

Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Concrete Using Coffee Husk Ash and Ichu as Cement Substitutes

Alfredo Condor Jaramillo¹; Jean Soto Vega²

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú

U20207665@utp.edu.pe, U21228580@utp.edu.pe

Abstract– Due to its durability and strength, concrete is the most widely used material in construction. However, its production requires large amounts of resources and is responsible for global CO₂ emissions, primarily due to cement manufacturing. This situation underscores the need for sustainable alternatives that reduce environmental impact without compromising concrete's properties. This research evaluates the effect of partially replacing cement with coffee husk ash (CHA) at proportions of 3%, 6%, and 10% and ichu ash (IA) at proportions of 1% and 4%, analyzing their impact on the physical and mechanical properties of the concrete. Ten mix designs were developed using fifty cylindrical specimens through multifactorial analysis. The results of the fresh-state tests showed that increasing the ash content reduces slump due to its high water absorption, while the temperature remains stable. Furthermore, in the hardened state, the best performance was obtained with 6% CCC and 4% CI, achieving a compressive strength of 36.76 MPa and an indirect tensile strength of 3.90 MPa, representing increases of 24% and 39%, respectively, compared to the control concrete. Taken together, the results demonstrate that the controlled use of these ashes is viable and contributes to improving concrete performance. They also prove that it is possible to enhance the structural performance of concrete through eco-efficient partial substitutions.

Keywords-- Coffee husk ash, ichu ash, compressive strength, tensile strength, sustainable concrete.

Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del concreto utilizando ceniza de cascara de café e ichu como sustitutos del cemento

Alfredo Condor Jaramillo¹; Jean Soto Vega²

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú
U20207665@utp.edu.pe, U21228580@utp.edu.pe

Resumen– Debido a su durabilidad y resistencia el concreto es el material más utilizado en la construcción. Sin embargo, su producción requiere grandes cantidades de recursos y responsable de las emisiones globales de CO₂, principalmente debido a la fabricación de cemento. Esta situación subraya la necesidad de alternativas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental sin comprometer las propiedades del hormigón. Esta investigación evalúa el efecto de reemplazar parcialmente el cemento con Ceniza de cáscara de café (CCC) en proporciones de 3%, 6% y 10% y ceniza de ichu (CI) en proporciones de 1% y 4%, analizando su impacto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Se elaboraron 10 diseños de mezclas con cincuenta especímenes cilíndricos mediante un análisis multifactorial. Los resultados de los ensayos en estado fresco mostraron que el aumento de cenizas reduce el asentamiento debido a su alta absorción de agua, mientras que la temperatura se mantuvo estable. Además, en estado endurecido el mejor desempeño se obtuvo con 6% de CCC y 4% de CI, alcanzando una resistencia a compresión de 36.76 MPa y una resistencia a tracción indirecta de 3.90 MPa, con incrementos de 24% y 39% respecto al concreto de control. En conjunto, los resultados demuestran que el uso controlado de estas cenizas es viable y contribuye a mejorar el comportamiento del concreto, además prueba que es posible mejorar el desempeño estructural del concreto mediante sustituciones parciales ecoeficientes.

Palabras clave-- Ceniza de cáscara de café, ceniza de ichu, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, hormigón sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a su durabilidad y resistencia el concreto es el material más utilizado en la construcción, pero su producción, demanda altos recursos y genera una considerable emisión de CO₂, principalmente por la fabricación del cemento, es responsable de cerca del 8 % de las emisiones globales [1], [2].

En esta situación se plantea la necesidad de alternativas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental sin afectar el desempeño del concreto. La ceniza de cáscara de café (CCC) y la ceniza de ichu (CI), al ser residuos abundantes de origen agroindustrial y biomásico, poseen propiedades con potencial puzolánico que permitirían su aprovechamiento como sustitutos parciales del cemento. Su incorporación no solo contribuiría a la disminución de emisiones de CO₂, sino también al

aprovechamiento de recursos locales, por lo que resulta pertinente investigar sus efectos en las propiedades físicas y mecánicas del concreto convencional [1], [3].

De acuerdo con los estudios revisados, la problemática fundamental que enfrentan actualmente las industrias de la construcción y la gestión ambiental radica en el alto impacto ecológico de las prácticas tradicionales y en la escasez de alternativas sustentables para la producción de hormigón. La extracción de insumos como la arena, la roca y el cemento convencional genera altas emisiones, igualmente problemas derivados de la gestión de residuos sólidos agrícolas y vegetales [1], [4].

En estudios recientes realizados se evaluó la sustitución parcial del cemento por CCC en niveles del 5%, 10% y 15%; la caracterización química reporta contenidos relativamente bajos de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, una mayor proporción de CaO y un contenido alcalino de K₂O sustancial (45–65%), lo cual respalda su uso como adición cementicia; sin embargo, advierten que, al sobrepasar el 15% de reemplazo, el concreto experimenta una disminución de su resistencia mecánica [2], [4], [5], [6].

Asimismo, se realizaron ensayos de compresión y tracción sobre probetas curadas durante 28 días: en compresión se consideraron dos valores de patrones de referencia 21.47 y 35.10 MPa y se observó un incremento significativo con sustituciones del 5% y 10% del cemento por CCC, alcanzando 38.57 y 47.10 MPa, respectivamente; en tracción, el valor patrón fue 3.165 MPa y, con 5% de sustitución, se obtuvo 3.308 MPa, superando el diseño del concreto de referencia [2], [5].

En estudios recientes se evaluaron sustituciones parciales del cemento por CCC en niveles de 1%, 1.48%, 3% y 9%, demostrando que es viable trabajar con estos porcentajes, ya que la incorporación de la ceniza mejora la densidad del material disminuye la absorción de agua y además, contribuye a la reducción del impacto ambiental [3], [7], [8], [9].

Asimismo, se realizaron ensayos de compresión y tracción sobre probetas curadas durante 28 días: en compresión se tomaron como referencia el patrón de diseño 57.80 y 24.23 MPa, observándose incrementos con sustituciones del 1% y 3% del cemento por ceniza de cáscara de café, que alcanzaron 61.30 y 28.23 MPa, respectivamente; en tracción, se registró un aumento del 3% respecto del valor patrón, superando el diseño del concreto de referencia [3], [7].

También, se evaluó el uso del ichu como material de refuerzo en el concreto. En los últimos años, las fibras naturales han ganado protagonismo por sus altas propiedades específicas, bajo costo y menor impacto ambiental. En este estudio, el ichu se incorporó como ceniza en sustitución parcial del cemento, con niveles del 1 %, 2 %, 4 %, 6 % y 10 %. Los resultados indican que hasta un 6 % de reemplazo se observa una mejora en las propiedades físico-mecánicas del concreto respecto al patrón; sin embargo, por encima del 10 % las prestaciones disminuyen de manera significativa [1], [10], [11].

Asimismo, se realizaron ensayos de compresión y tracción sobre probetas curadas hasta los 28 días. En compresión, se trabajó con dos diseños patrón que alcanzaron 38.66 MPa y 52.7 MPa. Con la sustitución del 4 % de cemento por ceniza de ichu, se observó una mejora de hasta 40 % respecto al patrón; en cambio, con 6 % de sustitución la resistencia a compresión disminuyó. Por otro lado, en tracción se registró una mejora cercana al 10 % respecto al patrón cuando se empleó 4 % de ceniza de ichu [1], [11].

La investigación aporta un conocimiento profundo al abordar un tema poco explorado: la combinación de ceniza de cáscara de café e ichu. A pesar de que ambos materiales se han estudiado por separado, no existen investigaciones que evalúen su comportamiento conjunto en la sustitución parcial del cemento en el concreto. Este estudio se enfoca en el impacto del uso de estos residuos agrícolas y materiales naturales, evaluando sus propiedades físico-mecánicas al ser utilizados como sustitutos parciales del cemento.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar el efecto de la sustitución parcial del cemento por ceniza de cáscara de café en porcentajes de 3 %, 6 % y 10 %, y por ceniza de ichu en 1 % y 4 %, evaluando las propiedades físicas y mecánicas del concreto con resistencia $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

1) *Cemento*: Se usó el cemento SOL Portland tipo I, que está constituido, en su mayor parte, por silicatos de calcio, responsables del desarrollo principal de la resistencia mecánica. Para controlar los tiempos de fraguado y optimizar el desempeño, se incorpora sulfato de calcio en distintas formas (p. ej., yeso o hemihidrato) [12], [20]. Conforme a la norma ASTM C-150 [19], se establecen límites mínimos y máximos para los constituyentes químicos del cemento, garantizando su uniformidad y calidad.

En cuanto a sus propiedades físicas, en base se muestra en la tabla I el cemento Portland tipo I exhibe una densidad cercana a $3,12 \text{ g/cm}^3$ y una resistencia a compresión a 28 días en el rango de 25–50 MPa. Estas prestaciones sustentan su uso amplio en construcción, desde elementos portantes hasta pavimentos [13], [21].

2) *Ceniza de cáscara de café*: La cáscara de café utilizada proviene de la provincia de Chanchamayo, Junín, se usó 50 kg de este material que fue sometido a un proceso de calcinación

controlada para obtener la CCC. El principal componente mineralógico para Ceniza de cáscara de café al 5% es: alita u óxido de silicato de calcio (Ca_3SiO_5), ortosilicato tricálcico y magnésico ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), periclasa (MgO), óxido de hierro y aluminio sódico ($\text{Na}_2\text{Al}_0.5\text{Fe}_9.5\text{O}_{15}$), belita o silicato de calcio (Ca_2SiO_4), tridimita (SiO_2) y óxido de aluminio, sodio y calcio ($\text{Ca}_8.688\text{Na}_{0.625}(\text{Al}_6\text{O}_{18})$) [2], [5], [6], [9].

TABLA I
PROPIEDAD QUÍMICA DEL CEMENTO SOL TIPO I.

PARAMETRO	UNIDAD
Densidad	3.12 g/ml
MgO	2.93 %
SO ₃	3.00 %
C3S %	54.2 %
C2S %	11.9 %
C3AF%	9.7 %

Fuente. (ficha técnica cemento sol)

En sistemas donde la cáscara de café se combina con clinker rico en silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), su aporte puzolánico complementa la hidratación del C3S, potenciando el desarrollo de C–S–H y, por ende, aumentan las resistencias a compresión hasta un 30% como también en la torsión esto sustituyendo hasta un 10% al cemento [2], [5], [8], [9]. Veremos su componente química en la Tabla II [2].

TABLA II
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CENIZA DE CCC

Mayor oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	LOI
Porcentaje	17.1	12.36	10.56	10.0	12.6	32.88

Fuente. Adaptado de Asfaw et al. (2022).

Para esta investigación, según la Fig. 1 la cáscara de café fue sometida a un proceso combustión controlada mediante calcinación en estufa una temperatura de 600 °C con el propósito de obtener la ceniza. Posteriormente, dicha ceniza es tamizada utilizando el tamiz N.º 100, a fin de obtener un material de granulometría fina y uniforme. Este proceso implica un consumo energético y potencial generación de emisiones, lo cual constituye una limitación desde el punto de vista ambiental.

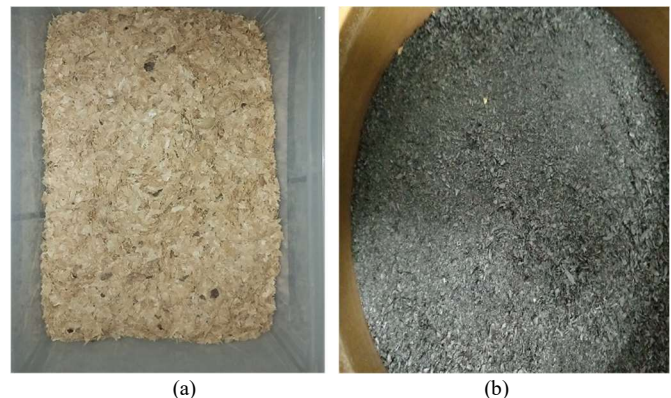


Fig.1. (a) cáscara de café y (b) ceniza de cáscara de café.

3) *Ceniza de ichu*: La ceniza de ichu presenta una composición química rica en óxidos minerales, exhibe una clara

naturaleza silícea, presentando un SiO₂ contenido del 73,72%. El K alto2Ø, que asciende al 13,38% (9,6% Na₂O masa equivalente), también debe resaltarse. Además, la ceniza de ichu muestra un contenido de CaO del 4,63%, mientras que solo se encontraron cantidades menores de otros elementos principales (<2%). El contenido de óxidos ácidos (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) supera el 74 %, lo que supera el umbral del 70 % [10], [11], [17].

En sistemas donde el ichu presenta un contenido de óxidos ácidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) superior al 74%, excediendo el umbral del 70%, se habilita su potencial como sustituto del cemento. Estudios realizados indican que, al sustituir el cemento en un 6%, se logra un aumento de hasta un 40% en las resistencias a compresión y torsión [11]. A continuación, se detalla su composición química en la Tabla III [1].

TABLA III
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CI.

ÓXIDOS	%
SiO ₂	77.70
Al ₂ O ₃	0.98
CaO	3.70
MgO	0.98
Fe ₂ O ₃	0.49
Así que ³	1.90
Na ₂ O	0.20
K ₂ O	8.10
TiO ₂	0.09
P ₂ O ₅	2.90
MnO	0.24
Sro	0.03
ZnO	0.02
CuO	0.01
Cl	0.42
Loi	2.11

Fuente. Adaptado de (Solórzano et al., 2025)

El ichu utilizado, según la Fig. 2 fue recolectado en la región de Junín, se usó 20 kg, para esta investigación, el CI fue sometido a un proceso de combustión artesanal para la obtención de la ceniza. Luego, dicha ceniza fue tamizada utilizando el tamiz N.º 50, esta fue recolectado de zonas altoandinas, presentando dificultades logísticas asociadas a su dispersión geográfica y costos de transporte.

4) *Agua potable*: El agua empleada en la preparación del concreto se obtuvo del sistema de suministro de Huachipa, Lurigancho- Chosica, Lima, caracterizado por su procedencia del río Rímac y tratada mediante procesos de potabilización que garantizan su calidad conforme al Reglamento Nacional de Edificaciones (E.060) y a la norma NTP 339.088:2014 [22]. Esta agua es apropiada para la preparación del concreto porque no contiene sustancias que puedan interferir en la mezcla, como

aceites, restos orgánicos o niveles elevados de sales que modifiquen el proceso de fraguado o disminuyan la resistencia del material [15], [23]. La relación agua/cemento (a/c) fue 0.56, constante en todas las dosificaciones-



Fig.2. (a) ichu y (b) ceniza de ichu.

5) *Agregado fino*: El agregado fino generalmente empleado en la mezcla de concreto procede de la cantera Jicamarca, ubicada en la zona este de Huachipa, distrito de Lurigancho – Lima, reconocida por su producción de agregados de origen aluvial provenientes de la cuenca del río Rímac. Este material está compuesto principalmente por partículas naturales de cuarzo y feldespatos, de forma subangular a redondeada, lo que favorece una buena trabajabilidad y adherencia con la pasta cementicia [16], [24].

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana 400.037:2014, el material cumple con los requisitos físicos y químicos exigidos para su uso en concreto estructural [17]. El agregado obtuvo un módulo de fineza de 2.86, un valor adecuado para lograr concretos con buena trabajabilidad. Los datos del análisis por tamizado y la correspondiente curva granulométrica se muestran en la Tabla IV y en la Fig. 3.

TABLA IV
RESULTADOS DE TAMIZADO DEL AF.

Malla	Masa retenida (g)	% Pasa acum.	ASTM C 33/C33M - 18
3/8	0	100	100 – 100
N.º 4	35.5	96.9	95 - 100
N.º 8	100.8	88.2	80 - 100
N.º 16	260.8	65.6	50 - 85
N.º 30	290.8	40.4	25 - 60
N.º 50	257.8	18.1	5 - 30
N.º 100	154.8	4.7	0 - 10
Fondo	53.9		

Asimismo, los valores obtenidos para el peso unitario suelto (P.U.S.) y el peso unitario compactado (P.U.C.) del agregado fino se detallan en la Tabla V.

También, en la Tabla VI se presentan los resultados de los ensayos de densidad relativa y absorción (D.R.A.) correspondientes al agregado fino.

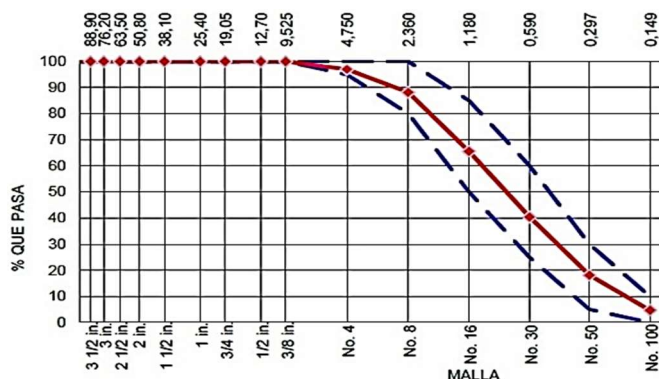


Fig.3. Curva granulométrica del agregado fino.

TABLA V
RESULTADOS DE P.C.S Y P.U.C DEL AF.

Nº	Reporte	Unidades	Resultados
1	Densidad aparente varillado (Peso unitario varillado) Método A	kg/m3	1840
2	Vacios en agregado varillado Método A	%	31
3	Densidad aparente suelta (Peso unitario suelto) Método C	kg/m3	1670
4	Vacios en agregado suelto Método C	%	37

TABLA VI
RESULTADOS DE D.R.A DEL AF.

Nº	Reporte	Unidades	Resultados
1	Densidad relativa (gravedad específica) OD	g/cm3	2.67
2	Densidad relativa (gravedad específica) SSD	g/cm3	2.72
3	Densidad relativa aparente (gravedad específica)	g/cm3	2.78
4	Absorción	%	1.5

6) *Agregado grueso*: El agregado grueso utilizado para producir el concreto fue obtenido de la cantera La Gloria, ubicada en la zona este de Huachipa, en el distrito de Lurigancho-Lima y corresponde a un material de origen aluvial, obtenido del procesamiento mecánico de gravas silíceas provenientes de la cuenca del río Rímac [25].

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana 400.037:2014 y la NTP 400.020:2015, el material cumple con las exigencias para su uso en concretos estructurales [18].

Este agregado presentó un módulo de fineza de 7.27, valor adecuado para concretos de buena trabajabilidad. Los resultados del análisis por tamizado y la correspondiente curva granulométrica pueden apreciarse en las Tabla VII y Fig. 4, respectivamente.

TABLA VII
RESULTADOS DE TAMIZADO DEL AG.

Malla	Masa retenida (g)	% Pasa acum.	ASTM C 33/C33M - 18
1 ½ in.	0.0	100.0	100 – 100
1 in.	207.5	98.2	90 -100
¾ in.	4381.6	60.9	40 -85
½ in.	3855.9	28.0	10 – 40
3/8 in.	1920.5	11.6	0 – 15
Nº. 4	1355.9	0.0	0 - 5
Nº. 8	0.0	0.0	0 - 0
Nº. 16	0.0	0.0	0 - 0
Nº. 30	0.0	0.0	0 - 0
Nº. 50	0.0	0.0	0 - 0
Nº. 100	0.0	0.0	0 - 0
Fondo	2.0		

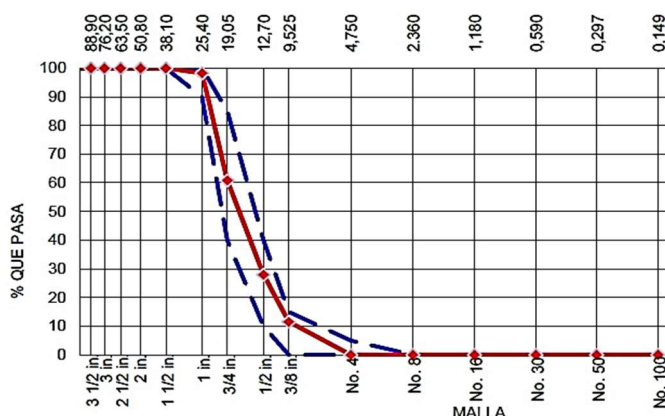


Fig.4. curva granulométrica del agregado grueso.

Asimismo, los valores obtenidos para el peso unitario suelto (P.U.S.) y el peso unitario compactado (P.U.C.) del AF se muestran en la Tabla VIII.

TABLA VIII
RESULTADOS DE P.C.S Y P.U.C DEL AG.

Nº	Reporte	Unidades	Resultados
1	Densidad aparente varillado (Peso unitario varillado) Método A	kg/m3	1596
2	Vacios en agregado varillado Método A	%	43
3	Densidad aparente suelta (Peso unitario suelto) Método C	kg/m3	1420
4	Vacios en agregado suelto Método C	%	49

También, se reportan los valores obtenidos en los ensayos de densidad relativa y absorción (D.R.A.) del agregado grueso, se detallan en la Tabla IX.

TABLA IX
RESULTADOS DE D.R.A DEL AG.

Nº	Reporte	Unidades	Resultados
1	Peso específico de masa	g/cc	2.67
2	Peso específico de sat. sup. seca	g/cc	2.72
3	Peso específico aparente	g/cc	2.78
4	Absorción	%	0.7

Finalmente, en los ensayos realizados para determinar el porcentaje de humedad superficial, se obtuvieron los siguientes resultados: el AF presentó un contenido de humedad de 1.4 %, mientras que el AG registró 0.3 %.

B. Diseño

Se emplea un diseño experimental, el cual se caracteriza por la manipulación directa de las variables independientes (tipo y proporción de aditivos) para evaluar sus efectos sobre variables dependientes (resistencia, absorción, retracción y comportamiento térmico), este diseño permite un alto grado de control interno, lo que garantiza la validez de las inferencias causales derivadas del estudio [3], [10].

Este diseño incluye un grupo de control (concreto convencional sin aditivos) y grupos experimentales con adición en un porcentaje de los materiales orgánicos evaluando su comportamiento mediante un curado de 28 días lo cual el concreto alcance su máxima resistencia. Cada mezcla es sometida a condiciones idénticas de fabricación, curado y ensayo, asegurando la homogeneidad en el tratamiento de las muestras, en la tabla X se muestra los 10 diseños y porcentajes empleados.

TABLA X
DISEÑOS DE MEZCLA.

DISEÑO	CCC KG/M3	CI KG/M3	CEMENTO KG/M3	AF KG/M3	AG KG/M3	AGUA LT/M3
M1	0	0	420	773	907	235
M2	12	0	408	770	904	235
M3	24	0	396	767	900	235
M4	38	0	382	763	896	235
M5	12	4	404	735	936	235
M6	24	4	392	733	933	235
M7	38	4	378	729	928	235
M8	12	16	392	732	932	235
M9	23	15	382	729	928	235
M10	37	15	368	726	924	235

C. Ensayos físicos

1) *Asentamiento*: (NTP 339.035 / ASTM C143): Evalúa la trabajabilidad mediante el cono de Abrams, ver figura 5(a).

2) *Contenido de aire*: (NTP 339.046 / ASTM C231): Determina el aire atrapado o incorporado.

3) *Temperatura*: (ASTM C1064): Verifica condiciones de colocación y fraguado, ver figura 5(b).



Fig.5 (a) ensayo de asentamiento y (b) control de temperatura

D. Ensayos mecánicos

1) *resistencia a compresión*: Este ensayo se realizó para determinar la capacidad del concreto de soportar cargas axiales antes de su falla, evaluando así su calidad, homogeneidad y desempeño mecánico. Las probetas cilíndricas de 15 × 30 cm fueron elaboradas y curadas según la NTP 339.033:2014 [26] y ensayadas a 28 días conforme a la norma NTP 339.035:2015 [27], aplicando una carga axial continua hasta la rotura. La resistencia se calculó mediante la expresión $f_c = P/A$, donde P es la carga máxima y A el área transversal. Cada diseño se evaluó con un mínimo de tres probetas por edad, utilizando una prensa hidráulica de 2000 kN, lo que permitió analizar la evolución de la resistencia y el efecto de las sustituciones de ceniza de CCC e CI respecto al concreto patrón.

2) *resistencia a tracción*: Este ensayo se llevó a cabo con el fin de analizar la cohesión interna del concreto y determinar qué tanto puede soportar esfuerzos de tracción. Las probetas cilíndricas de 15 × 30 cm fueron elaboradas y curadas conforme a la NTP 339.033:2014 y ensayadas a los 28 días según la NTP 339.084:2015 [28], aplicando una carga diametral continua hasta la falla. La resistencia se determinó mediante la expresión $f_t = 2P / (\pi LD)$, registrando la carga máxima aplicada. Este ensayo permitió analizar la tenacidad y uniformidad del concreto, así como el efecto de la CCC Y CI en comparación con la mezcla patrón.

La aplicación de la carga debe realizarse de manera continua y uniforme, evitando impactos bruscos. Al concluir el ensayo, se registra la carga máxima alcanzada expresada en kilo newtons (kN), así como la resistencia a la compresión correspondiente en mega pascales (MPa) y el tipo de fractura observada.

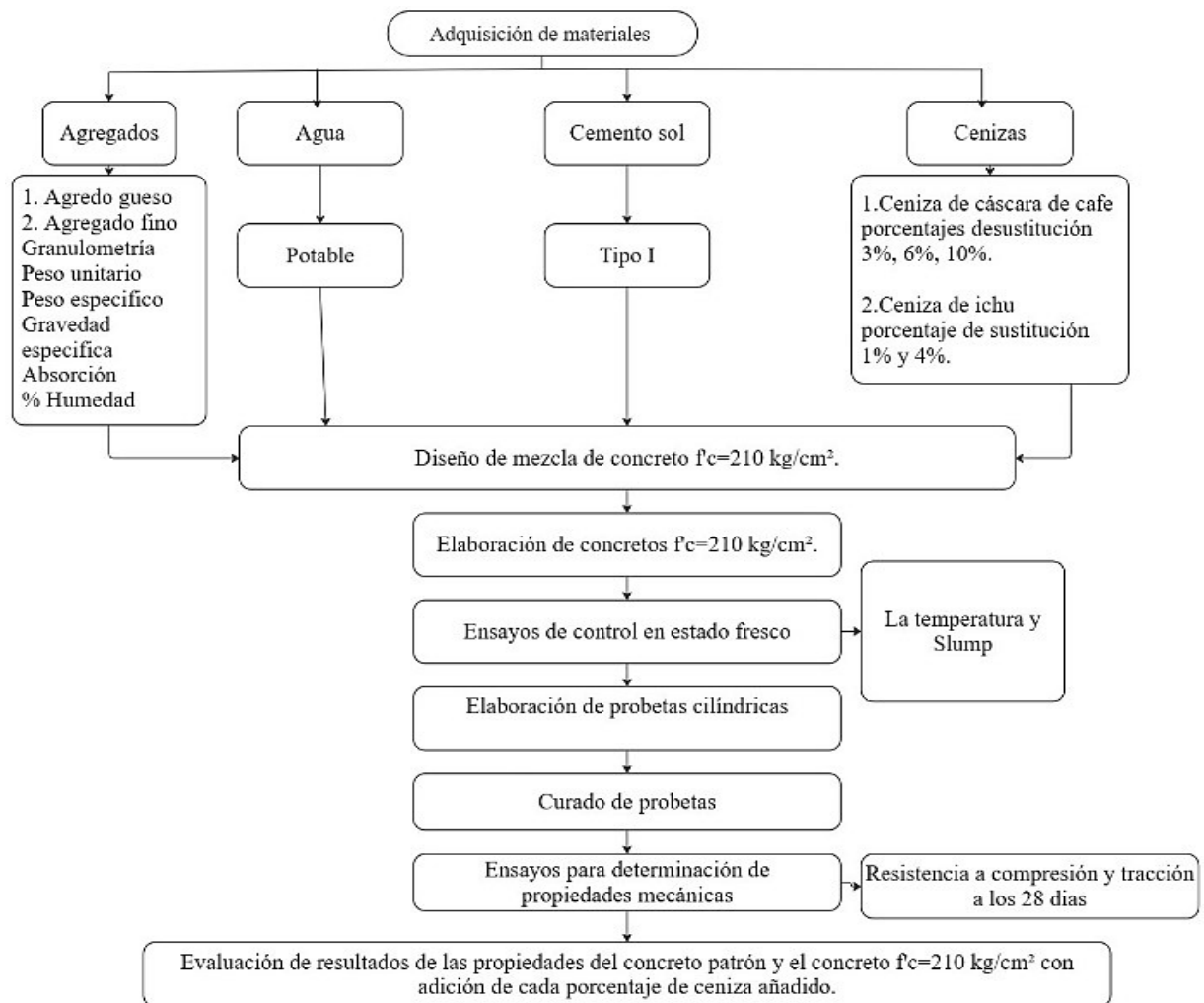


Fig.6 Diagrama de flujo de la metodología de investigación

III. RESULTADOS

A. Ensayos físicos

1) *Asentamiento y temperatura*: En el estado fresco del concreto se realizaron dos ensayos fundamentales con el propósito de determinar la trabajabilidad y la temperatura de las mezclas. Se observó que, a medida que se incrementaban los porcentajes de CCC, el asentamiento tiende a disminuir, mostrando una relación inversamente proporcional, mientras que la temperatura presentó una variación directamente proporcional. Por otro lado, al aumentar el contenido CI, también se evidenció una reducción en el asentamiento, aunque la temperatura se mantuvo prácticamente constante. Los resultados detallados de estos ensayos se presentan en la Tabla XI.

TABLA XI
RESULTADOS DE MEDICIÓN DE ASENTAMIENTO Y TEMPERATURA

DISEÑOS	PORCENTAJES EMPLEADOS PARA REPLAZAR AL CEMENTO	ASENTAMIENTO PULGADAS	TEMPERATURA MEZCLA °C
M1	CCC 0% + CI 0%	6	20.4
M2	CCC 3% + CI 0%	5	20.1
M3	CCC 6% + CI 0%	3	19.9
M4	CCC 10% + CI 0%	1	19.6
M5	CCC 3% + CI 1%	5	19.6
M6	CCC 6% + CI 1%	4	19.6
M7	CCC 10% + CI 1%	0	19.7
M8	CCC 3% + CI 4%	3	19.7
M9	CCC 6% + CI 4%	1	19.7
M10	CCC 10% + CI 4%	0	19.7

B. Ensayos mecánicos

1) *Resistencia a compresión:* La resistencia del concreto patrón alcanzo a 29.63 MPa a los 28 días respectivamente. La mezcla con 6% de CCC y 4% de CI fue la más exitosa, alcanzando 36.77 MPa la cual aumento un 24% respecto al patrón. En cambio, la mezcla con 10% de CCC y 0% de CI fue la menos exitosa, con solo 31.13 MPa.

En el caso del CI, los resultados reflejaron una resistencia ligeramente superior, pero con buena cohesión estructural, demostrando su potencial como material suplementario en mezclas sostenibles. En conjunto, ambas adiciones presentaron un comportamiento mecánico aceptable dentro de los límites normativos, confirmando su viabilidad parcial como sustitutos del cemento. Asimismo, según la Tabla XII el análisis estadístico de la desviación estándar (σ) mostró valores comprendidos entre 0.85 MPa y 1.35 MPa, lo que evidencia una adecuada homogeneidad y consistencia en los resultados obtenidos de las probetas evaluadas. En la fig. 7 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de compresión.

TABLA XII
RESULTADOS DE COMPRESION A 28 DIAS.

DISEÑOS	Resistencia a la compresión (MPa)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	$\bar{x}$	σ
M1	28.30	29.80	30.80	29.63	1.26
M2	31.10	30.30	32.00	31.13	0.85
M3	34.00	32.70	35.40	34.03	1.35
M4	31.60	32.80	30.70	31.70	1.05
M5	31.40	30.40	32.20	31.33	0.90
M6	34.50	33.80	35.60	34.63	0.91
M7	33.10	32.20	31.20	32.16	0.95
M8	35.80	34.00	34.80	34.86	0.90
M9	35.90	37.70	36.70	36.76	0.90
M10	32.30	34.00	33.10	33.13	0.85

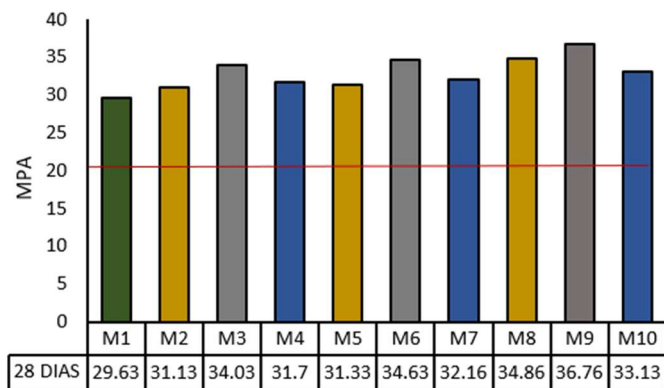


Fig.7. Resultados de resistencia a compresión.

2) *Resistencia a tracción:* En el estado endurecido del concreto se realizó el ensayo de tracción indirecta a 28 días, observándose que la incorporación de CCC y CI mejoró la resistencia en comparación con el concreto patrón 2.8 MPa. La

mezcla M9 con 6% CCC y 1% CI alcanzaron el mayor valor 3.90 MPa, evidenciando un efecto positivo de las adiciones puzolánicas en la matriz cementicia. En general, los resultados muestran que un aumento moderado de CCC y CI contribuye a mayor densificación y mejor adherencia interna, optimizando la resistencia a tracción del concreto. Además, según la Tabla XIII el análisis estadístico de la desviación estándar (σ) mostró valores comprendidos entre 0.02 MPa y 0.12 MPa, lo que evidencia una adecuada homogeneidad y consistencia en los resultados obtenidos de las probetas evaluadas. Los resultados detallados de estos ensayos se presentan en la Fig. 8.

TABLA XIII
RESULTADOS DE TRACCION A 28 DIAS.

DISEÑOS	Resistencia a la compresión (MPa)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	$\bar{x}$	σ
M1	2.82	2.78	30.80	2.80	0.03
M2	2.98	2.88	32.00	2.93	0.07
M3	3.52	3.69	35.40	3.61	0.12
M4	3.08	2.98	30.70	3.03	0.07
M5	3.18	3.07	32.20	3.13	0.08
M6	3.81	3.78	35.60	3.80	0.02
M7	3.24	3.16	31.20	3.20	0.06
M8	3.80	3.71	34.80	3.76	0.06
M9	3.94	3.85	36.70	3.90	0.06
M10	3.38	3.48	33.10	3.43	0.07

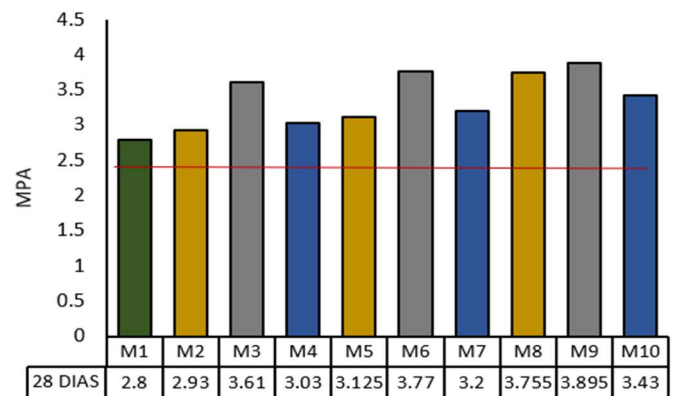


Fig.8. Resultados de resistencia a tracción.

IV. DISCUSIÓN

Los ensayos de asentamiento y temperatura del concreto fresco evidencian que la adición de CCC y CI modifica de manera notable su comportamiento inicial. La mezcla patrón M1, sin adiciones, presentó un asentamiento de 6 pulgadas y una temperatura de 20.4 °C, valores característicos de un concreto con buena trabajabilidad. Al sustituir el cemento con CCC en proporciones de 3%, 6% y 10% en el diseño M2 y M4, el asentamiento disminuyó de 5 a 1 pulgada, evidenciando una menor fluidez debido a la absorción de agua por parte de la

ceniza [14], [29]. La temperatura se redujo levemente hasta 19.6 °C, reflejando una menor liberación de calor de hidratación propia de materiales puzolánicos [4]. En las mezclas con 1% y 4% de CI diseño M5 y M10, el asentamiento continuó descendiendo hasta 0 pulgadas, mientras que la temperatura se mantuvo estable entre 19.6 y 19.7 °C, lo que indica una consistencia seca y térmicamente estable. Este comportamiento se atribuye a la sinergia de absorción entre la CCC y el CI, que reduce la cantidad de agua disponible para la mezcla, en concordancia con estudios como los de [4], [14], que confirma que las cenizas agroindustriales disminuyen la trabajabilidad del concreto, pero mejoran su estabilidad térmica. Cabe recalcar que cuyo resultado inesperado en el que se evidencia que con la mezcla con 10% de cenizas tiende a tener asentamiento cero ya que estas cenizas poseen alta porosidad y superficie específica, absorbiendo gran parte del agua libre y dejando la mezcla seca y rígida, sin capacidad de fluir [14], [5]. Asimismo, Se presentaron limitaciones en el proceso de combustión, especialmente debido a la temperatura de calcinación, así como a la dificultad para obtener materiales como la cáscara de café y el ichu. En vista de estas limitaciones, se recomienda ajustar la relación agua/cemento, o bien, emplear aditivos plastificantes, con el fin de optimizar la mezcla, facilitar su colocación y mejorar la compactación del material.

Los resultados del ensayo de compresión se observaron tanto el punto más alto como el más bajo en términos de resistencia. El valor más alto de resistencia fue alcanzado con la mezcla de 6% de CCC y 4% de CI, que logró una resistencia de 36.77 MPa, significativamente superior a la del concreto patrón 29.63 MPa. Esta combinación aprovechó el efecto sinérgico entre la sílice de la CCC y la alúmina del CI, favoreciendo una mejor reactividad y una microestructura más compacta, lo que resultó en una mejora considerable en la resistencia del concreto [10], [5], [30]. Por otro lado, el valor más bajo de resistencia se obtuvo con una mezcla de 10% de CCC y 0% de CI, que alcanzó una resistencia notablemente inferior a la del concreto patrón, indicando que una mayor proporción de CCC sin CI no favorece la reactividad puzolánica y afecta negativamente la resistencia del concreto [2], [11]. Este comportamiento confirma una energía química entre ambas cenizas, ya que la sílice y alúmina del ichu complementan la reactividad de la CCC, generando una microestructura más compacta [2], [5], [11]. Asimismo, siendo inesperado el resultado se evidencia que, a medida, la sustitución alcanza el 10%, la resistencia a compresión disminuye porque hay menos clinker disponible para la hidratación y la ceniza en exceso incrementa la porosidad de la mezcla, formando una matriz menos densa y con menor capacidad para soportar cargas axiales [5], [10], [11]. Por consiguiente, Se presentaron limitaciones en los ensayos ya que se realizaron únicamente a 28 días, sin evaluar resistencias a largo plazo, donde los materiales puzolánicos suelen mostrar un comportamiento más marcado, asimismo tampoco se estudiaron variaciones en la relación agua/cemento ni en el tamaño de partícula de las cenizas, factores que podrían modificar la reactividad y la

trabajabilidad. Por esta se sugiere líneas de investigación futura, alargar el tiempo de curado ya que la resistencia del concreto con puzolanas suele mostrar incrementos significativos en edades mayores de 56 o 90 días, asimismo se recomienda el control adecuado de la temperatura y el tiempo de calcinación de las cenizas de 600 a 700 °C durante 2 a 3 horas, ya que una calcinación uniforme incrementa la presencia de sílice amorfa y permite obtener resistencias a compresión más consistentes.

Los resultados del ensayo de resistencia a tracción indirecta evidencian que la incorporación de CCC y CI influye significativamente en el comportamiento mecánico del concreto a 28 días. La mezcla patrón obtuvo una resistencia de 2.80 MPa, mientras que las mezclas con 3% y 6% de CCC alcanzaron 3.61 MPa y 3.77 MPa, respectivamente. Este incremento se debe al efecto puzolánico generado por la sílice amorfa presente en la CCC, que reacciona con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando silicatos de calcio hidratados adicionales, los cuales mejoran la cohesión interna del concreto [2]. Sin embargo, al incrementar la sustitución de cemento con 10% de CCC, la resistencia se redujo a 3.03 MPa, debido a una disminución del contenido de clinker activo y un mayor consumo de agua, lo que genera una matriz más porosa y menos compacta [10]. Este comportamiento concuerda con lo reportado por [3], [5], [31], quienes señalan que el exceso de material puzolánico puede disminuir la resistencia temprana cuando el contenido de cemento se ve limitado para completar las reacciones de hidratación. Esto sugiere una sinergia entre ambas cenizas, donde la sílice y alúmina reactiva del ichu complementan la reacción puzolánica de la CCC, mejorando la microestructura y adherencia pasta-agregado. Según las Ref. [5], [6], [14], los resultados confirman que una sustitución moderada entre 3% y 6% de CCC junto con pequeñas proporciones de CI mejora la resistencia a tracción, mientras que porcentajes mayores generan mezclas más secas y con menor desarrollo mecánico. Asimismo, se observa en beneficio a esta investigación, un resultado inesperado en el que se evidencia que con la mezcla de 4% de CI y 6% de CCC se obtuvo un óptimo resultado con una mejora de 39% de resistencia a tracción respecto el patrón. Cuyos límites en este estudio el realizar un tamizado o molienda estandarizada de las cenizas, lo cual ocasionó partículas demasiado gruesas que actuaron como relleno inerte, y partículas muy porosas que absorbieron agua y aumentaron la relación agua/material cementante efectiva. Finalmente se recomienda en futuras investigaciones podría tener un control más adecuado en la finura de las cenizas, pues cenizas demasiado gruesas generan puentes débiles en la matriz y reducen la tenacidad del concreto.

Aunque los resultados mecánicos obtenidos evidencian la viabilidad del uso de CCC y CI como materiales cementantes suplementarios, su implementación a escala real podría verse limitada por factores logísticos, como la disponibilidad estacional de la cáscara de café, la dispersión geográfica del ichu y los costos asociados a su transporte y procesamiento. Asimismo, el proceso de obtención de cenizas mediante

combustión podría contrarrestar parcialmente los beneficios ambientales si no se emplean tecnologías eficientes o fuentes de energía limpias.

V. CONCLUSIÓN

La investigación confirma que tanto la CCC como el CI reducen la trabajabilidad del concreto, disminuyendo el asentamiento a medida que aumenta su porcentaje de incorporación. Sin embargo, los valores obtenidos se mantienen dentro de rangos aceptables para mezclas estructurales, y la temperatura del concreto permanece estable, lo que indica que estas cenizas no afectan significativamente el comportamiento térmico de la mezcla.

Los resultados de resistencia a compresión y tracción, esta investigación evidencia que las combinaciones moderadas de CCC 3% y 6% con CI 1% y 4% generan los mejores desempeños estructurales, alcanzando incrementos de hasta 24% en compresión y 39% en tracción respecto a la mezcla estándar. Por el contrario, sustituciones superiores al 10% de CCC reducen la resistencia debido a la disminución de clinker disponible.

La investigación aporta una contribución relevante al estado del conocimiento, ya que evalúa por primera vez el comportamiento conjunto de la CCC y la CI como sustitutos parciales del cemento. Aunque ambos materiales han sido estudiados de manera independiente, y en conjunto no existían análisis experimentales que demostraran su sinergia. Este resultado demuestra que es posible mejorar el desempeño estructural del concreto mediante sustituciones parciales ecoeficientes, aportando una solución real al problema de investigación: reducir el impacto ambiental de la producción de concreto sin comprometer su resistencia ni su funcionalidad, generando una nueva alternativa sostenible que aprovecha residuos agroindustriales locales, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO₂ en la industria de la construcción.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen análisis de ciclo de vida y evaluación económica para determinar la sostenibilidad integral del uso de CCC y CI.

REFERENCIAS

- [1] Caneda-Martínez, L., Frias, M., Sánchez, J., Rebolledo, N., Flores, E., & Medina, C. (2022). Durability of eco-efficient binary cement mortars based on ichu ash: Effect on carbonation and chloride resistance. *Cement and Concrete Composites*, 131, 104608. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104608>.
- [2] Gedefaw, A., Yifru, B. W., Endale, S. A., Habtegebreal, B. T., & Yehualaw, M. D. (2022). Experimental investigation on the effects of coffee husk ash as partial cement replacement on the properties of concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 4175460. <https://doi.org/10.1155/2022/4175460>.
- [3] Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Ananova, O., Chernil'nik, A., El'shaeva, D., Pogrebnyak, A., Dubinkin, I., Madenci, E., & Aksoylu, C. (2024). Performance evaluation of a new eco-friendly concrete from coffee grounds biochar waste. *Recycling*, 9(5), 94. <https://doi.org/10.3390/recycling9050094>.
- [4] Muñoz Pérez, SP, Rivera Segura, ME, Alejandria Bustamante, YA, y Villena Zapata, LI (2024). Estudio del efecto combinado de la ceniza de

cascarilla de café y las fibras de polipropileno en las propiedades mecánicas del hormigón. *Revista de Investigación Aplicada y Tecnología*, 22 (1), 32–41. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2024.22.1.2131>.

- [5] Asfaw, F. B., Hareru, W. K., & Ghebrab, T. (2022). Physical and chemical characterization of the effect of coffee husk ash in partial cement replacement for concrete production. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(1), 167–184. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.01.016>.
- [6] Wahyuni, W., Zein, K. C. S., Munawir, M., & Ariadi, P. N. (2023). Effect of mixing coffee husk ash as a cement replacement on the strength of concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1140(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1140/1/012019>.
- [7] Yee, J. J., Khong, S. C., Tee, K. F., Gimbut, J., & Chin, S. C. (2024). Optimization study of spent coffee grounds as cement mortar additives using response surface methodology. *Discover Applied Sciences*, 6(7), 379. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06077-9>.
- [8] Gokul, P. V., Kadarkarai, A., Thomas, E., Revi, A., Nair, I. R., & Althaf, M. (2024). Investigation on feasibility of utilizing coffee-husk ash as an alkaline activator in geopolymer concrete. *E3S Web of Conferences*, 529, 01041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452901041>.
- [9] Yee, J. J., Khong, S. C., Tee, K. F., Gimbut, J., & Chin, S. C. (2025). Addition of spent coffee grounds to reduce cement usage and enhance the strength of cement mortar. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1680/jfoen.25.00021>.
- [10] Charca, S., & Candiotti, S. (2020). Mechanical properties characterization of the Ichu fibers composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 942, 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012010>.
- [11] Colunche Idrogo, A. N., Mayta Tanta, L. M., Flores Quispe, A. C., & Del Carpio Delgado, F. (2023). Performance of 28 mega pascal self-compacting concrete using sustainable raw materials and their influence on mechanical behavior [Comportamiento de concreto autocompactante de 28 mega pascales aplicando materias primas sostenibles y su influencia en el comportamiento mecánico]. *Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias*, 2(395). <https://doi.org/10.56294/scetconf2023395>.
- [12] Cement Chemistry: Calcium Silicates and Anhydrous Phases Profundiza en la química del cemento, fases básicas del clinker (alite, belita, aluminatos) y su papel en la hidratación y resistencia.
- [13] UNACEM S.A.A. (2023). Ficha técnica: Cemento Sol Portland Tipo I. <https://www.unacem.com.pe/productos/cemento-sol-tipo-i>.
- [14] Frias, M., Caneda-Martínez, L., Sánchez de Rojas, M. I., Tenazoa, C., & Flores, E. (2020). Scientific and technical studies on eco-efficient binary cements produced with thermally activated ichu grass: Behaviour and properties. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103613. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103613>.
- [15] Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima – SEDAPAL. (2024). Informe de Calidad del Agua – Planta de Tratamiento Huachipa. Lima, Perú.
- [16] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2014). NTP 400.037:2014. Agregados. Requisitos para los agregados finos y gruesos. Lima, Perú.
- [17] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2014). NTP 400.021:2014. Agregados. Determinación de la densidad, la gravedad específica y la absorción del agregado fino. Lima, Perú.
- [18] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2015). NTP 400.020:2015. Agregados. Determinación de la densidad, la gravedad específica y la absorción del agregado grueso. Lima, Perú.
- [19] ASTM International. (2023). ASTM C150/C150M-23: Standard Specification for Portland Cement. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-23.
- [20] Portland Cement Technology (2.^a edición) — Klaus W. Revie / J. W. Grim / otros Explica en detalle la composición, fabricación, pruebas de calidad, molienda y comportamiento del cemento Portland.
- [21] Portland Cement: Composition, Production and Properties — G. C. Bye Buen texto introductorio (pero riguroso) sobre materias primas, procesos de fabricación, hidratación y características del cemento Portland.
- [22] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2014). NTP 339.088:2014. Concreto – Agua para mezclas de concreto – Requisitos. Lima, Perú.

- [23] ASTM International. (2018). ASTM C1602/C1602M – 18. Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.
- [24] Cantera Jicamarca S.A.C. (2023). *Ficha técnica de arena natural lavada – Zona Huachipa*. Lima, Perú.
- [25] Cantera La Gloria S.A.C. (2023). *Ficha técnica de grava triturada ¾” – Zona Huachipa*. Lima, Perú.
- [26] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2014). *NTP 339.033:2014. Concreto: Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio*. Lima, Perú
- [27] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2015). *NTP 339.035:2015. Concreto: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto*. Lima, Perú.
- [28] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2015). *NTP 339.084:2015. Concreto: Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral*. Lima, Perú.
- [29] Coelho, N. P. F., Nalón, G. H., Mendes, J. F., de Oliveira, T. J. P., & Mendes, R. F. (2025). Effects of coffee husk biochar on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 491, 142680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142680>
- [30] Kumar, G. S., Ujwal, M. S., Kumar, H. A., Sudeep, Y. H., & Venkatesha, G. (2025). Evaluation of the impact of spent coffee grounds on workability and mechanical properties of concrete using response surface methodology. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(2), 70. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01843-5>
- [31] Cherkos, F. D. (2025). Experimental study on the mechanical, durability, and microstructural properties of concrete with partial cement replacement with coffee husk ash and rice husk ash. <https://doi.org/10.1155/amse/9592140>.