

Combined Influence of Copper Slag and Microsilica on the Strength and Density of Structural Concrete

Carlos Elder Rudecindo Calua Carrasco, Ing¹  Paul Alexander Saavedra Barreto Bach² .

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, carlos.calua@upn.edu.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo-Perú. N00249951@upn.pe

Abstract– This research experimentally evaluates the combined effect of microsilica and copper slag on the compressive strength and density of structural concrete designed for $F'c = 280 \text{ kg/cm}^2$. The study addresses the need to incorporate industrial by-products as a sustainable technical alternative in the construction industry. A quantitative experimental design was developed using 120 cylindrical specimens ($10 \times 20 \text{ cm}$), produced according to the ACI 211.1 mix design method. Microsilica was incorporated at proportions of 4%, 6%, and 8% by weight of cement, while copper slag replaced fine aggregate at levels of 10%, 20%, and 30%. The specimens were tested at 7, 14, and 28 days in accordance with ASTM C39. The results indicated that the optimal combination was 6% microsilica and 10% copper slag, achieving an average compressive strength of 351.43 kg/cm^2 at 28 days, representing a 25.56% increase compared to the control mix. Additionally, a 3.95% increase in density was observed, indicating improved matrix compactness. It is concluded that the proper incorporation of these materials significantly enhances the mechanical performance of structural concrete and represents a technically viable alternative within the framework of sustainable construction.

Keywords: Settlement, Concrete, Density, Copper slag, Microsilica, Compressive strength.

Influencia combinada de escoria de cobre y microsilíce en la resistencia y densidad del concreto estructural

Carlos Elder Rudecindo Calua Carrasco, Ing¹  Paul Alexander Saavedra Barreto Bach² 

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, carlos.calua@upn.edu.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo-Perú. N00249951@upn.pe

Resumen— La presente investigación evalúa experimentalmente el efecto combinado de la microsilíce y la escoria de cobre en la resistencia a compresión y densidad de un concreto estructural diseñado para $F'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$. El estudio responde a la necesidad de incorporar residuos industriales como alternativa técnica sostenible en la construcción. Se desarrolló un diseño experimental cuantitativo con 120 probetas cilíndricas ($10 \times 20 \text{ cm}$), fabricadas mediante el método ACI 211.1, incorporando microsilíce en proporciones de 4%, 6% y 8% respecto al peso del cemento, y escoria de cobre en 10%, 20% y 30% en sustitución del agregado fino. Los especímenes fueron ensayados a 7, 14 y 28 días conforme a la norma ASTM C39. Los resultados evidenciaron que la combinación óptima fue 6% de microsilíce y 10% de escoria de cobre, alcanzando una resistencia promedio de 351.43 kg/cm^2 a los 28 días, lo que representa un incremento del 25.56% respecto al concreto patrón. Asimismo, se registró un aumento del 3.95% en la densidad, indicando una mayor compactación de la matriz. Se concluye que la incorporación adecuada de estos materiales mejora significativamente el desempeño mecánico del concreto estructural y constituye una alternativa técnicamente viable en el contexto de la construcción sostenible.

Palabras clave: Asentamiento, Concreto, Densidad, Escoria de cobre, Microsilíce, Resistencia a la compresión.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la mayoría de edificaciones civiles en todo el mundo son de hormigón debido a su alta resistencia por sus características y propiedades. En los últimos años, debido a las necesidades de la obra, las estructuras de concreto tienen que mejorar su diseño de mezcla y por lo tanto utilizar materiales de mejor calidad y mejores propiedades para lograr mejores diseños que satisfagan las necesidades.

El concreto es el material más utilizado en construcción debido a su resistencia y durabilidad. Sin embargo, la industria enfrenta desafíos ambientales, como la generación de escoria de cobre, con Chile produciendo 2.2 toneladas de residuos de escoria. Cada año, el país genera aproximadamente 4.5 toneladas de este subproducto, acumulando un total que ya supera decenas de millones de toneladas.

En Perú (12.7% de la producción global en 2023) y microsilíce subproducto con potencial para mejorar las

propiedades del concreto. Estudios previos destacan que estos materiales incrementan la resistencia mecánica y reducen la permeabilidad. Este artículo investiga su impacto en un concreto estructural (280 Kg/cm^2), abordando brechas en la estandarización de dosificaciones.

Por ello, la presente investigación se orienta a enfrentar la problemática asociada al manejo y disposición de estos agregados mediante su valorización en la producción de concreto estructural. Para tal fin, se analizará la incorporación de residuos en proporciones de microsilíce del 4%, 6% y 8% respecto al peso del cemento, así como la sustitución del agregado fino natural por escoria de cobre en porcentajes de 10%, 20% y 30%, con la finalidad de mitigar el impacto ambiental derivado del uso de materiales convencionales.

Seguidamente, se presentan evidencias provenientes de investigaciones previas en las que se emplearon diferentes tipos de puzolanas volcánicas como sustitutos parciales del cemento en la elaboración de morteros, lo cual respalda la viabilidad técnica de la propuesta planteada y fundamenta el enfoque adoptado en este estudio.

Asimismo, en [1] se reporta la evaluación del reemplazo parcial del cemento Portland por puzolana volcánica natural en proporciones de 15%, 25% y 35%. Los resultados evidenciaron que la dosificación del 25% permitió alcanzar una resistencia a compresión a los 28 días superior a la mezcla patrón sin adición. La sustitución del 15% mostró un comportamiento comparable al concreto convencional, mientras que el 35% produjo una ligera reducción en la resistencia. Estos hallazgos indican que una incorporación moderada de puzolana volcánica puede mejorar el desempeño mecánico del mortero, especialmente a edades avanzadas.

De igual manera, en [2] se analizó la sustitución parcial del cemento por microsilíce en porcentajes de 10%, 15% y 20%, observándose que el incremento del contenido de microsilíce mejora la resistencia a compresión hasta un determinado límite. Con una adición del 10%, la resistencia cúbica aumentó en 35% respecto a la mezcla patrón (58.9 MPa frente a 43.7 MPa), registrándose además mejoras significativas en flexión y tracción, lo que confirma la eficiencia de la microsilíce en el desempeño estructural del concreto ligero reforzado.

Según [3], la incorporación de 4% y 8% de microsilíce (Chema Fume) en concretos elaborados con agregados de la cantera Arunta permitió incrementar notablemente la resistencia a compresión, alcanzando valores de 334.89 kg/cm² y 396.69 kg/cm², respectivamente, frente a 312.22 kg/cm² del concreto convencional a los 28 días.

Por su parte, en [4] se evaluó la adición de escoria de cobre en proporciones de 5%, 10% y 15%, determinándose que el 15% presentó el mejor desempeño mecánico, con 381.38 kg/cm² a 28 días, superando al concreto patrón (360.23 kg/cm²). Ello confirma que la escoria puede optimizar las propiedades mecánicas cuando se incorpora en rangos adecuados.

En [5], se estudió el reemplazo parcial del agregado fino por escoria de cobre (EC) y aluminio (EA) en concreto f'c = 210 kg/cm². Se evidenció que 10% de EC incrementó la resistencia a compresión en 7.4% (231.44 kg/cm² frente a 215.42 kg/cm²), mientras que 10% de EA mejoró la resistencia a flexión, demostrando el potencial de estos subproductos industriales en aplicaciones estructurales.

Asimismo, en [6] se analizó la incorporación de escoria de cobre al 20% y 30% en concreto F'c = 210 kg/cm², observándose incrementos significativos en la resistencia a los 28 días (269.2 kg/cm² y 272.5 kg/cm², respectivamente, frente a 238.0 kg/cm² del patrón), destacando su viabilidad técnica y económica.

Del mismo modo, en [7] se investigó la adición de microsilíce en proporciones de 5%, 10% y 15%, considerando relaciones agua/cemento de 0.45, 0.50 y 0.55. La dosificación del 5% generó incrementos de hasta 18.91% en resistencia (a/c = 0.45) y reducciones significativas en permeabilidad (43.78%), evidenciando mejoras en durabilidad.

Finalmente, en [8] se evaluó la escoria de cobre en proporciones de 10%, 20% y 30% en concreto F'c = 210 kg/cm², registrándose una resistencia de 315.67 kg/cm² con 30% de sustitución, mayor densidad y menor absorción, confirmando su efectividad como material complementario.

Con base en estos antecedentes, se formula el siguiente problema de investigación: ¿Cómo influyen las proporciones de escoria de cobre (10%, 20% y 30%) y microsilíce (4%, 6% y 8%) en el asentamiento, la resistencia a compresión y la densidad de un concreto estructural diseñado para 280 kg/cm² en condiciones controladas de laboratorio?

El objetivo general es evaluar el efecto de dichas incorporaciones mediante ensayos normalizados para determinar su viabilidad técnica como alternativa sostenible. Como objetivos específicos se plantean: caracterizar los agregados según NTP 400.012, diseñar la mezcla conforme al método ACI 211, determinar el asentamiento, la densidad y la resistencia a compresión de la mezcla patrón y de las combinaciones propuestas. La hipótesis sostiene que la incorporación de microsilíce (4%, 6% y 8%) y la sustitución parcial del agregado fino por escoria de cobre (10%, 20% y 30%) influyen significativamente en las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural.

II. METODOLOGIA

De acuerdo con el propósito planteado, la investigación presenta un enfoque aplicado, ya que busca evaluar la resistencia, densidad y asentamiento del concreto mediante la sustitución parcial del cemento por microsilíce y el reemplazo parcial del agregado fino por escoria de cobre. Asimismo, adopta un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en el análisis de objetivos previamente definidos, la aplicación de normas técnicas y la ejecución de procedimientos experimentales orientados al control de variables. El estudio se desarrolla bajo condiciones controladas, sin alterar la medición directa de las variables, garantizando precisión en los resultados y permitiendo el procesamiento estadístico de los resultados obtenidos.

El nivel de investigación corresponde a un diseño experimental puro, debido a que se intervienen deliberadamente las variables independientes —porcentajes de microsilíce y escoria de cobre— con el propósito de analizar su influencia sobre la variable dependiente, representada por la resistencia a compresión del concreto.

En cuanto a la recolección de datos, los ensayos se ejecutaron conforme a la normativa vigente NTP 339.034 / ASTM C39, correspondiente al método de determinación de resistencia a compresión en probetas de concreto. La muestra se estableció por criterio del investigador, evaluándose la totalidad de las unidades elaboradas, es decir, 120 especímenes. Estas probetas fueron fabricadas en forma cilíndrica con dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, siguiendo los parámetros establecidos para el diseño de mezcla.

TABLA I:
Cantidad de unidades de prueba para ensayos de laboratorio.

Edades	7 días	14 días	28 días
% de muestras			
Patrón	4	4	4
Patrón + plastificante	4	4	4
4% micro. + 10% escoria de cobre	4	4	4
4% micro. + 20% escoria de cobre	4	4	4
4% micro. + 30% escoria de cobre	4	4	4
6% micro. + 10% escoria de cobre	4	4	4
6% micro. + 20% escoria de cobre	4	4	4
6% micro. + 30% escoria de cobre	4	4	4
8% micro. + 10% escoria de cobre	4	4	4
8% micro. + 30% escoria de cobre	4	4	4

La incorporación de microsilíce en porcentajes respecto al peso del cemento se fundamenta en su elevada concentración de dióxido de silicio (SiO_2), lo que le confiere propiedades puzolánicas que favorecen la reacción con el hidróxido de calcio y contribuyen a la mejora de la matriz cementicia. Por su parte, la escoria de cobre se empleará como sustituto parcial del agregado fino en proporciones determinadas, considerando su carácter económico y ambientalmente viable, además de su potencial para incrementar la resistencia mecánica y la densidad del concreto. Los porcentajes seleccionados —4%, 6% y 8% de microsilíce, así como 10%, 20% y 30% de escoria de cobre— se establecieron en función de antecedentes técnicos previos, donde dichos rangos demostraron ser adecuados para optimizar la resistencia a compresión y la compacidad del material. Finalmente, se utilizará cemento Portland Tipo I, debido a que es el más empleado en aplicaciones estructurales convencionales en el Perú y no requiere propiedades especiales para su desempeño en elementos como muros portantes.

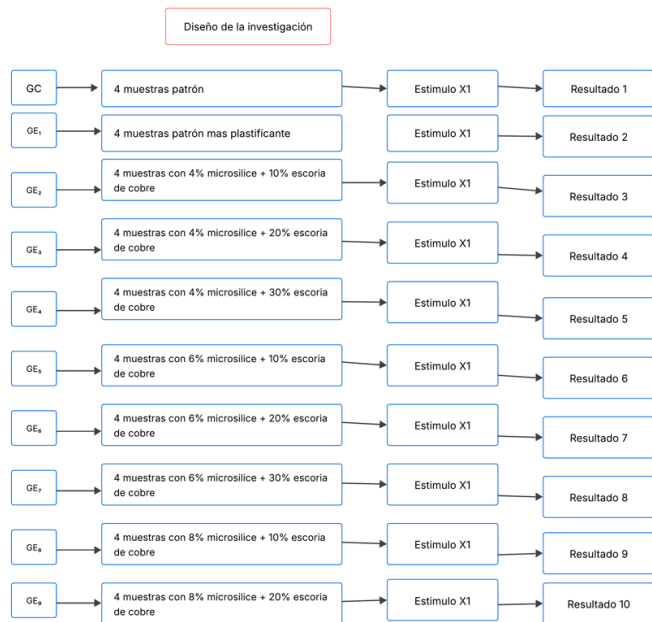


Fig. 1 Diseño de la investigación

Para el desarrollo experimental se definieron los siguientes grupos: GC corresponde al grupo de control, conformado por cuatro especímenes de concreto sin sustitución ni adición de materiales (0%); GE₁ representa el primer grupo experimental, integrado por cuatro probetas con la mezcla patrón más 25 g de plastificante; GE₂ incluye cuatro especímenes con 4% de sustitución de microsilíce y 10% de reemplazo del agregado fino por escoria de cobre; GE₃ considera 4% de microsilíce y 20% de escoria; GE₄ incorpora 4% de microsilíce y 30% de escoria; GE₅ corresponde a 6% de microsilíce y 10% de escoria; GE₆ incluye 6% de microsilíce y 20% de escoria; GE₇ contempla 6% de microsilíce y 30% de escoria; GE₈ integra

8% de microsilíce y 10% de escoria; y GE₉ comprende 8% de microsilíce y 20% de escoria, cada uno compuesto por cuatro especímenes cilíndricos.

Todos los especímenes fueron sometidos a ensayo de compresión bajo una velocidad de carga constante comprendida entre 900 y 1800 N/s (200–400 lb/s), conforme a lo establecido en la norma NTP 339.034 / ASTM C39. Las pruebas se realizaron a edades de 7, 14 y 28 días, garantizando condiciones uniformes de aplicación de carga para cada grupo experimental.

III. RESULTADO

A) ENSAYO DEL AGREGADO FINO:

Caracterización de los agregados.

Como caracterización de los agregados, en el laboratorio de la UNT se realizó todos los ensayos necesarios para poder elaborar el diseño de mezcla por la metodología ACI 211.1, los resultados se aprecian a detalle en las tablas

TABLA II:

Resultado de los ensayos para agregado fino natural.

Resumen ensayos en agregado fino natural		
RCD fino	Unidad	Valor
Módulo de Finura		2.87
Peso Seco Compactado	Kg/m ³	1850
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1620
Peso específico	g/cm ³	2.531
Absorción	%	2.9
Contenido de Humedad	%	2.1

Tabla 2: Resumen de los ensayos del agregado fino

La Tabla 2, presenta los resultados de los ensayos realizados en agregado fino, mostrando propiedades físicas claves.

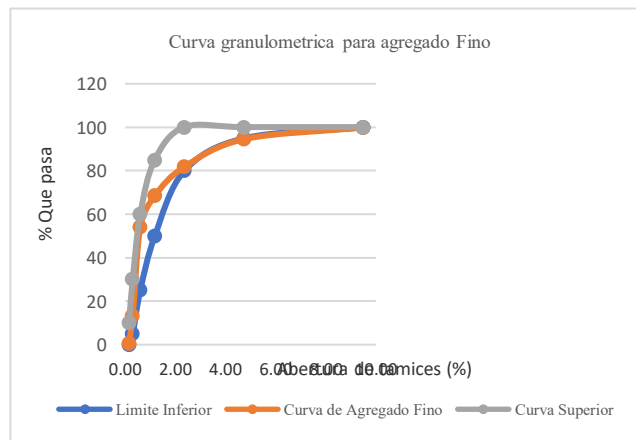


Fig. 2 Curva granulométrica del agregado fino

La Figura 2 presenta la curva granulométrica correspondiente al agregado fino, donde se aprecia que la distribución de tamaños de partícula de la muestra analizada se encuentra comprendida dentro de los límites granulométricos superiores e inferiores establecidos por la normativa vigente.

B) ENSAYO DEL AGREGADO GRUESO:

Caracterización de los agregados.

Como caracterización de los agregados, en el laboratorio de la UNT se realizó todos los ensayos necesarios para poder elaborar el diseño de mezcla por la metodología ACI 211.1, los resultados se aprecian a detalle en las tablas

TABLA III:

Resultados de los ensayos para agregado grueso natural.

Resumen ensayos en agregado grueso natural		
RCD fino	Unidad	Valor
Módulo de Finura		2.39
Peso Seco Compactado	Kg/m³	1530
Peso unitario suelto	Kg/m³	1380
Peso específico	g/cm³	2.617
Absorción	%	1.4
Contenido de Humedad	%	0.6

Tabla 3: Resumen de los ensayos del agregado fino

La Tabla 3, presenta los resultados de los ensayos realizados en agregado grueso, mostrando propiedades físicas claves.

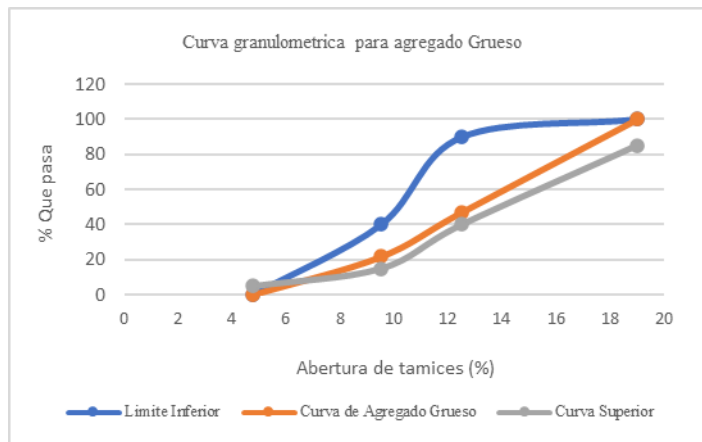


Fig. 3 Curva granulométrica del agregado grueso

La Figura 3 muestra la curva granulométrica del agregado grueso, donde se observa que la distribución de tamaños de partícula de la muestra evaluada se encuentra dentro de los límites granulométricos superiores e inferiores establecidos por la Norma NTP 400.012 (equivalente a ASTM C33).

ELABORACIÓN DE PROBETAS

Con los valores del diseño, se procedió a la elaboración de la mezcla, control de calidad mediante el ensayo del Slump, colado en los moldes, desmoldado y curado respectivo.



Fig. 4: Elaboración de probetas

C) ENSAYO DE ASENTAMIENTO:

TABLA IV

ASENTAMIENTO (SLUMP) DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

% de sustitución de microsilice	% de adición de escoria de cobre	Slump (Pulg.)	Slump (cm)
0%	0%	8"	20.23
4%	10%	4.8"	12.19
4%	20%	4.3"	10.92
4%	30%	6.5"	16.51
6%	10%	4.3"	10.92
6%	20%	5.2"	13.21
6%	30%	8"	20.23
8%	10%	3.5"	8.89
8%	20%	5"	12.7

D) ENSAYO DE DENSIDAD:

TABLA V

DENSIDAD DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

% de sustitución de microsilice	% de adición de escoria de cobre	Densidad (g/cm³)
0%	0%	2.28
4%	10%	2.33

% de sustitución de microsilíce	% de adición de escoria de cobre	Densidad (g/cm³)
4%	20%	2.23
4%	30%	2.37
6%	10%	2.31
6%	20%	2.31
6%	30%	2.35
8%	10%	2.32
8%	20%	2.34

E) ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN:

- Ensayo a los 7 días de curado:

TABLA VI

RESISTENCIA A COMPRESION DE LAS PROBETAS A LOS 7 DIAS

Nº	% de sustitución de microsilíce	% de adición de escoria de cobre	Criterio Acepta o rechaza	Esfuerzo máximo (Kg/cm²)	Esfuerzo promedio (Kg/cm²)
1	0%	0%	Acepta	194.21	194.27
2			Acepta	198.27	
3			Acepta	190.64	
4			Acepta	193.94	
1	4%	10%	Acepta	212.15	212.63
2			Acepta	218.24	
3			Acepta	207.65	
4			Acepta	212.46	
1	4%	20%	Acepta	215.79	216.11
2			Acepta	220.3	
3			Acepta	211.82	
4			Acepta	216.54	
1	4%	30%	Acepta	223.61	226.99
2			Acepta	222.02	
3			Acepta	236.92	
4			Acepta	225.4	
1	6%	10%	Acepta	227.25	228.75
2			Acepta	232.02	
3			Acepta	226.26	
4			Acepta	229.48	

Nº	% de sustitución de microsilíce	% de adición de escoria de cobre	Criterio Acepta o rechaza	Esfuerzo máximo (Kg/cm²)	Esfuerzo promedio (Kg/cm²)
1	6%	20%	Acepta	216.46	222.84
2			Acepta	233.08	
3			Acepta	219.37	
4			Acepta	222.45	
1	6%	30%	Acepta	201.75	203.53
2			Acepta	197.38	
3			Acepta	211.69	
4			Acepta	203.29	
1	8%	10%	Acepta	223.28	220.05
2			Acepta	214.8	
3			Acepta	221.49	
4			Acepta	220.61	
1	8%	20%	Acepta	203.41	206.27
2			Acepta	205.26	
3			Acepta	210.76	
4			Acepta	205.63	

En la Tabla VI se presentan los valores promedio de resistencia a compresión (kg/cm²) obtenidos a los 7 días. La muestra patrón (0% de microsilíce y 0% de escoria de cobre) registró una resistencia de 194.27 kg/cm². La dosificación con 4% de microsilíce (MS) y 10% de escoria de cobre (EC) alcanzó 212.63 kg/cm², mientras que con 4% MS y 20% EC se obtuvo 216.11 kg/cm². Para la combinación de 4% MS y 30% EC la resistencia fue de 226.99 kg/cm². En el caso de 6% MS y 10% EC se logró 228.75 kg/cm², con 6% MS y 20% EC se registró 222.84 kg/cm², y con 6% MS y 30% EC la resistencia disminuyó a 203.53 kg/cm². Finalmente, las mezclas con 8% MS y 10% EC alcanzaron 220.05 kg/cm², mientras que con 8% MS y 20% EC se obtuvo 206.27 kg/cm².

- Ensayo a los 14 días de curado:

TABLA VII

RESISTENCIA A COMPRESION DE LAS PROBETAS A LOS 14 DIAS

Nº	% de sustitución de microsilíce	% de adición de escoria de cobre	Criterio Acepta o rechaza	Esfuerzo máximo (Kg/cm²)	Esfuerzo promedio (Kg/cm²)
1	0%	0%	Acepta	268.91	268.98
2			Acepta	274.52	
3			Acepta	263.96	
4			Acepta	268.53	
1	4%	10%	Acepta	293.75	294.36
2			Acepta	302.18	
3			Acepta	287.51	
4			Acepta	293.98	

Nº	% de sustitución de microsilíce	% de adición de escoria de cobre	Criterio Acepta o rechaza	Esfuerzo máximo (Kg/cm²)	Esfuerzo promedio (Kg/cm²)
1	4%	20%	Acepta	298.79	298.87
2			Acepta	305.03	
3			Acepta	293.29	
4			Acepta	298.36	
1	4%	30%	Acepta	309.61	313.94
2			Acepta	307.41	
3			Acepta	328.05	
4			Acepta	310.69	
1	6%	10%	Acepta	314.66	316.66
2			Acepta	321.26	
3			Acepta	313.28	
4			Acepta	317.42	
1	6%	20%	Acepta	299.71	308.61
2			Acepta	322.73	
3			Acepta	303.74	
4			Acepta	308.25	
1	6%	30%	Acepta	279.35	281.62
2			Acepta	273.3	
3			Acepta	293.11	
4			Acepta	280.73	
1	8%	10%	Acepta	309.15	304.23
2			Acepta	297.42	
3			Acepta	306.68	
4			Acepta	303.66	
1	8%	20%	Acepta	281.64	286.64
2			Acepta	284.21	
3			Acepta	291.82	
4			Acepta	288.89	

En la Tabla VII se presentan los valores promedio de resistencia a compresión (kg/cm²) obtenidos a los 14 días. La muestra patrón (0% de microsilíce y 0% de escoria de cobre) registró una resistencia de 268.98 kg/cm². La dosificación con 4% de microsilíce (MS) y 10% de escoria de cobre (EC) alcanzó 294.36 kg/cm², mientras que con 4% MS y 20% EC se obtuvo 298.87 kg/cm². Para la combinación de 4% MS y 30% EC la resistencia fue de 313.94 kg/cm². En el caso de 6% MS y 10% EC se logró 316.66 kg/cm², con 6% MS y 20% EC se registró 308.61 kg/cm², y con 6% MS y 30% EC la resistencia descendió a 281.62 kg/cm². Finalmente, las mezclas con 8% MS y 10% EC alcanzaron 304.23 kg/cm², mientras que con 8% MS y 20% EC se obtuvo 286.64 kg/cm².

- Ensayo a los 28 días de curado:

TABLA VIII

RESISTENCIA A COMPRESION DE LAS PROBETAS A LOS 28 DIAS

Nº	% de sustitución de	% de adición de	Criterio Acepta o	Esfuerzo máximo (Kg/cm²)	Esfuerzo promedio (Kg/cm²)
----	---------------------------	-----------------------	-------------------------	--------------------------------	----------------------------------

	microsilíce	escoria de cobre	rechaza		
1	0%	0%	Acepta	298.79	298.87
2			Acepta	305.03	
3			Acepta	293.29	
4			Acepta	298.36	
1	4%	10%	Acepta	326.39	327.99
2			Acepta	335.76	
3			Acepta	319.46	
4			Acepta	330.36	
1	4%	20%	Acepta	331.99	331.97
2			Acepta	338.92	
3			Acepta	325.88	
4			Acepta	331.07	
1	4%	30%	Acepta	344.01	350.54
2			Acepta	341.57	
3			Acepta	364.5	
4			Acepta	352.06	
1	6%	10%	Acepta	349.62	351.43
2			Acepta	356.96	
3			Acepta	348.09	
4			Acepta	351.05	
1	6%	20%	Acepta	333.01	343.40
2			Acepta	358.59	
3			Acepta	337.49	
4			Acepta	344.52	
1	6%	30%	Acepta	310.39	313.50
2			Acepta	303.66	
3			Acepta	325.67	
4			Acepta	314.26	
1	8%	10%	Acepta	343.5	338.27
2			Acepta	330.46	
3			Acepta	340.75	
4			Acepta	338.38	
1	8%	20%	Acepta	312.93	317.60
2			Acepta	315.79	
3			Acepta	324.25	
4			Acepta	317.42	

En la Tabla VIII se presentan los valores promedio de resistencia a compresión (kg/cm²) obtenidos a los 28 días. La muestra patrón (0% de microsilíce y 0% de escoria de cobre) alcanzó una resistencia de 298.87 kg/cm². La mezcla con 4% de microsilíce (MS) y 10% de escoria de cobre (EC) registró 327.99 kg/cm², mientras que con 4% MS y 20% EC se obtuvo 331.97 kg/cm². Para la combinación de 4% MS y 30% EC la resistencia fue de 350.54 kg/cm². En el caso de 6% MS y 10% EC se alcanzó el mayor valor, con 351.43 kg/cm², seguido por 6% MS y 20% EC con 343.40 kg/cm², y 6% MS y 30% EC con 313.50 kg/cm². Finalmente, las mezclas con 8% MS y 10% EC lograron 338.27 kg/cm², mientras que con 8% MS y 20% EC se registró 317.60 kg/cm².

IV. DISCUSIÓN

En la investigación de la referencia [9], se evaluaron dosificaciones combinadas de escoria de cobre y fibras de aluminio en proporciones de 7%+6%, 10%+9%, 13%+12% y 16%+15%, comparándolas con una muestra patrón para un concreto $F'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ destinado a pavimento rígido. La investigación consistió en sustituir parcialmente el agregado fino por escoria de cobre e incorporar fibras de aluminio, con el fin de analizar su influencia en la resistencia a compresión a 28 días. Los resultados indicaron que la combinación 7%+6% alcanzó 244.20 kg/cm^2 , superando en 3.65% al patrón, mientras que la dosificación 10%+9% logró el mejor desempeño con 252.35 kg/cm^2 , representando un incremento del 7.10%. Sin embargo, al aumentar los porcentajes a 13%+12% y 16%+15%, las resistencias descendieron a 230.42 kg/cm^2 y 207.35 kg/cm^2 respectivamente, evidenciando que mayores contenidos pueden afectar negativamente el comportamiento mecánico del concreto.

En [3] se evaluó el efecto de la microsilíce como material suplementario en proporciones de 4% y 8%, observándose incrementos significativos en la resistencia a compresión a 28 días respecto al concreto patrón (312.22 kg/cm^2). La adición del 4% alcanzó 334.89 kg/cm^2 , mientras que el 8% logró 396.69 kg/cm^2 , evidenciando mejoras progresivas del 7.25% y 27.05%, respectivamente. Este comportamiento puede atribuirse al efecto puzolánico y de relleno de la microsilíce, que densifica la matriz cementicia y mejora la zona de transición interfacial (ITZ), favoreciendo una microestructura más compacta y resistente. La tendencia ascendente confirma una relación positiva entre contenido de microsilíce y desempeño mecánico dentro del rango evaluado, siendo el 8% la dosificación más eficiente.

Desde una perspectiva sostenible, la incorporación de escoria de cobre y microsilíce no solo optimiza el comportamiento mecánico y la durabilidad del concreto estructural, sino que también contribuye a la valorización de residuos industriales y a la reducción de impactos ambientales asociados a la extracción de materiales vírgenes. En contextos sísmicos, como Trujillo, la mejora en resistencia y densificación de la matriz puede traducirse en mayor confiabilidad estructural, integrando desempeño mecánico y sostenibilidad en una misma estrategia tecnológica.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con la hipótesis planteada, los resultados confirmaron que las propiedades físicas de los agregados gruesos y finos cumplieron con los estándares establecidos en la Norma NTP 400.012. Los ensayos granulométricos, densidad, absorción y contenido de humedad demostraron que los materiales utilizados fueron adecuados para el diseño de mezclas de concreto estructural. Esto validó la hipótesis planteada, destacando que la calidad de los agregados es fundamental para garantizar las propiedades físicas y mecánicas deseadas del concreto.

Los ensayos realizados evidenciaron que la incorporación de microsilíce (4%, 6% y 8%) y escoria de cobre (10%, 20% y 30%) influyó significativamente en las propiedades del concreto. La combinación óptima fue 6% de microsilíce y 10% de escoria de cobre, alcanzando una resistencia promedio máxima de 351.43 kg/cm^2 a los 28 días, lo que representa un incremento de 25.51% respecto a la resistencia de diseño convencional de 280 kg/cm^2 . Asimismo, se observó un incremento de hasta 3.95% en la densidad del concreto, evidenciando una mayor compactación de la matriz cementicia. Estos resultados confirmaron que una adecuada dosificación de materiales suplementarios permite optimizar el asentamiento, la densidad y la resistencia a compresión del concreto estructural.

El estudio demostró que la incorporación de microsilíce redujo progresivamente el asentamiento del concreto, registrándose el menor valor con la combinación de 8% de microsilíce y 10% de escoria de cobre, con un slump de 3.5" (8.89 cm). Por otro lado, mayores proporciones de escoria de cobre incrementaron la trabajabilidad de la mezcla, alcanzándose un asentamiento máximo de 8" (20.23 cm) con la combinación de 6% de microsilíce y 30% de escoria de cobre. Asimismo, la densidad aumentó hasta 2.37 g/cm^3 con 4% de microsilíce y 30% de escoria, evidenciando una estructura más compacta. Finalmente, la combinación de 6% de microsilíce y 10% de escoria presentó el mejor desempeño mecánico con 351.43 kg/cm^2 , mientras que porcentajes elevados de escoria de cobre (30%) generaron disminución de resistencia en determinadas combinaciones.

REFERENCIAS

- [1] Bassam, A. (2022). Influencia de las fibras de microsilíce y polipropileno en las propiedades frescas y mecánicas del hormigón geopolímero de ultra alto rendimiento (UHP-GPC). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522004995>
- [2] Shcherban, E., Stel'makh, S., Beskopylny, A., Mailyan, L., Meskhi, B., & Varavka, V. (2021). Nanomodification of Lightweight Fiber Reinforced Concrete with Micro Silica and Its Influence on the Constructive Quality Coefficient. *MDPI*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/23/7347>
- [3] Zuñiga, M., y Condori, Y. (2019). *Universidad Privada de Tacna*. Obtenido de <https://repositorio.upd.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/918/Z%20c3%ba%20b1%20iga-Quenta-Condori-Chata.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] Aguilar, J. (2021). *resistencia mecanica del concreto con adiccion de escoria de cobre en el distrito de huancayo – region junin*. Obtenido de https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/7254/T037_43511171_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] Gemio, L. (2024). Efecto de la adición de escoria de cobre y aluminio sobre las propiedades de un concreto convencional en el distrito de San Miguel. Obtenido de [file:///D:/2023-2/TESIS%202/TESIS%20DE%20GUIA/TESIS%20PRESENTAR/refere](https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/7254/T037_43511171_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [6] Flores, J., & Fuentes, J. (2021). *Diseño de concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ adicionando escoria de cobre para mejorar su resistencia a la*

- compresion, Tarapoto.* Obtenido de file:///D:/2023-2/TESIS%202/TESIS%20DE%20GUIA/TESIS%20PRESENTAR/refere ncia%20tesis/Flores_GJA-Fuentes_CJ-SD.pdf
- [7] Adrianzen, M., & Chavez, J. (2022). Influencia del porcentaje de microsilíce en la resistencia a la compresión y permeabilidad de mezclas de concreto con diferentes relaciones agua/cemento en la ciudad de trujillo. Obtenido de file:///D:/2023-2/TESIS%202/TESIS%20DE%20GUIA/TESIS%20PRESENTAR/refere ncia%20tesis/Adrianzen%20Abanto,%20Miguel%20Arturo%20-%20Chavez%20Luk,%20Jorge%20Hiram%20Junior%20(8).pdf
- [8] Peñaloza, A. (2024). *Influencia por incorporacion de escoria de cobre en propiedades fisico-mecanicas del concreto 210 kg/cm2*. Obtenido de file:///D:/2023-2/TESIS%202/TESIS%20DE%20GUIA/TESIS%20PRESENTAR/refere ncia%20tesis/Pe%C3%B1aloza_CAN-SD.pdf
- [9] Baldoceda, J., & Vega, D. (2019). *Diseño de concreto de alta densidad reforzado con escoria de cobre para atenuar la transmisión de la radiación ionizante*. Obtenido de file:///D:/2023-2/TESIS%202/TESIS%20DE%20GUIA/TESIS%20PRESENTAR/refere ncia%20tesis/CIV-T030_72854455_T%20%20%20VEGA%20ROMERO%20DANIEL%20ENRIQUE.pdf