tempranas.

TABLA X

Comparación de medias de la resistencia a la compresión mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) a los 14 días

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=28.54367						
Error: 104.8177			gl:14			
Nivel de Sustitución	Medias	n	E.E			
0.5% E.C	207.27	3	5.91	A		
Muestra Patrón	193.97	3	5.91	A		
1.5% E.C+40gr F.C	164.25	3	5.91		B	
1.0% E.C	160.51	3	5.91		B	C
1.5% E.C	137.55	3	5.91		B	C
1.0% E.C+40gr F.C	134.46	3	5.91			C
0.5% E.C+40gr F.C	117.81	3	5.91			D

De la **TABLA X**, el ANOVA indicó la presencia de diferencias significativas entre las mezclas a los 14 días ($\alpha = 0.05$). Sin embargo, la prueba de Tukey mostró que la mezcla con 0.5% E.C y la muestra patrón pertenecen al mismo grupo estadístico, evidenciando que no existe diferencia significativa entre ambas. Las demás combinaciones se distribuyen en grupos inferiores, lo que sugiere que el incremento de escoria

y la adición de fibra no generan un comportamiento uniforme en esta etapa

TABLA XI
Comparación de medias de la resistencia a la compresión mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) a los 28 días

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=33.38645					
Error: 143.4021		gl:14			
Nivel de Sustitución	Medias	n	E.E		
0.5% E.C+40gr F.C	293.68	3	6.91	A	
1.5% E.C	290.43	3	6.91	A	
Muestra Patrón	286.20	3	6.91	A	
0.5% E.C	280.91	3	6.91	A	
1.0% E.C	263.35	3	6.91	A	
1.5% E.C+40gr F.C	227.43	3	6.91		B
1.0% E.C+40gr F.C	215.23	3	6.91		B

De la **Ta**bla XI, el análisis ANOVA confirmó diferencias significativas globales entre las mezclas a los 28 días ($\alpha = 0.05$). No obstante, la prueba de Tukey identificó un grupo homogéneo conformado por varias mezclas (incluyendo 0.5% E.C + F.C, 1.5% E.C y la muestra patrón), sin diferencias significativas entre ellas. Por otro lado, las combinaciones con mayores porcentajes de escoria y fibra se ubican en un grupo inferior, evidenciando un menor desempeño en la resistencia final.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten identificar el efecto de la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre y la adición de fibra de cobre sobre la resistencia a la compresión del concreto elaborado con agregados no estandarizados. En primer lugar, la muestra patrón presenta un incremento progresivo de resistencia con la edad de curado (100.51 kg/cm² a 7 días, 193.97 kg/cm² a 14 días y 286.20 kg/cm² a 28 días), confirmando el desarrollo normal del proceso de hidratación del cemento, incluso con agregados fuera de la normativa granulométrica.

En las mezclas con escoria de cobre sin fibra, se observa que los porcentajes de 0.5% y 1% generan incrementos moderados en edades tempranas, mientras que el 1.5% presenta el mayor fortalecimiento inicial (125.44 kg/cm² a 7 días). Sin embargo, a los 14 días, el 0.5% E.C alcanza la mayor resistencia (207.26 kg/cm²), lo que sugiere que bajas proporciones favorecen el empaquetamiento granulométrico sin afectar la trabajabilidad. A los 28 días, el 1.5% E.C logra 290.43 kg/cm², superando ligeramente al patrón, aunque el 0.5% E.C (280.91 kg/cm²) presenta un comportamiento más estable y uniforme.

Respecto a las mezclas con fibra de cobre, se evidencia una influencia significativa en edades tempranas, especialmente en la combinación 1.5% E.C + F.C, que alcanza 146.09 kg/cm² a los 7 días, siendo la mayor resistencia en esa etapa. Este comportamiento se atribuye al efecto de la fibra en el control de micro fisuras. No obstante, a los 14 días, las mezclas con fibra presentan resistencias menores en comparación con algunas mezclas sin fibra, lo que indica que su incorporación puede afectar la compactación o generar discontinuidades en la matriz.

A los 28 días, la mezcla con 0.5% E.C + 40 g F.C alcanza la mayor resistencia (293.68 kg/cm²), superando al concreto patrón. Esto confirma que existe una sinergia entre bajas proporciones de escoria y refuerzo metálico. Sin embargo, el análisis estadístico (ANOVA y Tukey) indica que esta mezcla pertenece al mismo grupo homogéneo que otras combinaciones, por lo que no se puede afirmar una diferencia significativa, a pesar de presentar el mayor valor promedio.

En conjunto, los resultados demuestran que la escoria de cobre y la fibra influyen de manera distinta según la edad de curado, y que existe una relación directa entre el empaquetamiento granulométrico, la cohesión interna y la resistencia final del concreto. Asimismo, se evidencia que el uso de bajas proporciones (0.5%) permite obtener un comportamiento mecánico más eficiente y estable.

IV. CONCLUSIONES

La sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre mejora el comportamiento mecánico del concreto con agregados no estandarizados, destacando el 0.5% como el porcentaje más eficiente y estable, al presentar un desempeño consistente en todas las edades de curado.

La incorporación de 40 g de fibra de cobre favorece el desarrollo de resistencia en edades tempranas; sin embargo, su efecto no es uniforme a lo largo del tiempo, evidenciando una influencia dependiente de la dosificación y la edad de curado.

A los 28 días, la mezcla con 0.5% de escoria de cobre + 40 g de fibra alcanza la mayor resistencia promedio (293.68 kg/cm²), superando al concreto patrón y al resto de combinaciones evaluadas.

En ese sentido, esta mezcla se identifica como la alternativa de mejor desempeño global dentro del estudio, al presentar el mayor valor resistente y una adecuada evolución mecánica.

No obstante, el análisis estadístico (Tukey, $\alpha = 0.05$) indica que no existen diferencias significativas entre las principales mezclas, por lo que esta superioridad debe interpretarse como una ventaja técnica basada en tendencias experimentales y no como una diferencia estadísticamente concluyente.

Finalmente, se demuestra que es posible alcanzar y superar la resistencia mínima exigida por la Norma E.060 ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$) empleando agregados no estandarizados, siempre que se optimice la dosificación de escoria de cobre y el uso de refuerzos

V. REFERENCIAS

- [1] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP-400.037 AGREGADOS. AGREGADOS PARA CONCRETO. REQUISITOS,» SCRIBD, 30 ENERO 2018.
- [2] MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO, Norma E.060: concreto armado, 2019, p. 157.
- [3] W. M. Solis Sosa, «Adición de escoria de cobre para mejorar las propiedades del concreto $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ en edificaciones» 2023.
- [4] J. T. Aguilar Lizarraga, «RESISTENCIA MECANICA DEL CONCRETO CON ADICION DE ESCORIA» 2021.
- [5] R. E. Palomino Mamani, Incidencia del uso de escoria de cobre como sustituto del agregado fino en porcentajes variables sobre la resistencia a la compresión de un concreto hidráulico en la Provincia de San Román, Juliaca, 2024.
- [6] J. L. Arias Gonzáles, DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN, E. C. EIRL, Ed., 2021, p. 75.
- [7] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 339.185- AGREGADOS. MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA CONTENIDO DE HUMEDAD TOTAL EVAPORABLE DE AGREGADOS POR SECADO,» SCRIBD, 16 MAYO 2002.
- [8] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 400.012- AGREGADOS. ANÁLISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO FINO, GRUESO Y GLOBAL,» SCRIBD, 31 MAYO 2001.
- [9] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 400.021- AGREGADOS. MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO,» SCRIBD, 16 MAYO 2002.
- [10] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 400.022- AGREGADOS. MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO,» SCRIBD, 16 MAYO 2002.
- [11] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 339.046 HORMIGÓN (CONCRETO). MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD (PESO UNITARIO), RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE (MÉTODO GRAVIMÉTRICO) DEL HORMIGÓN (CONCRETO),» SCRIBD, 03 09 2008.
- [12] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 339.035- HORMIGÓN (CONCRETO). MÉTODO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND,» SCRIBD, 23 DICIEMBRE 2009.
- [13] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 339.033- CONCRETO. PRÁCTICA NORMALIZADA PARA LA ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO EN CAMPO,» SCRIBD, 22 DICIEMBRE 2015.
- [14] NORMA TECNICA PERUANA, «NTP 339.034- Metodo de ensayo normalizado para la determinacion de la resistencia a la compresion del concreto en muestras cilindricas,» SCRIBD, 22 DICIEMBRE 2015.