

Influencia de la Ceniza de Subproductos-Agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las Propiedades Mecánicas y Microestructurales del concreto, ICA-2024

José Darío Gonzáles Zarpán^{1*}, Wilber Quispe Prado¹

¹ Escuela de Posgrado. Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú.

* Autor para correspondencia: José Darío Gonzáles Zarpán, josedariogonzalezzarpan@outlook.com.pe

(Recibido: 10-10-2024. Publicado: 23-10-2024.)

DOI: 10.59427/rcli/2024/v24cs.2152-2190

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la influencia de la adición de cenizas de subproductos agroindustriales, como ceniza de cáscara de arroz (RHA), ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) y ceniza de mazorca de maíz (CCA), en reemplazo parcial del cemento, sobre las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto convencional. La metodología utilizada fue experimental, incorporando cenizas en proporciones del 4 %, 6 %, 8 % y 10 %, y evaluando su efecto mediante ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, flexión y módulo de elasticidad a los 7, 14 y 28 días de curado. Adicionalmente, se realizaron análisis microestructurales mediante difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar la estructura interna del concreto modificado. Los resultados mostraron que la adición de SCBA y RHA, en especial en un porcentaje del 6 %, mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto, destacándose en la resistencia a la compresión y flexión. Asimismo, se observó una mejora en la cohesión interna y estabilidad del concreto, lo cual fue confirmado a través de los análisis microestructurales. En contraste, el uso de CCA no mostró mejoras significativas, sugiriendo que su aplicación debe ser limitada. La investigación concluye que el uso de cenizas de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento no solo mejora las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto, sino que también promueve una alternativa sostenible para reducir el consumo de cemento y mitigar el impacto ambiental del sector de la construcción.

Palabras claves: Cenizas agroindustriales, sustitución parcial de cemento, propiedades mecánicas del concreto, análisis microestructural, construcción sostenible.

Abstract

The present research aims to evaluate the influence of the addition of ashes of agro-industrial by-products, such as rice husk ash (RHA), sugarcane bagasse ash (SCBA) and corn cob ash (CCA), in partial replacement of cement, on the mechanical and microstructural properties of conventional concrete. The methodology used was experimental, incorporating ashes in proportions of 4 %, 6 %, 8 % and 10 %, and evaluating its effect through tests of compressive strength, indirect traction, bending and modulus of elasticity at 7, 14 and 28 days of curing. Additionally, microstructural analyses were performed using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) to characterize the internal structure of the modified concrete. The results showed that the addition of SCBA and RHA, especially in a percentage of 6 %, significantly improves the mechanical properties of the concrete, standing out in the compressive and flexural strength. Likewise, an improvement in the internal cohesion and stability of the concrete was observed, which was confirmed through microstructural analyses. In contrast, the use of CCA did not show significant improvements, suggesting that its application should be limited. The research concludes that the use of ash from agro-industrial by-products as a partial substitute for cement not only improves the mechanical and microstructural properties of concrete, but also promotes a sustainable alternative to reduce cement consumption and mitigate the environmental impact of the construction sector.

Keywords: *Agro-industrial ashes, partial cement substitution, mechanical properties of concrete, microstructural analysis, sustainable construction.*

1. Introducción

Debido al desarrollo del mercado de la construcción se considera a los residuos agroindustriales como una opción favorable para el reemplazo parcial del cemento (Gedefaw et al., 2022), por ende, investigadores de diferentes países se han enfocado en utilizar los residuos agrícolas como material cementicio (Asfaw et al., 2022) reduciendo así los gases de invernadero, ya que muchos de estos son eliminados mediante su quema (Kassa, 2019). En relación con ello, los materiales agroindustriales se manifiestan como nuevas alternativas que pueden ser capaces de reemplazar los materiales convencionales utilizados en el sector de la construcción (Li et al. 2022). Siendo los más comunes en las actividades agroindustriales de la Costa Peruana: la cáscara de arroz, el bagazo de caña, cascara de café, y rastrojo de maíz. En efecto, se espera que el uso de estos residuos satisfaga lo socioeconómico en las construcciones (Mohan & Chandrasekaran, 2022). De acuerdo con la revisión literaria se puede identificar que la influencia de los subproductos agroindustriales como sustitución del cemento beneficiará las propiedades del concreto que se fabrique (Castillo Piscoya et al., 2021), las cenizas de bagazo de caña de azúcar (SCBA) al adherirse al cemento otorga un aumento en la resistencia a la tracción del concreto (Rolón & Castañeda, 2021), mientras que la paja de arroz necesita ser pretratada para mejorar la resistencia a la flexión (Liu et al., 2022) Así mismo, el uso de la mazorca del maíz no puede ser usada en materiales de construcción que absorban rápidamente agua (Polat, 2021), por lo tanto, se indica que se debe realizar una mayor investigación de los efectos de las cenizas en las propiedades del concreto de forma conjunta (Shafiq et al., 2018). En la actualidad se puede observar que el sector de la construcción hace uso de las materias primas en demasía para la fabricación del concreto, tales como cemento, agregados y agua (Asfaw et al., 2022), como componentes imprescindibles e irremplazables para lograr una buena mezcla (Mounika et al., 2022), lo cual ha provocado un crecimiento descontrolado respecto a la extracción de dichos recursos (Balagopal et al., 2017), esta extracción irracional y proliferada de todas maneras suma un daño a la biósfera (Y. Li et al., 2022), debido a la generación de polvos tóxicos y emisiones de CO₂ (Syahida Adnan et al., 2021). Ante esta realidad es imperativo el uso e implementación urgente de materiales sostenibles, para reducir la contaminación ambiental e incluso la sobreexplotación de los recursos naturales (Hakeem, Amin, et al., 2022). Es importante destacar el efecto positivo en la reutilización de residuos agroindustriales, ya que reducirá el consumo excesivo del cemento logrando una construcción amigable con la ecología (Castillo Piscoya et al., 2021).

A nivel mundial el ascenso de la producción agrícola se debe principalmente al incremento de la población y satisfacer sus necesidades alimentarias, siendo estos las principales fuentes de alimento para las personas. Países como Brasil, India, Vietnam, China y EE. UU., son considerados los principales productores de caña de azúcar, café, arroz y maíz. (Torres de Sande et al., 2021). Brasil es considerado uno de los mayores exportadores de productos agrícolas del mundo (Andrade Neto et al., 2021), seguido por India y Vietnam, así mismo podemos observar que el mayor productor de arroz es China, la cual representa el 28 % a nivel mundial (Hu et al., 2021), mientras que EE. UU. representa el mayor productor de maíz a nivel mundial (Bagcal & Baccay, 2019). Se concluye que en la misma proporción que estos países producen dichos insumos también producen residuos que generan un aumento del GEI durante el proceso de su eliminación (Agwa et al., 2020; Hakeem, Amin, et al., 2022). Las propiedades de los subproductos agroindustriales dependerán de sus áreas geográficas, condiciones del clima y la calidad del suelo (Gedefaw et al., 2022), posteriormente la (SCBA) es el desecho final de su proceso (Wu et al., 2022), mientras que la cascara del grano de café es el primer desecho obtenido en su procesamiento, al mismo tiempo la SCBA posee una composición similar a la ceniza de cascara de arroz (Mohan & Chandrasekaran, 2022), por ello mediante un análisis de difracción de rayos X se demostró que está compuesta por 70 % de sílice (Setayesh Gar et al., 2017). Respecto a la cascara de arroz es el resultado del proceso de molienda (Kang et al., 2019), la cual al ser sometido a un proceso de combustión se obtendrá (CCA) (Mounika et al., 2022), con un alto contenido de sílice (Miller et al., 2019), al igual que el rastrojo de maíz (Salas Fortón, 2018).

Cabe recalcar, que para producir un óptimo contenido de sílice que no sean cristalinas (Miller et al., 2019), estos subproductos deberán estar sometidos a una temperatura adecuada, a fin de obtener cenizas que mejoren la reactividad puzolánica (Y. Li et al., 2022). Diversas investigaciones demostraron que para obtener las cenizas de cáscara de café deberán estar expuestas a intervalo de temperaturas de 500°C a 900°C (Gedefaw et al., 2022), se precisa que a una temperatura de 550°C se obtendrá un CCC requerido (Asfaw et al., 2022), para la obtención de las CCA deberán estar a sometidos entre 600°C y 900°C (Mounika et al., 2022), así mismo las SCBA deberán estar expuestas a temperaturas de 500°C a 700°C a fin de obtener un componente con alta reactividad puzolánica (Kang et al., 2019), teniendo en cuenta las investigaciones mencionadas se deduce que la temperatura de calcinación es un componente importante que interviene en las propiedades químicas de las cenizas. Es por ello que al someter estos residuos agroindustriales a un proceso de combustión de altas temperaturas durante un tiempo prolongado (Hakeem, Amin, et al., 2022), producirá una disminución en las propiedades químicas de las cenizas (Gedefaw et al., 2022), así mismo esto generaría una gran cantidad de sílice cristalina (Y. Li et al., 2022), componente que reduce de manera significativa la reactividad puzolánica (Asfaw et al., 2022), de igual modo se considera dañino

para la salud cuando se encuentra expuesto al aire libre (Asfaw et al., 2022), por lo tanto se debe seguir un correcto procedimiento en la incineración a fin de evitar pérdidas de contenido de sílice amorfa, de manera que estos puedan usarse como sustitución del cemento, y proporcionar un buen rendimiento al concreto convencional en su estado endurecido. El problema planteado en la investigación son los siguientes: ¿Cuál es la influencia de la adición de ceniza de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto convencional?. ¿Cómo influye la adición de las cenizas de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las propiedades mecánicas del concreto?. ¿Cómo influye la adición de las cenizas de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las propiedades microestructurales del concreto?. Y el Objetivo de la investigación es Determinar la influencia de la adición de ceniza de subproductos agroindustriales (CSA) como sustituto parcial del cemento sobre las propiedades mecánicas y características microestructurales del concreto, Ica-2024.

2. Bases teóricas de la investigación

La calcinación de subproductos agroindustriales, es decir del residuo que genera, por ejemplo, la fabricación de arroz, azúcar o los derivados del maíz, significa la generación de puzolanas naturales que mejoran la calidad del concreto convencional al ser sustituidas parcialmente por el cemento. Es importante entonces, como tratamiento previo, identificar la temperatura y duración apropiada de la calcinación de dichos residuos seleccionados, para ser utilizado como material aglomerante, ya que estos factores influyen de manera directa en las propiedades de las cenizas.

Al respecto, de acuerdo a los investigadores internacionales, Hu et al (2020) la temperatura límite inferior para quemar adecuadamente la cáscara de arroz y sea usada en el concreto es de 600 °C; sin embargo el investigador Kang et al (2019) determinó que por encima de los 650° C las partículas de RHA tiene una estructura amorfa, lo que influye positivamente cuando se adiciona al concreto, el mismo autor concluye que por encima de los 700° C la ceniza presenta actividad puzolánica; todas las referencias citadas calcinaron la cáscara de arroz durante dos horas. Los investigadores Ahsan & Hossain (2018) y Hakeem et al (2022) coinciden que la RHA, a partir de su calcinación por encima de los 850° C produce importante presencia de sílice reactiva en forma amorfa, lo cual, se coteja positivamente con la investigación de Nihade et al (2022), demostraron que la calcinación de las cáscara de arroz en temperatura mayor a 800 °C obtiene sílice en forma cristalina lo cual es adecuada en la formación del clínker del concreto convencional. Por otro lado, considerando el límite superior, los resultados del artículo de Abolhasani et al (2022) concluyen que por encima de los 1000 °C la ceniza calcinada degrada las propiedades mecánicas del concreto en su estado endurecido.

Respecto a la SCBA, los resultados son variables. Los investigadores Rajasekar et al (2018) demostraron que la temperatura de calcinación apropiada para este residuo está en un rango de 450 – 650°C, lo cual fue contrastado y validado por Nihade&Rathan (2022). Al respecto, sobre lo mencionado, Hussien & Oan (2022) concluyen que se logra buenos resultados con ceniza calcinada a una temperatura mayor a 600 °C por dos horas, lo que contrasta con los resultados de Abdalla et al (2022) que establece que se obtiene partículas de las cenizas con una fase amorfa, siempre que la temperatura de quema sea mayor a 650 °C y Praveenkumar & Sankarasubramanian (2019) afirma que dicha temperatura sea mayor que 700 °C por 4 horas de duración.

Respecto a la ceniza que deriva del uso industrial del maíz, los investigadores Murthi et al (2020), Rolón & Castañeda (2021), Mohan & Chandrasekaran (2022), demostraron y definen que el uso de esta ceniza obtiene buenos resultados en el concreto convencional a partir de una calcinación mayor de 700 °C en promedio del residuos de la mazorca, que implica la quema de la tusa, la hoja y el tallo de la planta del maíz.

Según investigaciones encontradas para comprobar la naturaleza puzolánica de los subproductos agroindustriales, se observó que la temperatura idónea para la incineración oscila entre 600°C y 800°C (Hu et al., 2020), la cual obtendrá cenizas con alto porcentaje de sílice amorfa con efecto puzolánico excelente (Tarekegn et al., 2022), además cabe mencionar que, a temperaturas menores a 500°C, es posible encontrar partículas de carbono en su composición (Tripathy & Acharya, 2022), por lo tanto se recomienda la incineración con una duración de 2 a 3 horas (Tarekegn et al., 2022), mientras que a temperaturas altas se recomienda tiempos de duración cortos.

A partir de lo expuesto en los párrafos anteriores sobre los antecedentes internacionales, se interpreta que la evaluación de la composición química de la ceniza del subproducto agroindustrial es importante para establecer si se comportará no solo como una puzolana natural, además como un material cementicio suplementario con la capacidad para sustituir al cemento y contribuya en el beneficio sobre sus propiedades mecánicas. Una revisión documentaria a partir de investigación del nivel Q1 y Q2 como indicador de calidad en la información científica, para obtener resultados de la composición química de sus cenizas representados en función de óxidos porcentuales, permite observar que se asegura el uso de un material calcinado donde los óxidos puzolánicos que establece la norma ASTM C612 superen el 70%. La información se ha organizado en la siguiente tabla 1.

Tabla 1: Composición Química de las Cenizas de Residuos sub Agroindustriales.

Ceniza	Referencia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Cemento Portland	Cemento Sol Tipo I (ver ficha)	20.59	4.81	3.34	63.15	1.92	0.28	0.54	-
	(Wu et al., 2022)	62.44	12.10	3.44	2.52	1.97	0.64	4.82	0.02
SCBA	(Dimiz et al., 2022)	60.04	3.08	25.78	2.47	1.02	-	3.39	0.34
	(Rajasekar et al., 2018)	86.79	2.45	1.75	3.42	1.46	-	3.83	0.30
	(Bayapureddy et al., 2020)	68.38	5.25	5.82	5.26	2.65	0.06	2.62	-
	(Shafiq et al., 2018)	77.25	6.37	4.21	4.05	2.61	1.38	2.34	0.11
	(Abdalla et al., 2022)	76.18	3.62	8.71	2.88	0.00	-	5.50	0.00
	(Zareei et al., 2018)	64.23	9.08	5.47	8.17	2.97	0.87	1.32	-
	(Andrade Neto et al., 2021)	63.10	7.56	4.59	8.28	4.54	1.24	5.43	1.92
RHA	(Hu et al., 2020)	95.99	0.35	0.16	1.30	0.08	0.12	1.18	0.32
	(Vieira et al., 2020)	89.95	4.79	0.86	0.79	0.24	-	1.38	1.34
	(Makul, 2019)	91.45	0.44	0.18	0.99	0.20	0.11	1.39	0.04
	(Sua-iam et al., 2019)	91.45	0.44	0.18	0.99	0.36	0.11	1.39	0.14
	(Hu et al., 2021)	94.38	0.30	0.07	1.20	0.82	0.10	1.06	1.19
	(Abolhasani et al., 2022)	90.11	1.19	0.85	0.89	0.90	-	3.84	-
	(Kang et al., 2019)	92.00	0.31	0.38	0.97	0.47	0.20	3.87	-
	(Miller et al., 2019)	92.80	0.21	0.12	0.51	0.75	0.15	1.35	0.14
	(Nasir Amin et al., 2022)	95.10	0.50	0.40	0.12	0.11	0.38	2.23	0.13
	(Oyebisi et al., 2017)	64.50	6.48	4.03	-	-	0.90	-	1.06
CCA	(Singh et al., 2018)	62.20	17.90	9.13	2.96	-	-	-	-
	(Memon & Khan, 2018)	61.80	6.31	1.97	4.01	-	0.19	5.81	1.17

Tipo I. La interpretación y análisis considera cómo estas características químicas afectan las propiedades del concreto, especialmente en el contexto de la sustitución parcial del cemento.

La suma de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ es un indicador clave de la actividad puzolánica. Las cenizas con un contenido alto de estos óxidos suelen tener buenas propiedades puzolánicas. La RHA muestra los valores más altos, con todos los registros por encima del 92 %, lo que sugiere una alta actividad puzolánica. La SCBA también muestra altos valores, particularmente en estudios de Rajasekar et al. (90.99 %) y Wu et al. (77.98 %). Respecto a la CCA muestra una variabilidad más amplia, pero Singh et al. (2018) muestra un valor alto del 89.23 %. En cuanto al CaO, este es fundamental para la formación de productos cementantes cuando las cenizas reaccionan con hidróxido de calcio, se observa que el cemento Portland tiene un alto contenido de CaO (63.15 %), mientras que las cenizas tienen valores mucho menores, lo que sugiere que la sustitución de cemento por cenizas reducirá el contenido de CaO en la mezcla, lo cual puede impactar la resistencia inicial del concreto, pero mejorar otras propiedades a largo plazo. Respecto a otros óxidos como MgO, Na₂O, K₂O, SO₃, estos pueden influir en la durabilidad y otras propiedades mecánicas del concreto. Por ejemplo, altos contenidos de Na₂O y K₂O pueden contribuir a reacciones álcali-agregado; o el contenido de SO₃ ≤ 4 % es relevante para la expansión y durabilidad del concreto, sin embargo, se observa que la mayoría de las cenizas tienen un contenido bajo de SO₃, excepto algunas variaciones en SCBA.

Respecto a la SCBA se observa que cumple con los requisitos químicos de la ASTM C618, con altos contenidos de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ (por ejemplo, Rajasekar et al., Wu et al.), la variabilidad en los valores de CaO y otros óxidos sugiere que los efectos sobre el concreto pueden variar dependiendo del origen y procesamiento de la SCBA. La RHA presenta una excelente actividad puzolánica, con todos los estudios cumpliendo y superando los requisitos de la norma, los bajos contenidos de otros óxidos también indican que podría mejorar significativamente la durabilidad del concreto. La CCA muestra una mayor variabilidad en los valores de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, con algunos estudios cumpliendo los requisitos normativos y otros no, sin embargo, su variabilidad sugiere que se debe tener cuidado al seleccionar y procesar CCA para uso en concreto.

La reacción puzolánica de la RHA, se debe esencialmente a su alto contenido de sílice amorfa (Agwa et al., 2020; Rodríguez de Sensale & Rodríguez Viacava, 2018), obtenido mediante la combustión controlada de la cáscara de arroz. Asimismo distintos investigadores, realizaron pruebas de resistencia, la cual consistió en la elaboración de probetas con adición de RHA en un rango de 5 %-20 % (Abolhasani et al., 2022; Hu et al., 2020; Saloni et al., 2021; Vieira et al., 2020), se observó mejora con un 10 % puede de la f'c en un 6 %, mientras que el MR puede disminuir hasta -2 %, lo cual depende del tiempo de curado, ya que (Saloni et al., 2021) tiene un curado de 90 días en donde se observó que a esa edad logra mayor resistencia incluso hay estudios que han realizado uso de porcentajes que sobrepasan los 10 %.

El residuo agroindustrial de la ceniza del bagazo de caña de azúcar, es usado como un combustible generador para producir electricidad (Wu et al., 2022), a base de esto existen investigaciones donde este residuo es convertido en ceniza y usado como un material puzolánico en la elaboración del concreto, pero esto dependerá de su composición química ya que al ser usado como un material cementicio debe cumplir la normativa.

Para obtener una estructura química se debe tener en cuenta la temperatura y el tiempo de incineración, ya que de ellos dependerá su degradación térmica, estas oscilan de 600°C a 800°C y una duración que va desde 1h hasta

3h (Abdalla et al., 2022; H. R. Nikhade & Ram Rathan Lal, 2022; Rajasekar et al., 2018), ya que esto dependerá si el contenido de sílice de las cenizas presenta una fase amorfa (Praveenkumar & Sankarasubramanian, 2019) o produce ceniza en bruto (Zareei et al., 2018). Se espera de este proceso unas cenizas amorfas y que presente un alto contenido de sílice.

De los antecedentes internacionales consultados la influencia de la ceniza de mazorca de maíz en las propiedades mecánicas del concreto, llegando a determinar que al sustituir el cemento por la CCA, por un porcentaje mayor al 20 %, este tiende a disminuir la resistencia a la compresión del concreto (Singh et al., 2018), mientras que la unión de CCA con la ceniza de aserrín, llega a mejorar la resistencia del concreto, con un porcentaje de sustitución de 10 % (Rushendramani et al., 2014), asimismo la adición de CCA con fibras de polipropileno, mejoran las propiedades microestructurales y mecánicas del concreto (Mohan & Chandrasekaran, 2022).

Investigaciones sobre el uso de la RHA, en las cuales (Abolhasani et al., 2022; Ahsan & Hossain, 2018; Hidalgo et al., 2021; Liu et al., 2022), adicionaron proporciones en un rango desde 5 % a 20 %, asimismo usaron una relación similar de agua/cemento, con lo cual lograron determinar que el porcentaje óptimo de sustitución de RHA está en el rango de 5 % a 10 %,. En cambio (Ahsan & Hossain, 2018) (Saloni et al., 2021) no lograron alcanzar la resistencia requerida, puesto que realizaron un proceso de combustión de las RHA a temperaturas muy elevadas, en efecto obtuvieron un alto porcentaje de sílice cristalina y presencia de impurezas, la cual esto afectó en la reactividad puzolánica del RHA.

Respecto a la resistencia a la flexión se registran mejoras desde el 3.08 % (Praveenkumar & Sankarasubramanian, 2019) hasta un 27.53 % según el estudio de (Sounthararajan et al., 2019) con adición del 10 % de SCBA, menores % no se ha determinado con facilidad. Respecto a la resistencia a la tracción se ha detectado varios resultados en base a los antecedentes internacionales: Se identificó mejoras en la resistencia del concreto en un rango entre 4.18 – 6.70 % (Bayapureddy et al., 2020; Sounthararajan et al., 2019). Estos resultados contrastan en gran manera con los investigadores (Praveenkumar & Sankarasubramanian, 2019), quienes mejoraron la resistencia a la tracción con adiciones de 5 y 10 % desde un 12.93 % hasta 25.17 % respectivamente, porque añadieron un superplastificante en dosificación 10 l/m³ de concreto.

Conforme aumente el nivel de adición de CCA, las propiedades mecánicas del concreto disminuirán (Aswin et al., 2021; Bagcal & Baccay, 2019; Singh et al., 2018), es por ello que no es recomendable usar las CCA en construcciones donde se requieran concreto con altos niveles de resistencia (Sangeetha et al., 2020), no obstante, la adición de 10 % de CCA, con el 20 % de adición de escoria de acero como sustituto del agregado fino (Rushendramani et al., 2014), asimismo la adición de 0.4 % fibras de polipropileno con 15 % de CCA, mejoran significativamente las propiedades mecánicas del concreto (Murthi et al., 2020).

Los estudios que se realizan al concreto para observar su comportamiento son comúnmente las macroestructurales, se debe realizar un análisis más profundo: sus características microestructurales, a partir de esto se puede explicar el argumento que explica la influencia en las propiedades mecánicas del concreto convencional. Por consiguiente, se tiene al ensayo de difracción de rayos X (DFRX), la cual consiste en llevar la muestra a un interfaz de rayos x (Wu et al., 2022) donde se analiza la composición química de las cenizas y a la vez del concreto endurecido, dando como resultado los porcentajes de la estructura química, así mismo nos ayuda a identificar la geometría tridimensional de los cristales, es por ello que esta técnica se ha vuelto de vital importancia para las diferentes áreas de estudio (Hu et al., 2020).

Así mismo, tenemos el análisis TGA, que observa la degradación térmica de la muestra del concreto endurecido experimental evaluado a diferentes temperaturas, dando como resultado la temperatura donde se pierde el peso de la muestra, además con este dato se podrá incinerar el residuo agrícola, para su empleo eficaz en la fabricación del concreto (Hakeem, Amin, et al., 2022). El ensayo de FTIR, se emplea para poder caracterizar los compuestos mediante los grupos de átomos para identificar grupos orgánicos (Hu et al., 2021), comprende la estructura de las moléculas individuales y grupales, permitiendo observar el estado bioquímico de la muestra, también provee un espectro de observación de infrarrojo la cual proporciona información de la estructura y concentración molecular.

2.1. Justificación de la investigación

2.1.1. Justificación técnica:

Con referente a lo técnico se establecerá la proporción óptima de sustitución parcial del cemento por cenizas de subproductos del sector agroindustrial que aseguren mejoras en el concreto convencional de uso estructural: a) RHA, b) CCM, c) SCBA, mediante los ensayos de resistencia mecánica y a partir del análisis estadístico inferencial sobre las observaciones a los 28 días de las propiedades mecánicas y una evaluación comparativa de las características de la microestructura del concreto convencional patrón versus la muestra experimental con el porcentaje que genera mayor significancia en su variación. Los procesos corresponden al cumplimiento de ensayos estándar y normalizados nacionales (NTP) e internacionales (ASTM).

2.1.2. Justificación ambiental:

Correspondiente a lo ambiental se reducirá la emisión de CO₂ producida por la elaboración de cemento y la quema descontrolada de residuos agrícolas. Según (Oikonomou, 2005) la industria de la construcción es responsable de usar el 50 % en bruto de materiales naturales, consumir el 40 % del total de la energía y generar el 50 % de desperdicio en comparación a otras industrias.

2.2. Limitaciones de la investigación

2.2.1. Espacial

Respecto a la influencia sobre la microestructura del concreto, se tiene escasa cantidad de información bibliográfica sobre el tema en estudio a nivel nacional e internacional.

2.2.2. Ensayos

El costo de ensayar la microestructura para cada % de experimentación por ceniza es una limitante, es por ello, que en base a los resultados del análisis estadístico de los resultados de las propiedades mecánicas se obtendrá el % óptimo de variación más significativa respecto al patrón, y es con la muestra de este concreto con el que se realizará las pruebas que corresponden a la microestructura del concreto experimental representativo comparado con la muestra patrón, sin adiciones.

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis General

- La adición de ceniza de subproductos agroindustriales (CSA) como sustituto parcial del cemento influye significativa y positivamente sobre las propiedades mecánicas y mejora las características microestructurales del concreto, Ica-2024.

2.3.2. Hipótesis Específicas

- La adición experimental de 4 %, 6 %, 8 % y 10 % de las CSA: RHA SCBA y CCA como sustituto parcial del cemento, que define el % óptimo de variación, se influye significativamente en las propiedades mecánicas del concreto modificado respecto al patrón de diseño $f'c$ 210 kg/cm², Ica-2024.

-Mediante la evaluación comparativa de las características microestructurales del concreto modificado con el % óptimo de RHA, SCBA y CCA, se determina la mejora sobre el concreto patrón de diseño $f'c$ 210 kg/cm², Ica-2024.

2.4. Términos que enmarcan conceptualmente la investigación

las variables, dimensiones e indicadores considerados en el estudio de la sustitución parcial del cemento por cenizas de subproductos agroindustriales en la mezcla de concreto.

Temperatura de calcinación (°C):

Proceso en el cual el material es sometido a temperaturas elevadas, a fin de eliminar las impurezas que este posee, asimismo generar su descomposición química (Rithuparna et al., 2021).

Tiempo de combustión (h):

Es una magnitud referida a la duración que estará sometida un material a temperaturas elevadas, provocando su descomposición y alteración en sus propiedades físicas y químicas (Hakeem, Amin, et al., 2022).

Molienda (gr):

Proceso en el cual se reduce la dimensiones de las partículas de un material, hasta alcanzar la finura requerida (Y. Li et al., 2022).

Densidad (g/cm³):

(ASTM C 188-95) es una característica física de la materia, la cual se encuentra establecida por la correlación entre la masa y el volumen ocupado (Adhikary et al., 2022).

Finura (m²/kg):

(ASTM C 204-55) es un elemento que nos permite verificar que tan fino o grueso es el material analizado (Syahida Adnan et al., 2021).

Tamaño promedio (μm):

Es la caracterización morfológica de un material, permite obtener información acerca de la forma externa de un elemento (Asfaw et al., 2022).

Variación de masa (%):

Representación del porcentaje de pérdida de masa, en relación con la temperatura y tiempo de combustión que es sometida la muestra (Nasir Amin et al., 2022).

Composición química (%):

Están conformados por la unión de los elementos químicos que se encuentran dentro de un material específico (Raheem & Ikotun, 2020).

Degradación térmica ($^{\circ}\text{C}$):

Es la descomposición térmica de la muestra, cuando ésta es sometida a diferentes grados de temperatura (Gedefaw et al., 2022).

Resistencia a la compresión (kg/cm^2):

Es una de las resistencias más experimentada donde se estudia el comportamiento del concreto, ante ser sometido a una fuerza externa y saber su resistencia (Montero Flores, 2019).



Figura 1: Ensayo de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas.

Nota. Imagen extraída de la publicación de (Aguirre-Braggiant et al., 2021). Resistencia a la tracción indirecta (kg/cm^2): Prueba realizada por probetas cilíndricas en forma horizontal (Agwa et al., 2020).

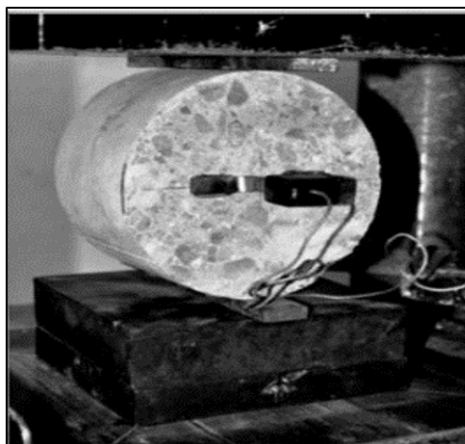


Figura 2: Representación del ensayo de tracción indirecta.

Nota. Imagen extraída de la publicación de (AIRE & AGUADO, 2013) Resistencia a la flexión (kg/cm^2): Prueba donde se podrá observar el comportamiento de una viga o losa sin reforzamiento (Quedou et al., 2021).

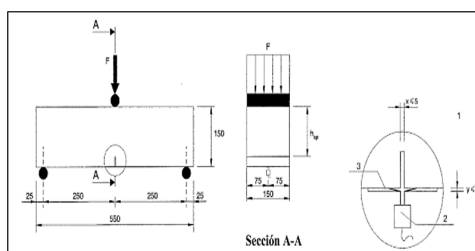


Figura 3: Ensayo de Flexión sobre Probetas Prismáticas de Sección 15x15cm.

Nota. Imagen extraída de la publicación de (Aire & Aguado, 2013) Módulo de elasticidad (kg/cm^2): Ensayo donde se demostrará la deformación elástica del concreto (Mounika et al., 2022).



Figura 4: Ensayo del Módulo de Elasticidad Sobre Probetas Cilíndricas.

Nota. Imagen extraída de la publicación de (Carrillo & Silva-Páramo, 2016)

Variación de las propiedades mecánicas:

Proceso por el cual se realiza la comparación a través del concreto patrón (grupo control) y el concreto con adición de materiales cementantes alternativos (grupo experimental), la cual serán evaluados mediante la aplicación de diferentes ensayos.

Transmitancia (%) (enlaces químicos y vibraciones):

Permite reconocer el modo en que se conecta de los distintos átomos que forman una molécula (Zunino & Lopez, 2017).

Textura (μm):

Muestran la caracterización de las partículas, en relación con su porosidad y rugosidad (Dineshkumar & Balamugan, 2021).

Intensidad de ondas (μm):

Se genera cuando la muestra es sometida a un haz electrónico y en cada punto de ellos emite electrones que son captados por una pantalla, la cual se refleja en un gráfico con las intensidades que proporciona cada una de ellas, mientras más altas sean estas ondas más electrones secundarios se obtienen (Nasir Amin et al., 2022).

3. Metodología

3.1. Tipo de Investigación

Este presente estudio es de tipo aplicada, ya que tiene como objetivo generar conocimientos con aplicación directa a los problemas de la sociedad. No se trata simplemente de comprender los fenómenos de manera abstracta, sino de proponer soluciones concretas y efectivas basadas en evidencia empírica.

De acuerdo con su enfoque, la investigación es cuantitativo ya que se centra en la medición y el análisis de variables numéricas. Utiliza métodos estadísticos para analizar los datos y establecer patrones o relaciones entre las variables.

El método utilizado en esta investigación es experimental, ya que implica modificar variables independientes para observar sus efectos en variables dependientes, generalmente en entornos controlados.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

La población de este estudio incluye todas las posibles mezclas de concreto modificadas con diferentes porcentajes de CSA cáscara de arroz (RHA), bagazo de caña (SCBA) y mazorca de maíz (CCA) que representa el conjunto de 390 especímenes de ensayos organizados. lo indicado por la norma técnica peruana de estructuras E-060 v.2018, acápite 5.3.3.2.

3.2.2. Muestra

Se aplicó la metodología de extracción de muestras de concreto y cenizas agroindustriales, asegurando que las pruebas y análisis posteriores sean representativos y fiables La muestra seleccionada para este estudio incluye 52.

3.3. Operacionalización de variables

La matriz de operacionalización de variables resume de forma tabular, la definición conceptual y operacional de ambas, así como establece las dimensiones con las que se mide las variables de la investigación. Las dimensiones requieren de indicadores bien definidos y con unidades establecidas para medir dichas dimensiones, las cuales, se obtuvieron a partir de la revisión del estado de arte de la documentación científica consultada.

3.3.1. Variable independiente:

VI: Ceniza de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento.

3.3.2. Variable dependiente:

VD: Propiedades mecánicas del concreto modificado.

Tabla 2: Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Dimensiones	Indicadores
VI: Independiente Ceniza de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento	Dosificación de la sustitución de las cenizas subproductos agroindustriales	1. Diseño de mezcla del concreto patrón. 2. RHA: 4 %, 6 %, 8 % y 10 % del $W_{cemento}$ 3. SCBA: 4 %, 6 %, 8 % y 10 % del $W_{cemento}$ 4. CCA: 4 %, 6 %, 8 % y 10 % del $W_{cemento}$
VD: Dependiente Propiedades mecánicas y microestructurales del concreto.	Propiedades mecánicas del concreto con sustitución parcial del cemento por cenizas	5. $f'c$ (kg/cm ²) 6. MR (kg/cm ²) 7. Ftí (kg/cm ²) 8. E (kg/cm ²)
	Características microestructurales del concreto con él % de sustitución óptima de ceniza	FTIR 9. Transmitancia (%) SEM 10. Tamaño promedio (µm) 11. Textura (µm) 12. Composición química (%) 13. Intensidad de ondas (µm) Ensayo termogravimétrico (TGA) 14. Variación de masa (%) 15. Degradación térmica (°C)

3.4. Definiciones de los indicadores de la variable dependiente

3.4.1. Resistencia a la Compresión ($f'c$):

Medida de la capacidad del concreto para resistir cargas de compresión, determinada según la norma NTP.339.034 y NTP.339.078. Los especímenes fueron cilindros de dimensiones estándar y se sometieron a una prueba de compresión después de un período de curado 28 días.

3.4.2. Resistencia a la Tracción Indirecta (*fti*):

Capacidad del concreto para resistir fuerzas de tracción, evaluada según la norma ASTM C-496. Se utilizaron cilindros de concreto que fueron sometidos a una prueba de tracción indirecta para medir la resistencia a la ruptura por tracción indirecta.

3.4.3. Módulo de Elasticidad (*E*):

Indicador de la rigidez del concreto, determinado mediante ensayos de compresión axial en cilindros según la norma ASTM C-469.

3.4.4. Módulo de Ruptura (*MR*):

Medida de la resistencia a la flexión del concreto, determinada mediante la norma NTP.339.035 y ASTM C-143. Se utilizaron vigas de concreto que fueron sometidas a una prueba de flexión para medir la resistencia a la ruptura por flexión. Los ensayos microestructurales que incluyen análisis FTIR, SEM y TGA es para determinar transmitancia, tamaño de partícula, textura, composición química, intensidad de ondas, variación de masa y degradación térmica para profundizar en el análisis del concreto modificado a partir de la intervención de las cenizas

3.5. Instrumentos

Se emplearon dos técnicas principales: la observación y el análisis documental. Como se muestra en la tabla 3 Para la técnica de observación, se utilizó una guía de observación como instrumento, permitiendo una recopilación estructurada de datos observacionales. En cuanto al análisis documental, se empleó una matriz de categoría, facilitando la categorización y análisis sistemático de la información documental recopilada. Estos instrumentos fueron esenciales para obtener datos precisos y estructurados, asegurando la validez y fiabilidad de los resultados de la investigación.

Tabla 3: Resumen de las técnicas e Instrumentos en la Investigación.

Técnica	Instrumento
Observación	Guía de observación
Análisis documental	Matriz de categoría

La Tabla 4 proporciona un listado de las normas y pruebas técnicas que se utilizaron en la investigación para evaluar las propiedades de los agregados y las propiedades mecánicas del concreto. Las pruebas abarcan desde el peso específico y absorción, ensayos granulométricos, peso unitario suelto y compactado, proporción que pasa por la malla #200, hasta pruebas específicas del concreto como la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Se especifican tanto las normas NTP como las normas ASTM correspondientes para cada prueba, asegurando así la consistencia y validez de los procedimientos y resultados obtenidos en el estudio.

Tabla 4: Resumen de las técnicas e Instrumentos en la Investigación.

Ensayo	Norma NTP	Norma ASTM
	Propiedades de los agregados	
Peso Específico y Absorción	NTP.400.021	ASTM C-127
Ensayo granulométrico	NTP.400.012	ASTM C-136
Peso Unitario Suelto y Compactado	NTP.400.017	ASTM C-29
Pasa por la malla #200	NTP.400.018	ASTM C-117
Peso Específico y Absorción	NTP.400.022	ASTM C-128
Prueba de slump	NTP.339.035	ASTM C-143
Propiedades mecánicas del concreto		
Resistencia a la tracción indirecta	-	ASTM C-496
Módulo de elasticidad	-	ASTM C-469
Resistencia a la compresión	NTP.339.034	-
Resistencia a la flexión	NTP.339.078	-

Primero, se enumeran los análisis inherentes a los agregados como parte del diseño de la mezcla. Esto abarca la determinación de las características físicas de los agregados, tales como su distribución granulométrica, peso específico, absorción de agua y contenido de impurezas. Estos datos son esenciales para establecer las proporciones correctas de los componentes de la mezcla de concreto.

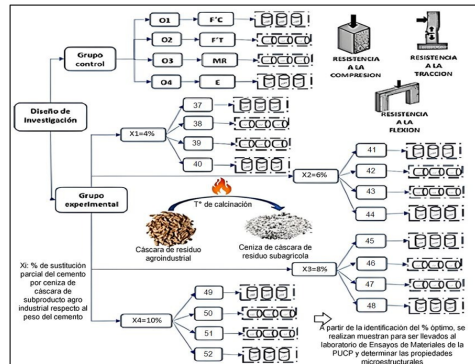


Figura 5: Proceso y Diseño Experimental de la Investigación.

3.6. Procedimientos

Se realizó en cuatro fases:

Fase 1:

Corresponde a la obtención del residuo, su calcinación a temperaturas entre 600 y 800°C, durante 5 horas en un horno tipo mufla, lo cual también implica obtener la composición química para verificar si la suma de los principales óxidos puzolánicos supera el 70% en cumplimiento de la norma ASTM C618.

Fase 2:

Corresponde al estudio de canteras de los distritos de Chincha, Ica y Nazca para determinar el agregado grueso más resistente al ensayo a la abrasión. Luego se realiza el ensayo de los agregados para confirmar si su granulometría está dentro de los husos que establece el método ACI y posterior a ello definir la dosificación en peso del diseño patrón para una resistencia de diseño $f'c$ 210 kg/cm².

Fase 3:

Corresponde a la experimentación de la adición de ceniza que servirá de sustituto parcial del cemento en proporciones de 4%, 6%, 8% y 10%, de tal forma se pueda evaluar la influencia sobre las propiedades mecánicas del concreto, determinar el % óptimo mediante un análisis estadístico inferencial.

Fase 4: Corresponde a evaluar la variación de las características microestructurales de las observaciones a los 28 días del concreto experimental con el porcentaje óptimo versus los resultados de la muestra patrón del concreto convencional diseñado.

Para mayor detalle de las probetas que conforma la población, la Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7, detallan las cantidades para cada ensayo y los días en la que se realiza la observación, de la RHA, SCBA y CCA, respectivamente.

Tabla 5: Cantidad de Muestras por Ensayo y Tipo de Ceniza.

Ceniza	F'c	Fti	MR	E
Patrón	10	8	8	4
RHA	40	32	32	16
SCBA	40	32	32	16
CCA	40	32	32	16
Total	130	104	104	52

Nota: Se presenta la cantidad de muestras utilizadas para diferentes ensayos de concreto que corresponde a la población objetivo. Se incluyen las muestras del concreto patrón sin adición y con adición de 4, 6, 8 y 10 % respectivamente para cada ceniza. Los ensayos realizados son resistencia a la compresión (F'c), resistencia a la tracción indirecta (Fti), módulo de rotura (MR) y módulo de elasticidad (E).

Tabla 6: Detalle de los Ensayos Por Realizarse Para el Concreto con % RHA.

% RHA	Días	F'c	Fti	MR	E
4 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
6 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
8 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
10 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
	Total	40	32	32	16

Nota: Se detalla los ensayos realizados en concreto con diferentes porcentajes de RHA a los 7, 14 y 28 días. Se evaluaron cada una de las propiedades mecánicas que dimensionan la variable dependiente, cuyos totales alimentan la Tabla 8. En el caso de la medición de la tracción y flexión solo se ha considerado observaciones a los 7 y 28 días, la primera para evaluar la ganancia temprana que obtiene el concreto modificado con esta ceniza y a los 28 días para ser analizados con fines de contrastación de hipótesis y discusión con otros investigadores. En el caso del E, es suficiente analizarlo con observaciones a los 28 días.

Tabla 7: Detalle de los ensayos a realizarse para el concreto con % SCBA.

% SCBA	Días	F'c	Fti	MR	E
4 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
6 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
8 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
10 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
	Total	40	32	32	16

Nota. Se detalla los ensayos realizados en concreto con diferentes porcentajes de SCBA a los 7, 14 y 28 días de curado. Se evaluaron cada una de las propiedades mecánicas que dimensionan la variable dependiente, cuyos totales alimentan la 8. En el caso de la medición de la tracción y flexión solo se ha considerado observaciones a los 7 y 28 días, la primera para evaluar la ganancia temprana de la resistencia que obtiene el concreto modificado con esta ceniza y a los 28 días para ser analizados con fines de contrastación de hipótesis. En el caso del E, es suficiente analizarlo con observaciones a los 28 días.

Tabla 8: Detalle de los ensayos a realizarse para el concreto con % CCA.

% CCA	Días	F'c	Fti	MR	E
4 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
6 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
8 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
10 %	7 d	3	4	4	-
	14 d	3	-	-	-
	28 d	4	4	4	4
		40	32	32	16

Nota. Se detalla los ensayos realizados en concreto con diferentes porcentajes de CCA a los 7, 14 y 28 días de curado. Se evaluaron cada una de las propiedades mecánicas que dimensionan la variable dependiente, cuyos totales alimentan la Tabla 8. En el caso de la medición de la tracción y flexión solo se ha considerado observaciones a los 7 y 28 días, la primera para evaluar la ganancia temprana de la resistencia que obtiene el concreto modificado con esta ceniza y a los 28 días para ser analizados con fines de contrastación de hipótesis. En el caso del E, es suficiente analizarlo con observaciones a los 28 días.

Tabla 9: Resumen de la muestra para el análisis de datos que contrasta hipótesis.

%	Material	f'c	fti	MR	E
0 %	Sin ceniza	4	4	4	4
4 %	RHA	4	4	4	4
	SCBA	4	4	4	4
	CCA	4	4	4	4
6 %	RHA	4	4	4	4
	SCBA	4	4	4	4
	CCA	4	4	4	4
8 %	RHA	4	4	4	4
	SCBA	4	4	4	4
	CCA	4	4	4	4
10 %	RHA	4	4	4	4
	SCBA	4	4	4	4
	CCA	4	4	4	4
	Total	52	52	52	52

Nota. La tabla representa la muestra representativa de la población objetivo para la contratación de la hipótesis, de las observaciones a los 28 días para cada uno de los ensayos a evaluar, con el fin de realizar posteriormente el análisis estadístico inferencial para cada ceniza respectivamente a la propiedad mecánica de estudio.

Tabla 10: N° Estándar para toda Ceniza de la Muestra para el Análisis de Datos.

%	f'c	fti	MR	E	E
0 %	4	4	4	4	4
4 %	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4
	4	4	4	4	4
10 %	4	4	4	4	4

Nota. Se muestra en la tabla que para cada una de las cenizas de residuos agroindustriales la muestra con la que se realizará el análisis estadístico para la contratación de hipótesis es de 20, la cual se realizará para los resultados de cada una de las propiedades mecánicas estudiadas.

La elección de 4 muestras por grupo es una práctica común que proporciona un balance entre precisión y recursos disponibles (Sampieri & Mendoza, 2018). Esta cantidad fue suficiente para realizar análisis estadísticos básicos como el ANOVA, que puede ayudar a determinar si hay diferencias significativas entre los grupos de sustitución. La cantidad de muestras por grupo identificó la variabilidad inherente en las propiedades del concreto, proporcionando una visión más precisa de cómo las cenizas afectan las propiedades mecánicas; al tener múltiples muestras, se puede evaluar la repetibilidad de los resultados dentro de cada grupo de sustitución, identificar tendencias, como un posible incremento o disminución de las propiedades mecánicas con el aumento del porcentaje de sustitución. A partir del análisis de los datos, se puede identificar qué porcentaje de sustitución proporciona una mejora óptima en las propiedades del concreto.

Después de realizar los ensayos mecánicos para cada % de cada una de las cenizas a ensayar, se determinó el % óptimo de cada subproducto agroindustrial, para cada uno de estos se realizará los ensayos de las características microestructurales del concreto endurecido con él % significativo de sustitución, donde finalmente se comparó las características del patrón con los de cada una de las muestras de concreto modificado con cada una de las cenizas investigadas, a partir de estos resultados se puede establecer una interpretación, análisis y discusión de los resultados contrastados entre sí.

La tabla 11 detalla las muestras y los ensayos realizados para analizar la microestructura del concreto utilizando RHA, SCBA y CCA, en comparación con un patrón de referencia. Se realizaron ensayos de difracción de rayos X (XRD) para evaluar la cristalización de las partículas del material, análisis de espectroscopía infrarroja (FTIR) para determinar los enlaces químicos y las vibraciones, análisis termogravimétrico diferencial (TGA) para evaluar la temperatura que pueden alcanzar sin modificar sus propiedades, y microscopía de barrido (SEM) para determinar el tamaño promedio de las partículas. Estos ensayos proporcionan información crucial sobre las características microestructurales de los materiales en el concreto.

Tabla 11: Detalle de las muestras y ensayos para la microestructura del concreto.

Indicador	Ensayo	Patrón	RHA	SCBA	CCA
Intensidad (cuentas)	XRD	1	1	1	1
Transmisibilidad (%) Enlaces químicos y vibraciones en los enlaces	FTIR	1	1	1	1
T° que puede alcanzar sin modificar propiedades	TGA	1	1	1	1
Tamaño promedio (µm)	SEM	1	1	1	1

3.7. Análisis de datos

En la investigación se aplicó el análisis de datos mediante la estadística inferencial para los resultados de cada una de las propiedades mecánicas, según la Tabla 8, de observaciones a los 28 días, debido que se cuenta con la suficiente información para realizar un análisis de varianza con el apoyo de la herramienta SPSS (licencia institucional en UPSJB).

Al respecto, sobre el diseño del experimento involucrará múltiples factores (tipos de cenizas) y múltiples niveles (porcentajes de sustitución). Este tipo de diseño se llama diseño factorial. El modelo estadístico para un diseño factorial con dos factores (tipo de ceniza y porcentaje de sustitución) se puede escribir como:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} es la respuesta (p. ej., resistencia a la compresión) en el kkk -ésimo ensayo del iii -ésimo nivel del primer factor (tipo de ceniza) y el jjj -ésimo nivel del segundo factor (porcentaje de sustitución).
- μ es la media general.
- α_i es el efecto del jjj -ésimo nivel del factor tipo de ceniza.
- β_j es el efecto del jjj -ésimo nivel del factor porcentaje de sustitución.
- $(\alpha\beta)_{ij}$ es la interacción entre el iii -ésimo nivel del primer factor y el jjj -ésimo nivel del segundo factor.

- $\epsilon_{ijk}/\epsilon_{\text{epsilon}}_{ijk}$ es el error aleatorio asociado con la observación ijk .

Factor 1: Tipo de Ceniza

Ceniza de cáscara de arroz (RHA)

Ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA)

Ceniza de mazorca de maíz (CSA)

Control (sin ceniza)

Factor 2: Porcentaje de Sustitución

4 %

6 %

8 %

10 %

Control (0 %)

Para los resultados referente a las características microestructurales del concreto endurecido, se realizó un análisis mediante la evaluación comparativa de los resultados del concreto patrón versus el análisis de la muestra del concreto con el mejor % que genere mayor significancia positiva.

4. Resultados

Los resultados de la investigación muestran el cumplimiento de los objetivos específicos. Se presenta a continuación el proceso del desarrollo de la recolección de datos para la investigación.

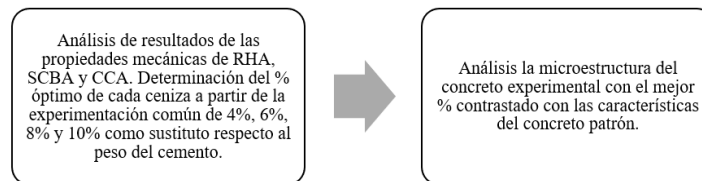


Figura 6: Desarrollo de Presentación de Resultados de la Investigación.

Nota. El proceso ilustra cada uno de los objetivos específicos de la investigación.

4.1. Resultados del objetivo específico 1:

4.1.1. Características de las cenizas de residuos experimentados.

En la tabla 12 se observa que todas las cenizas cumplen con el requisito de tener más del 70 % de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 combinados, lo que indica una alta actividad puzolánica. RHA presenta el valor más alto (87.10 %), seguido de SCBA (77.50 %) y CCA (70.08 %). En cuanto al contenido de SO_3 , todas las cenizas cumplen con el límite de menos del 4 %, con valores más bajos en SCBA (1.08 %) y CCA (0.95 %), lo que es favorable para minimizar la expansión y mejorar la durabilidad del concreto.

Tabla 12: Características Químicas de la Ceniza de Residuos Agroindustriales.

Indicador	Norma	RHA	SCBA	CCA
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70 %	87.10 %	77.50 %	70.08 %
SO_3	<4 %	1.68 %	1.08 %	0.95 %
CaO	<2 %	1.97 %	1.03 %	0.85 %
$\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$	[0.5 – 0.8] %	0.77 %	0.51 %	0.63 %
Contenido humedad	<3 %	1.55	0.38	1.75

Nota. Resultados expresados en óxidos de una muestra de 100 g calculados del análisis elemental por espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva con el equipo Espectrómetro Shimadzu EDX-800HS, de acuerdo con la norma ASTM C25.

El contenido de CaO en todas las cenizas es inferior al 2 %, cumpliendo así con los requisitos de la norma ASTM C618. Sin embargo, el contenido de $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ es ligeramente superior al rango recomendado en RHA (0.77 %), lo que podría influir en la durabilidad a largo plazo debido a posibles reacciones álcali-agregado. El contenido de humedad de las cenizas es inferior al 3 %, siendo SCBA la que presenta el valor más bajo (0.38 %), lo cual es positivo para su almacenamiento y manipulación. Los resultados aseguran idoneidad como materiales puzolánicos de todas las cenizas, aunque se debe considerar el contenido de álcalis en RHA para aplicaciones específicas.

La tabla 13 muestra que todas las cenizas evaluadas cumplieron con las especificaciones de finura, con retenciones en malla #325 inferiores al 34 %. Las cenizas indican una adecuada finura para su uso como material puzolánico. En cuanto a la densidad específica, se observó que la RHA tuvo el valor más bajo (2.23 g/cm^3), seguido por SCBA (2.50 g/cm^3) y CCA (2.65 g/cm^3). Estos valores sugieren que, a pesar de que presentan densidades inferiores a las del cemento Portland tipo I, son adecuadas para la inclusión en mezclas de concreto.

Tabla 13: Características Físicas de la Ceniza de Residuos Agroindustriales.

Indicador	Norma	RHA	SCBA	CCA
Finura (retención en malla #325)	<34 %	30.41	32.15	33.85
Densidad específica	3.12 g/cm^3	2.23	2.5	2.65
Densidad aparente suelta (g/cm^3)	–	0.44	0.38	0.41
Índice de actividad puzolánica 28 días	>75 %	84	78	76.5

Nota. Los resultados fueron obtenidos utilizando equipos específicos y ensayos estandarizados. La finura se determinó mediante el ensayo de retención en malla #325 siguiendo la norma ASTM C430. La densidad específica se midió con un picnómetro de gas helio conforme a ASTM D5550. La densidad aparente suelta se evaluó utilizando un cilindro graduado y un vibrador de laboratorio según ASTM C29/C29M. El índice de actividad puzolánica a 28 días se determinó mediante el ensayo de resistencia a la compresión de morteros con sustitución parcial de cemento, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C618.

En términos de densidad aparente suelta, la ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) mostró el valor más bajo (0.38 g/cm^3), seguido por la ceniza de cáscara de arroz (CCA) (0.41 g/cm^3) y la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) (0.44 g/cm^3), lo que refleja la variabilidad en la porosidad y compactibilidad de estos materiales. La baja densidad aparente de la SCBA y la CCA indica que tienen una estructura más porosa y ligera en comparación con la RHA, lo cual puede influir en su desempeño y trabajabilidad cuando se utilizan como adiciones en mezclas de concreto. El índice de actividad puzolánica a 28 días fue superior al 75 % para todas las cenizas, destacándose la RHA con un valor de 84.00 %, lo que confirma su alta reactividad y gran potencial como sustituto parcial del cemento Portland. Este alto índice de actividad puzolánica se debe a la composición química y la finura de la RHA, que le confieren una mayor capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento y formar compuestos cementantes adicionales. La SCBA y la CCA también mostraron una buena actividad puzolánica, con valores de 78.00 % y 76.50 %, respectivamente, lo que indica que todas estas cenizas pueden ser adicionadas como materiales cementantes suplementarios en la producción de concreto, contribuyendo a mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Además, el uso de estos subproductos agroindustriales como adiciones al cemento puede representar beneficios ambientales al reducir el consumo de cemento Portland y fomentar la economía circular.

4.2. Análisis de las propiedades mecánicas por tipo de ceniza

Respecto a la f_c :

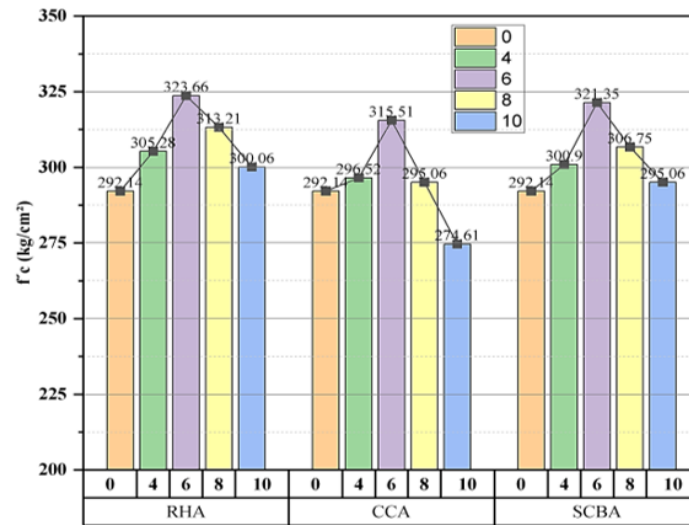


Figura 7: Resistencia a la compresión sin ceniza y con RHA, CCA y SCBA.

Nota. Los valores son el resultado del valor promedio de unidades de ensayo.

Se observa que la sustitución de cemento por RHA en un 6% produjo el mayor incremento en la resistencia a la compresión, alcanzando 323.66 kg/cm², lo que representa una variación del 10.79% respecto al patrón (292.14 kg/cm²). Otros porcentajes de RHA también mejoraron la resistencia a la compresión en comparación con el patrón, pero en menor medida, destacando que el 4% y el 8% lograron incrementos del 4.50% y 7.21% respectivamente. Sin embargo, al 10% la mejora fue menos significativa, con un aumento de solo 2.71%.

En el caso de la CCA, la mejor resistencia se obtuvo con una sustitución del 6%, alcanzando 315.51 kg/cm², un incremento del 8% respecto al patrón. Las otras proporciones de CCA mostraron variaciones menores, con el 4% y el 8% produciendo aumentos del 1.50% y 1% respectivamente, y una disminución significativa del 6% al 10% (-6.00%). Para la SCBA, la sustitución al 6% también mostró el mejor rendimiento, con 321.35 kg/cm², un incremento del 10% respecto al patrón. Las proporciones del 4% y 8% mejoraron la resistencia en un 3% y 5% respectivamente, mientras que al 10% la mejora fue marginal, con un incremento del 1%. Estos resultados indican que la sustitución óptima del cemento por estas cenizas varía, siendo el 6% el porcentaje con el potencial significativo de representar la mejor adición.

Respecto al f_{ti} :

La resistencia a la tracción indirecta del concreto se evaluó mediante el ensayo de compresión diametral, también conocido como ensayo brasileño, siguiendo la norma ASTM C496/C496M. Este ensayo se realizó utilizando una máquina de compresión hidráulica equipada con placas de acero, aplicando una carga diametralmente opuesta sobre cilindros de concreto hasta la fractura. Este método permite determinar la resistencia a la tracción del concreto de manera indirecta, proporcionando información crucial sobre su capacidad para resistir esfuerzos de tracción.

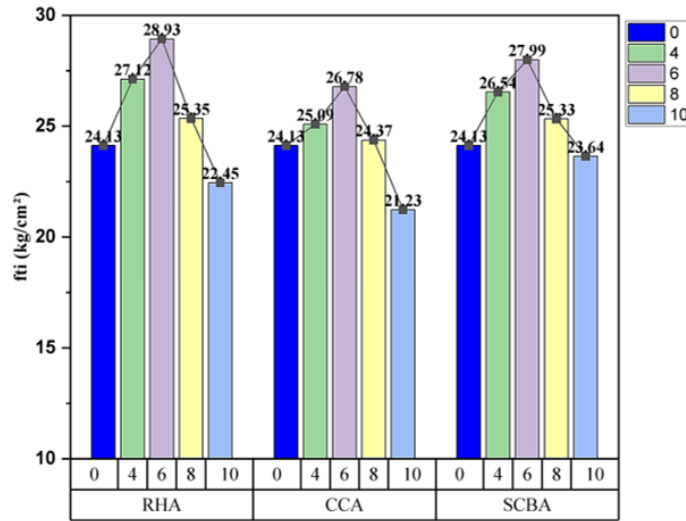


Figura 8: Resistencia a la Tracción Indirecta sin Ceniza y con RHA, CCA y SCBA.

Nota. Los valores son el resultado del valor promedio de unidades de ensayo.

Se observó que la sustitución de cemento por RHA al 6% resultó en el mayor incremento de resistencia a la tracción indirecta, alcanzando 28.93 kg/cm², lo que representa una mejora significativa respecto al patrón (24.13 kg/cm²). Otros porcentajes de RHA también mejoraron la resistencia, con el 4% y 8% logrando aumentos a 27.12 kg/cm² y 25.35 kg/cm² respectivamente, mientras que al 10% la resistencia disminuyó a 23.45 kg/cm².

Para la CCA, la mejor resistencia fue con el 6%, alcanzando 26.78 kg/cm², un incremento notable respecto al patrón. Sin embargo, la variación al 4% y 8% mostró resultados menos consistentes, con valores de 25.09 kg/cm² y 24.37 kg/cm² respectivamente, y una disminución significativa al 10% con 21.23 kg/cm². En el caso de la SCBA, la sustitución al 6% también mostró el mejor rendimiento con 27.99 kg/cm². Las proporciones del 4% y 8% aumentaron la resistencia a 26.54 kg/cm² y 25.33 kg/cm² respectivamente, mientras que al 10% la resistencia disminuyó a 23.64 kg/cm². Estos resultados indican que una sustitución del 6% de cemento por estas cenizas es óptima para mejorar la resistencia a la tracción indirecta del concreto, aunque el comportamiento varía según el tipo de ceniza utilizada.

Respecto al MR:

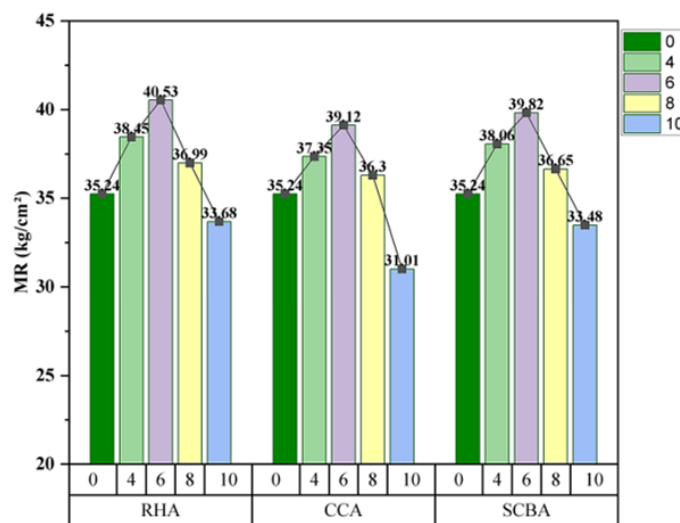


Figura 9: Resistencia a la Flexión Comparativa de RHA, CCA y SCBA.

Nota. Se evaluó mediante el ensayo de flexión en tres puntos, siguiendo la norma ASTM C78/C78M. Este ensayo se realizó utilizando una máquina de ensayo universal equipada con un dispositivo de flexión, donde se aplicó una carga central sobre vigas de concreto simplemente apoyadas hasta su fractura.

Se observó que la sustitución de cemento por RHA al 6% resultó en el mayor incremento de resistencia a la flexión, alcanzando 40.53 kg/cm², lo que representa una mejora significativa respecto al patrón (35.24 kg/cm²). Otros porcentajes de RHA también mejoraron la resistencia, con el 4% y 8% logrando incrementos a 38.45 kg/cm² y 36.99 kg/cm² respectivamente, mientras que al 10% la resistencia disminuyó a 33.68 kg/cm².

La evaluación del efecto de las cenizas (RHA, CCA y SCBA) sobre el MR del concreto, considerando tanto los valores absolutos como las variaciones porcentuales respecto al patrón (0%), revela un comportamiento consistente. El MR inicial es de 35.24 y aumenta significativamente con la adición de cenizas hasta alcanzar su máximo al 6.00% de sustitución: 40.53 para RHA ($\Delta = 15\%$), 39.12 para CCA ($\Delta = 11\%$) y 39.82 para SCBA ($\Delta = 13\%$). Este incremento indica que las cenizas mejoran la resistencia del concreto hasta este punto. Sin embargo, al aumentar la proporción de cenizas más allá del 6.00%, el MR disminuye, sugiriendo una debilitación de la matriz del concreto. Al 10.00% de sustitución, las reducciones son significativas: -4.43% para RHA, -12.00% para CCA, y -5.00% para SCBA respecto al patrón. Entre las tres cenizas, la SCBA muestra un rendimiento ligeramente superior, seguida por la RHA y luego la CCA.

Respecto al E:

Enfoque previo desde la norma E-060.

La elasticidad del concreto es una medida clave de su rigidez y capacidad para deformarse bajo cargas aplicadas, necesaria para el diseño estructural. Según la norma peruana E-060, la fórmula empírica $E = 15000(f'c)^{1/2}$ proporciona el valor de E en función de la resistencia a la compresión especificada ($f'c$), en el caso de un concreto de 210 kg/cm², el E teórico es de 217,370.65 kg/cm². En todos los estudios revisados y referidos en esta investigación, se observó que los valores superan consistentemente el módulo de elasticidad teórico, destacando el potencial de estas cenizas para mejorar la rigidez y comportamiento mecánico del concreto convencional.

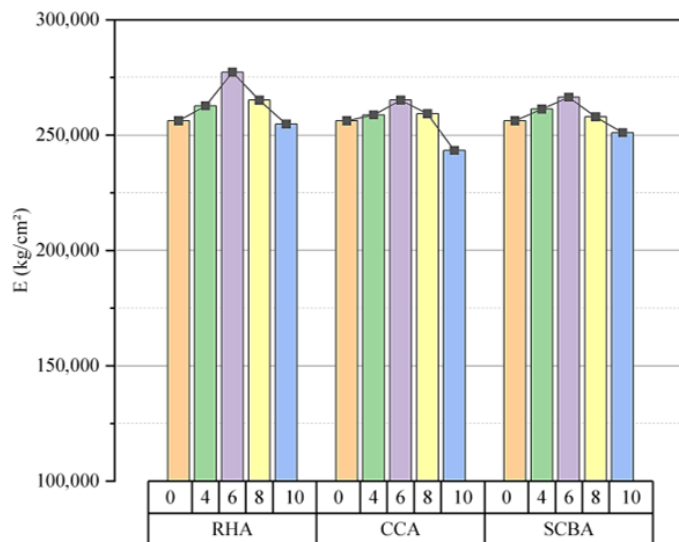


Figura 10: Módulo de Elasticidad sin Ceniza y con RHA, CCA y SCBA.

Notas. Los resultados se obtuvieron en un equipo compresómetro – extensómetro para cilindros de 150x300 mm (6 x 12) con 3 manómetros digitales; para medir módulo de elasticidad y relación de Poisson, siguiendo la norma ASTM C469/C469M. lo que brindó resultados precisos de la rigidez del material.

Se observa que la sustitución de cemento por RHA al 6% resultó en el mayor incremento del módulo de elasticidad, alcanzando aproximadamente 260,000 kg/cm², lo que representa una mejora significativa respecto al patrón. Otros porcentajes de RHA también mostraron mejoras en el módulo de elasticidad, con el 4% y 8% logrando valores similares al patrón y al 6%, mientras que al 10% hubo una ligera disminución, situándose cerca de 230,000 kg/cm². Para la CCA, la sustitución del 6% también resultó en el mayor incremento del módulo de elasticidad, alcanzando valores similares a los obtenidos con RHA al 6%. Las otras proporciones de CCA también mostraron un comportamiento positivo, manteniéndose cercanas al valor del patrón, con una ligera disminución al 10%. En el caso de la SCBA, el comportamiento fue similar, con el 6% resultando en el mayor incremento, alcanzando

valores de módulo de elasticidad superiores a los del patrón, y manteniendo un comportamiento positivo en las otras proporciones.

El análisis sobre los resultados mostrados en la Figura 9 sobre el módulo de elasticidad del concreto revela patrones específicos de comportamiento. Inicialmente, el módulo de elasticidad sin adición de cenizas es de 256,195.50 para todas las muestras. Al 4.00 % de sustitución, todas las cenizas muestran un incremento en el módulo de elasticidad: RHA sube a 262,705.50, CCA a 258,757.46 y SCBA a 261,319.41. Al 6.00 %, se observa el valor máximo: RHA alcanza 277,264.25 (8.22 % de incremento), CCA 265,162.34 (3.50 %), y SCBA 266,443.32 (4.00 %). A partir de este punto, el módulo de elasticidad empieza a disminuir. Al 8.00 %, RHA y CCA experimentan ligeros incrementos respecto a la muestra patrón, mientras que SCBA muestra una ligera reducción. Finalmente, al 10.00 %, todas las cenizas muestran una reducción: RHA desciende a 254,824.25 (-0.54 %), CCA a 243,385.73 (-5.00 %) y SCBA a 251,071.59 (-2.00 %). Este análisis sugiere que la sustitución óptima de cenizas para maximizar el módulo de elasticidad del concreto es del 6.00 %, donde se alcanzan los mayores incrementos porcentuales. Más allá de este porcentaje, la adición de cenizas tiene un efecto negativo, reduciendo la rigidez del concreto. SCBA muestra un rendimiento superior y más estable en comparación con RHA y CCA.

A partir de los resultados de valores de resistencia (kg/cm^2) mostrados gráficamente en Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9, se puede generar un gráfico que muestre las variaciones de cada una de estas propiedades mecánicas respecto al patrón, con el fin de analizar visualmente la tendencia de los efectos de cada una de las cenizas para cada % de experimentación, esto consolidado en la Figura 10.

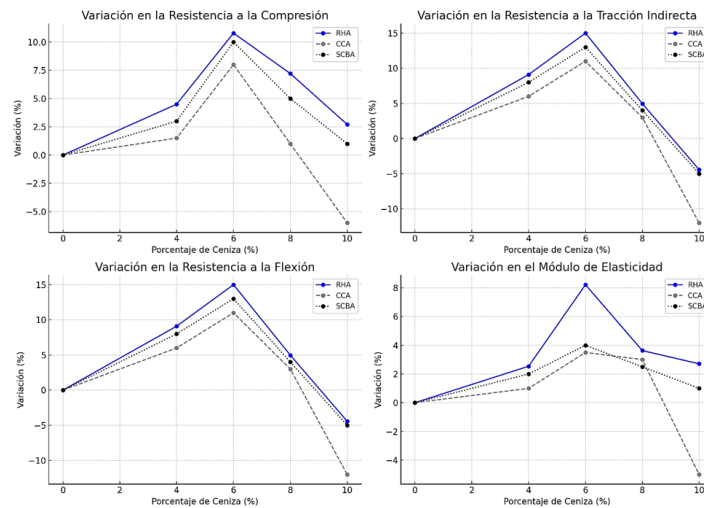


Figura 11: Variación de resultados experimentales/patrón por propiedad mecánica.

Nota. La gráfica consolidada ilustra la variación porcentual respecto al patrón en las propiedades mecánicas del concreto para diferentes porcentajes de sustitución de ceniza de RHA, CCA y SCBA. Se observa en la gráfica que la f_c , con el 6 % de RHA y SCBA ofrece las mejoras más significativas (10.79 % y 10 % respectivamente), mientras que CCA muestra una mejora moderada del 8 %. Sin embargo, incrementos mayores al 6 % resultan en disminuciones, particularmente en el caso de CCA con una reducción notable del 6 % al 10 %. Para la f_{ti} , la RHA al 6 % también presenta la mayor mejora (15 %), seguida por SCBA (13 %) y CCA (11 %), pero porcentajes superiores al 6 % muestran disminuciones en todas las cenizas.

En términos del MR, las mejoras más destacadas se observan nuevamente con un 6 % de RHA y SCBA (15 % y 13 % respectivamente), mientras que CCA ofrece una mejora del 11 %. Sin embargo, al aumentar la proporción de ceniza, la tendencia muestra una disminución de estas propiedades, siendo más pronunciada en CCA. En cuanto al E, las mejoras son más consistentes, con RHA mostrando un incremento del 8.22 % al 6 %, seguido de SCBA y CCA con mejoras menores, pero aún positivas. Estos resultados subrayan que un 6 % de sustitución es óptimo para maximizar las propiedades mecánicas del concreto, y que la RHA es particularmente efectiva. No obstante, incrementos superiores al 6 % tienden a reducir las mejoras alcanzadas, indicando un punto de saturación óptimo para la adición de cenizas agroindustriales en el concreto.

El uso de un 6 % de ceniza como sustituto parcial del cemento en el concreto ofrecería varias ventajas significativas. Mejora las propiedades mecánicas, aumentando la f_c (10.79 % con RHA), la f_{ti} (15 % con RHA), la MR (15 % con RHA y 13 % con SCBA) y E (8.22 % con RHA). Además, promueve la sostenibilidad ambiental al reducir residuos y emisiones de CO_2 , y proporciona eficiencia de costos al disminuir la necesidad de cemento Portland. También mejora la durabilidad al reducir la permeabilidad y mitiga reacciones álcali-agregado, haciendo que

esta práctica sea una opción atractiva para la industria de la construcción. Esta afirmación del investigador, primero, será respaldada con el análisis estadístico de datos para el porcentaje óptimo que se afirma, segundo, comprobando lo primero se realizará las recomendaciones necesarias respecto a las propiedades de durabilidad del concreto convencional con el uso de cenizas de la biomasa como puzolanas naturales y materiales cementicios suplementarios.

4.3. Resultados del objetivo específico 2.

Para comprender el desarrollo de los resultados que a continuación se presenta, es importante una introducción. Respecto a las características de la microestructura del concreto patrón (0 %) y experimental (6 %), los parámetros resultantes, sus unidades de medición, el aporte en la investigación y las normas que regulan cada proceso, se resumen en la Tabla 15.

Tabla 14: Información de los Ensayos de Caracterización Microestructural del Concreto.

Ensayo	Resultado	Unidad	Aporte	Norma
Difracción de rayos X (DRX)	Composición mineralógica	%	Identificación de fases cristalinas presentes en el concreto	ASTM C1365
Espectrometría infrarroja (FTIR)	Enlaces químicos	% Transmitancia	Determinación de grupos funcionales y enlaces químicos	ASTM E1252
Análisis termogravimétrico (TGA)	Pérdida de masa	%	Evaluación de la estabilidad térmica y contenido de compuestos volátiles	ASTM E1131
Microscopía de barrido (SEM)	Morfología y tamaño de partículas	μm	Caracterización de la microestructura superficial y tamaño de poros	ASTM C1723

Nota. Se ha considerado estos indicadores para caracterizar la microestructura del concreto en base a (Kim et al., 2021; Luo et al., 2021; Martínez-Ramírez et al., 2019; Tayeh et al., 2023; Xu et al., 2018), por considerar a algunos investigadores.

La información obtenida de estos ensayos microestructurales es fundamental para comprender y justificar los resultados observados en las propiedades mecánicas del concreto. Por ejemplo, la identificación de fases cristalinas mediante DRX explicará mejoras en la resistencia a la compresión, mientras que la caracterización de enlaces químicos por FTIR puede correlacionarse con la durabilidad y resistencia a la tracción indirecta. La evaluación de la estabilidad térmica y la pérdida de masa por TGA proporciona información sobre la integridad del material bajo condiciones térmicas, influyendo en el módulo de elasticidad. Finalmente, la microscopía SEM permite visualizar la distribución de partículas y la porosidad, factores que afectan directamente la resistencia a la flexión y otras propiedades mecánicas. Así, estos ensayos no solo caracterizan la microestructura, sino que también respaldan de manera integral los resultados mecánicos, mostrando cómo las adiciones de cenizas mejoran las propiedades del concreto a través de cambios a nivel microestructural.

4.4. Características microestructurales del concreto patrón:

La tabla 15 muestra la concentración de diversas fases cristalinas en la muestra de concreto patrón, destacando los componentes identificados y sus fórmulas químicas. Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) constituye el 25.90 % de la muestra, indicando la presencia de hidróxido de calcio, esencial para la hidratación del cemento. El cuarzo (SiO_2) representa el 49.20 %, contribuyendo a la rigidez y durabilidad del concreto. Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y Ortoclasa (KAlSi_3O_8), con 13.20 % y 2.90 % respectivamente, son feldespatos que mejoran la resistencia química. Zr50 Sc12 O118 y Bi4 Cl2 S5, aunque en bajas concentraciones (8.40 % y 0.50 %), pueden influir en las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica del concreto.

Tabla 15: Información de los Ensayos de Caracterización Microestructural del Concreto.

Componente Identificado	Fórmula Química	Resultado (%)
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	25.9
Zr50 Sc12 O118	O354.00 Sc36.08 Zr149.92	8.4
Bi ₄ Cl ₂ S ₅	S75.00 Bi60.00 Cl29.99	0.5
Albite	Na0.95 Ca0.05 Al1.05 Si2.95 O8	13.2
SiO ₂ (Cuarzo)	Si3.00 O6.00	49.2
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	2.9

Nota. Los resultados generados se han obtenido con información del equipo y datos siguiente: Equipo: PANALLETYCA, Modelo AERIS. Posición inicial: 5.0109. Posición final: 79.9869. Tamaño de paso: 0.0220. Material del ánodo: Co. Tipo de longitud de onda prevista: K-Alpha.

Estos resultados proporcionan una comprensión detallada de la composición mineralógica del concreto patrón, fundamental para establecer una línea base comparativa con el concreto modificado con cenizas. La alta concentración de cuarzo (49.20 %) sugiere una estructura rígida y duradera, mientras que la presencia significativa de Portlandite (25.90 %) indica una buena capacidad de hidratación. La identificación de Albite y ortoclasa también contribuye a la comprensión de la matriz de silicato del concreto. Esta caracterización mineralógica es crucial para correlacionar los cambios microestructurales con las propiedades mecánicas observadas, permitiendo una evaluación precisa del impacto de la adición de cenizas en el concreto experimental.

Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es un subproducto de la reacción entre el agua y las fases de silicato de calcio en el cemento. Contribuye a la alcalinidad del concreto, lo cual es esencial para mantener la capa de pasivación sobre el refuerzo de acero, protegiéndolo así de la corrosión. Además, ayuda a mantener un entorno de pH alto, lo que mejora la durabilidad del concreto al reducir la solubilidad de sustancias potencialmente dañinas. Sin embargo, cantidades excesivas de Portlandita pueden ser susceptibles a ataques químicos, como los de sulfatos, lo que puede generar problemas de durabilidad. Por lo tanto, el equilibrio de Portlandita en la matriz del concreto es fundamental para asegurar tanto el desarrollo inmediato de la resistencia como la durabilidad a largo plazo de la estructura de concreto.

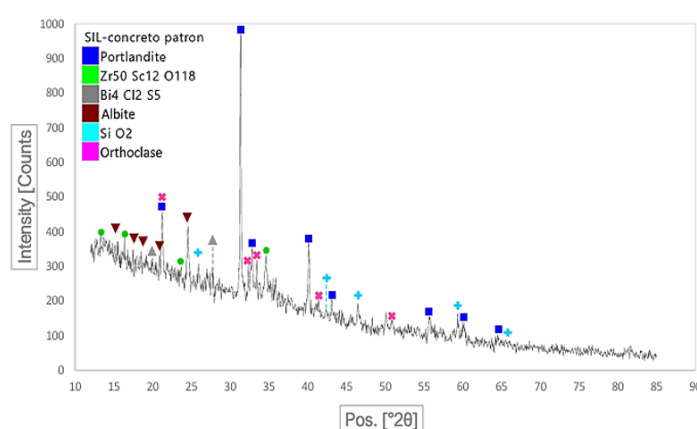


Figura 12: Difractograma de la muestra y fases cristalinas.

Nota. Equipo Utilizado: PANALYTICAL – MODELO AERIS. Posición inicial [2θ]: 5.0109.; Posición Final [2θ]: 79.9869. Método: Difracción de Rayos X - DRX.

Respecto a la Portlandita, es un compuesto común en el cemento hidratado. sus picos en el difractograma indican la presencia de hidróxido de calcio, un producto de la hidratación del cemento, en base a los picos significativos a posiciones de 2θ de aproximadamente 20°, 32°, 45°, y 50°. En cuanto a Zr50 Sc12 O118, puede ser un contaminante o un aditivo en el concreto. Respecto al compuesto Bi4 Cl2 S5: Indica la posible presencia de un material exógeno o un contaminante. Sus picos aparecen cerca de los 2θ de 24°, 32°, 35°, y 37°. Del material, Albite: es un mineral feldespato común, sus picos están alrededor de los 2θ de 27° y 56°. En cuanto a la Sílice, es un componente fundamental en la arena y la grava utilizada en el concreto; sus picos se pueden ver en los 2θ de 21°, 26°, 36°, 43°, y 60°.

El ángulo 2θ es el ángulo entre el rayo incidente y el detector en un difractómetro de rayos X, a medida que el ángulo de difracción cambia, se registran picos en posiciones específicas correspondientes a los planos cristalinos de los materiales presentes en la muestra. La intensidad en el eje de las ordenadas representa la intensidad de los rayos X difractados, medida en cuentas o counts. Esta intensidad refleja la cantidad de rayos X que son dispersados por los planos cristalinos de la muestra en una dirección específica. Los picos en la intensidad indican la presencia de ciertos planos cristalinos en los materiales presentes en la muestra. Cada pico en el difractograma corresponde a una distancia interplanar específica en la estructura cristalina del material, en cuanto a la altura de un pico indica la intensidad relativa de la difracción desde un conjunto particular de planos cristalinos. Picos más altos sugieren una mayor cantidad de ese plano específico en la muestra, lo cual puede estar relacionado con la cantidad de ese material o fase cristalina en la muestra.

Los picos más prominentes en el difractograma indican las fases cristalinas dominantes en la muestra. Por ejemplo, si los picos más altos corresponden a la portlandita, esto sugiere una alta concentración de hidróxido de calcio en la muestra. La presencia de picos adicionales correspondientes a otros materiales, como albite o sílice, sugiere la presencia de estos minerales. el diagrama de DRX permite la identificación y cuantificación de las fases cristalinas presentes en una muestra a través del análisis de las posiciones y las intensidades de los picos de difracción.

Esto es necesario para caracterizar materiales como el concreto y para evaluar los efectos de modificaciones como la adición de cenizas de residuos agroindustriales.

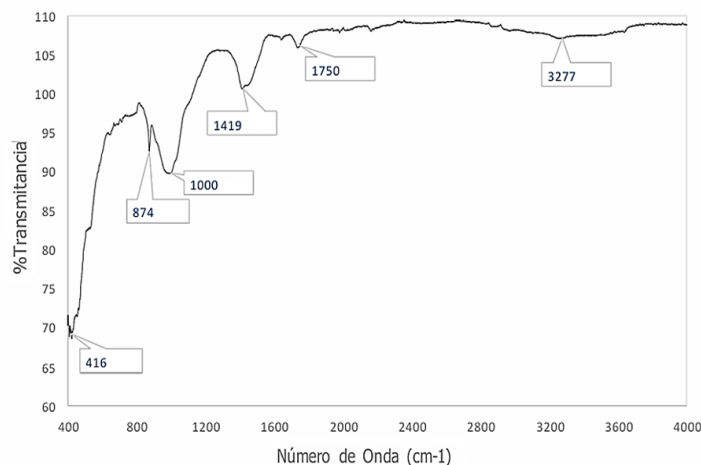


Figura 13: Curva de espectros FTIR-ATR de la muestra del concreto patrón.

Nota. En cuanto a norma y equipos se describe lo siguiente: Normas de Referencia: ASTM E1252. Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo -Perkin Elmer, Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 380 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} .

Respecto a los picos que se exponen en la figura, 416 cm^{-1} , corresponde a las vibraciones de flexión de enlaces Si-O en minerales de silicato o a vibraciones de otros enlaces presentes en materiales inorgánicos. De la asíntota, 874 cm^{-1} , se asocia con la vibración de enlaces C-O en carbonatos, como el calcita (CaCO_3), este pico indica la presencia de carbonatos en la muestra. Del pico, 1000 cm^{-1} , está relacionado con las vibraciones de estiramiento de enlaces Si-O-Si en silicatos, indicando la presencia de fases de sílice en la muestra. En cuanto a 1419 cm^{-1} , corresponde a las vibraciones de deformación de enlaces C-H en grupos metilo o metileno o a las vibraciones de enlaces C-O en carbonatos. De la deformación, 1750 cm^{-1} , es característico de las vibraciones de estiramiento de enlaces C=O en grupos carbonilo, tales como los presentes en compuestos orgánicos y polímeros. Finalmente, la deflexión de 3277 cm^{-1} , está asociado con las vibraciones de estiramiento de enlaces O-H en grupos hidroxilo, lo cual puede indicar la presencia de agua, hidroxilos o alcoholes en la muestra.

La presencia de picos significativos a 1000 cm^{-1} y 416 cm^{-1} sugiere que las cenizas calcinadas han introducido más sílice en la matriz del concreto, lo cual puede mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

La presencia de nuevos picos o el aumento en la intensidad de ciertos picos (como los de 874 cm^{-1} y 1419 cm^{-1}) puede indicar que las cenizas han reaccionado con el cemento para formar nuevos compuestos, como carbonatos adicionales o compuestos orgánicos. Presencia de grupos hidroxilo: El pico a 3277 cm^{-1} puede sugerir una mejora en la capacidad de hidratación del cemento modificado con cenizas, lo que puede llevar a una mejor resistencia y durabilidad del concreto.

Tabla 16: Identificación de Grupos Funcionales del FTIR de la Muestra Patrón.

Tipo de vibración (Banda de vibración de:)	Grupo funcional	Rango teórico (cm^{-1})	Resultado experimental (cm^{-1})
Tensión	"O-H"	3200-3700	3277
Tensión	" $-\text{CO}_3^{2-}$ (C=O)"	1790-1640	1750
Tensión	" $-\text{CO}_3^{2-}$ "	1470-1400	1419
Tensión	"-Si-O-"	1180-920	1000
Balaceo	" $-\text{CO}_3^{2-}$ "	900-850	874
De deformación	"-Si-O-"	400-500	416

Nota. Los resultados experimentales se comparan con los rangos teóricos de bandas de vibración, evidenciando la presencia de diversos grupos funcionales. Estos resultados confirman la presencia de los grupos funcionales esperados en la microestructura del concreto, validando su composición química.

Los tipos de vibración indicados en la tabla 16 se refieren a los movimientos internos de los átomos en las moléculas cuando son excitados por radiación infrarroja. Las vibraciones de tensión ocurren cuando los átomos en un enlace se mueven hacia y desde el otro, cambiando la longitud del enlace.

Los grupos funcionales asociados con estas vibraciones en la muestra de concreto incluyen -OH (hidroxilo), -CO_3^{2-} (C=O) y CO_3^{2-} (carbonatos), y Si-O- (silicatos). El balanceo se refiere al movimiento angular de un grupo de átomos alrededor de un átomo central, mientras que las deformaciones son cambios en el ángulo del enlace sin alterar su longitud. Los grupos funcionales de carbonatos y silicatos presentes en la muestra son indicativos de la composición mineral del concreto, como la presencia de compuestos de calcio y silicio.

Los resultados experimentales de las vibraciones observadas mediante FTIR muestran una alta correspondencia con los rangos teóricos esperados. La banda de tensión "O-H" se detecta a 3277 cm^{-1} , coincidiendo con el rango teórico de $3200\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$, indicando la presencia de grupos hidroxilo. La vibración de tensión CO_3^{2-} (C=O) se encuentra a 1750 cm^{-1} , dentro del rango teórico de $1790\text{-}1640\text{ cm}^{-1}$, confirmando la existencia de carbonatos con enlace C=O . La banda de CO_3^{2-} se registra a 1419 cm^{-1} , que está cerca pero ligeramente fuera del rango teórico de $1470\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$. La vibración Si-O- aparece a 1000 cm^{-1} , bien dentro del rango teórico de $1180\text{-}920\text{ cm}^{-1}$, evidenciando la presencia de silicatos. El balanceo de CO_3^{2-} a 874 cm^{-1} se ajusta al rango teórico de $900\text{-}850\text{ cm}^{-1}$, y la deformación Si-O- a 416 cm^{-1} se encuentra dentro del rango esperado de $400\text{-}500\text{ cm}^{-1}$. Estos resultados validan la composición química del concreto patrón, mostrando una correlación cercana con los valores teóricos y confirmando la presencia de los grupos funcionales identificados.

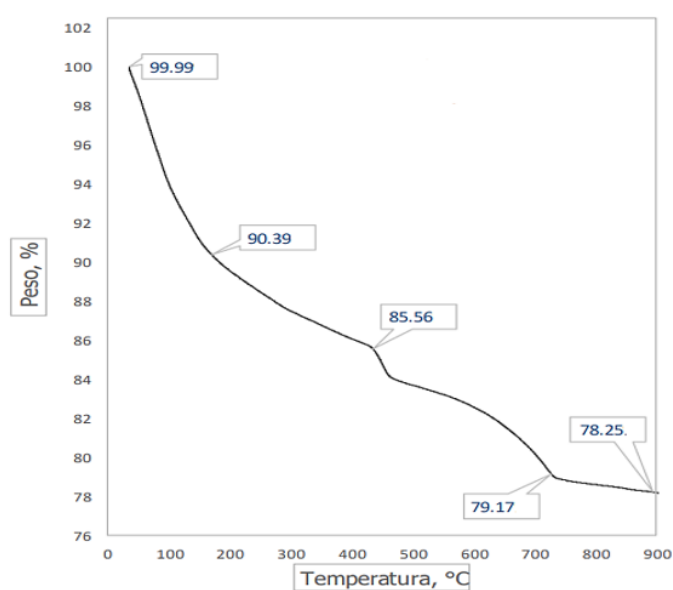


Figura 14: Curva TGA de la muestra evaluada de concreto patrón.

Nota. Los resultados mostrados se obtuvieron con el equipo: analizador térmico Perkin Elmer STA-6000, siguiendo el procedimiento del ensayo estándar para análisis composicional por termogravimetría, de acuerdo con la norma ASTM E1131. Rango de temperatura: $35\text{-}600\text{ °C}$ (atmósfera de nitrógeno). Peso de la prueba: 15.158 mg .

La curva TGA de la muestra evaluada de concreto patrón muestra la relación entre el peso de la muestra y la temperatura. Al inicio del ensayo, a temperatura ambiente, el peso de la muestra se encuentra en el 99.99% de su peso original. A medida que la temperatura aumenta, se observa una disminución gradual en el peso de la muestra. A los 200 °C , el peso se reduce al 90.39% , indicando la pérdida de agua libre y agua adsorbida. Entre 300 °C y 500 °C , el peso disminuye al 85.56% , lo que puede atribuirse a la deshidratación de compuestos como el hidróxido de calcio (portlandita) y la pérdida de agua estructural de algunos minerales presentes en la muestra. A los 600 °C , el peso se reduce aún más al 79.17% , reflejando la descomposición de carbonatos, como el carbonato de calcio, que libera dióxido de carbono. Finalmente, a 800 °C , el peso estabiliza en el 78.25% , indicando que la mayoría de los compuestos volátiles se han perdido y los componentes restantes son térmicamente estables a esta temperatura.

La significativa pérdida de peso en las primeras etapas del calentamiento indica la presencia de agua libre y estructural, que es común en el concreto debido a la hidratación del cemento. La deshidratación de la portlandita alrededor de $400\text{-}500\text{ °C}$ es consistente con la composición típica del concreto, donde el hidróxido de calcio es un producto de hidratación del cemento. La notable pérdida de peso entre 500 °C y 600 °C sugiere la descomposición de carbonatos, confirmando la presencia de compuestos de calcio que se descomponen a altas temperaturas. Estos datos son cruciales para entender la estabilidad térmica del concreto y pueden ayudar a correlacionar los efectos de la adición de cenizas en el concreto experimental.

La información obtenida permite evaluar cómo las cenizas afectan la estabilidad térmica y la descomposición de los componentes del concreto, proporcionando una base para mejorar la durabilidad y sus propiedades mecánicas.

Finalmente, a continuación, se muestra los resultados del ensayo de microscopía electrónica de barrido, conocido como imágenes SEM, que ilustra la morfología, interacción interfacial en la matriz cementante y tamaño promedio de la partícula en fotos que se tomaron en tres áreas, las cuales se representan mediante su fotografía y el respectivo espectro.

La tabla 17 presenta en todas las áreas, el O, como elemento predominante, variando entre 53.46 % y 56.49 %. El Ca también muestra una presencia significativa, especialmente en el Área 1 con un 31.43 %, disminuyendo en las otras áreas. El Si presenta una mayor variación entre las áreas, con valores que van desde 1.75 % hasta 11.93 %. Otros elementos como Na, Al, K y Fe están presentes en menores proporciones, y algunos no se detectan en todas las áreas.

Tabla 17: Elementos Químicos Identificados en Cada Área Capturada por SEM.

Elemento	Unidad	Área 1 (%)	Área 2 (%)	Área 3 (%)
Oxígeno, O	%	53.9	53.46	56.49
Sodio, Na	%	3.19	2.48	-
Aluminio, Al	%	-	4.87	4.02
Silicio, Si	%	9.4	1.75	11.93
Potasio, K	%	-	1.61	1.4
Calcio, Ca	%	31.43	19.72	24.35
Hierro, Fe	%	2.08	2.11	1.81

Nota. Las áreas analizadas mediante microscopía electrónica de barrido están a aumentos de 22X, 23X y 24X respectivamente para las Áreas 1, 2 y 3.

Los resultados de la microscopía electrónica de barrido revelan una distribución heterogénea de los elementos en las diferentes áreas de la muestra de concreto. La alta concentración de oxígeno sugiere la presencia de varios óxidos, que son comunes en la matriz del concreto. La significativa cantidad de calcio es indicativa de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y posiblemente del carbonato de calcio (CaCO_3), esenciales para la resistencia y durabilidad del concreto. La variabilidad en la concentración de silicio refleja la presencia de diferentes fases de silicatos, que contribuyen a la rigidez y resistencia del material. La presencia de aluminio y potasio, aunque menor, puede influir en las propiedades químicas y mecánicas del concreto. Estos datos proporcionan una base comparativa para evaluar los cambios inducidos por la adición de cenizas agroindustriales en el concreto experimental.

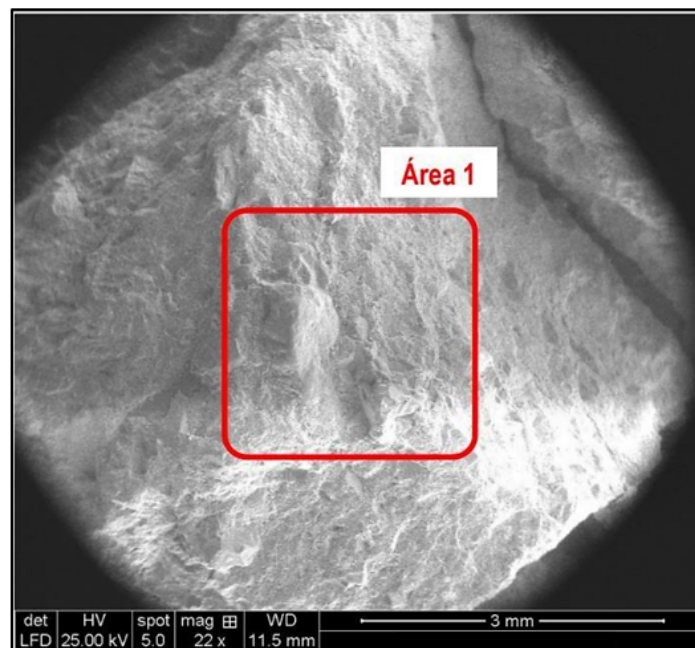


Figura 15: Imagen SEM de Análisis en Área 1 del Concreto Patrón.

Nota. La imagen obtenida fue realizada utilizando un equipo de SEM, específicamente modelo JEOL JSM-IT500. El proceso de análisis cumple con la norma ASTM E1508. Las áreas de análisis fueron seleccionadas basándose en criterios de representatividad de la microestructura del concreto. Se eligieron tres áreas diferentes para asegurar una comprensión completa de la distribución elemental y las características morfológicas en distintas regiones del material. Las áreas seleccionadas, a aumentos de 22X, 23X y 24X respectivamente, proporcionan una visión detallada de las variaciones en la textura, la porosidad y la composición química, permitiendo una evaluación exhaustiva de la homogeneidad y las propiedades mecánicas del concreto.

La imagen del área representativa de la muestra patrón muestra una superficie del concreto con una resolución detallada. Se observa una estructura porosa con texturas rugosas y microfracturas, indicativas de la formación de grietas internas durante el endurecimiento o por carga aplicada. La alta porosidad puede influir significativamente en la permeabilidad y durabilidad del concreto. La composición elemental, con 31.43 % de calcio y 9.40 % de silicio, sugiere la presencia de compuestos como portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y carbonatos de calcio (CaCO_3), además de silicatos que contribuyen a la resistencia del material. La alta concentración de oxígeno (53.90 %) apoya esta observación. La imagen proporciona una visión detallada de la microestructura, esencial para entender las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto, estableciendo una línea base para comparar con áreas tratadas con adiciones de cenizas y evaluar sus efectos en la microestructura del concreto.

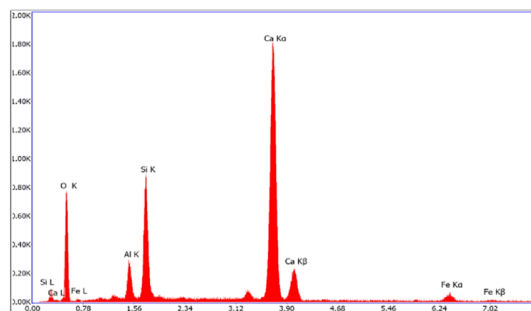


Figura 16: Espectro obtenido del análisis en el área 1 de la muestra patrón.

Nota. Los espectros EDS fueron obtenidos utilizando un equipo SEM equipado con un detector EDS, específicamente el modelo JEOL JSM-IT500 con un detector Oxford Instruments X-Max. El análisis de estos espectros se realizó siguiendo la norma ASTM E1508, para EDS. El espectro de energía dispersiva de rayos X (EDS) del Área 1 muestra picos característicos que indican la presencia de varios elementos en la muestra de concreto. El pico más prominente corresponde al calcio ($\text{Ca K}\alpha$) a 3.90 keV, seguido de otro pico de calcio ($\text{Ca K}\beta$), indicando una alta concentración de este elemento, consistente con la presencia de compuestos como la portlandita y el carbonato de calcio. El oxígeno (O K) presenta un pico significativo a 0.52 keV, reflejando su abundancia en la matriz del concreto como parte de los óxidos. El silicio (Si K) muestra un pico a 1.74 keV, lo que sugiere la existencia de silicatos, importantes para la estructura del material. El aluminio (Al K) y el hierro (Fe K) también están presentes, aunque en menor cantidad, evidenciados por sus picos a 1.48 keV y 6.40 keV respectivamente.

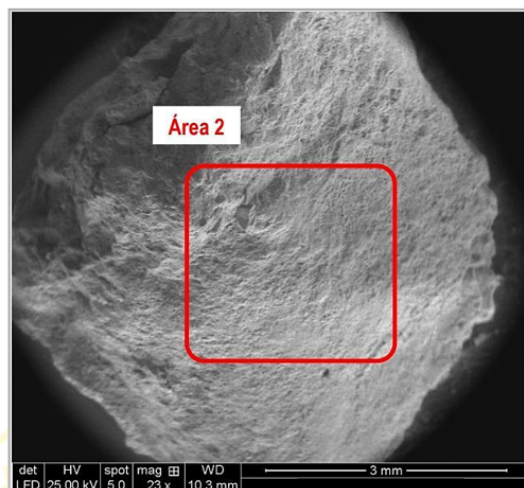


Figura 17: Imagen SEM de Análisis en Área 2 del Concreto Patrón.

Nota. Las imágenes obtenidas fueron realizadas utilizando un equipo de SEM, modelo JEOL JSM-IT500. El proceso de análisis cumple con la norma ASTM E1508. Las áreas de análisis fueron seleccionadas basándose en criterios de representatividad de la microestructura del concreto.

La imagen del Área 2, obtenida mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a un aumento de 23X, muestra una superficie de concreto con características similares al Área 1, pero con algunas diferencias notables. La textura es menos rugosa y presenta menos microfracturas, lo que podría indicar una zona con una mejor integridad estructural. La distribución de elementos químicos en esta área revela una menor concentración de calcio (19.72 %) y una presencia significativa de aluminio (4.87 %), lo cual sugiere la existencia de fases aluminatos, además de los silicatos y carbonatos de calcio. La presencia de oxígeno sigue siendo dominante (53.46 %), reflejando la composición oxidica del material. La menor rugosidad y fracturación observada en esta área podría contribuir a una mayor durabilidad y menor susceptibilidad a la penetración de agentes agresivos en comparación con el Área 1.

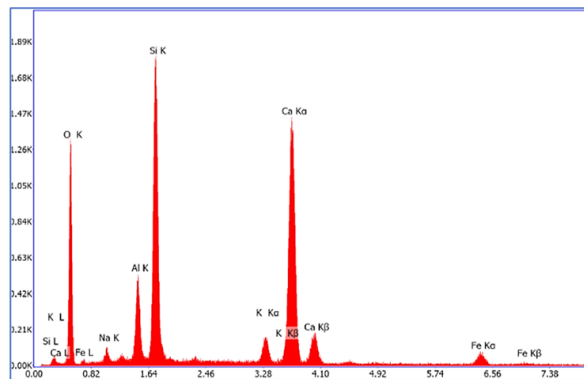


Figura 18: Espectro obtenido del análisis en el área 2 de la muestra patrón.

Nota. Los espectros EDS fueron obtenidos utilizando un equipo SEM equipado con un detector EDS, específicamente el modelo JEOL JSM-IT500 con un detector Oxford Instruments X-Max. El análisis de estos espectros se realizó siguiendo la norma ASTM E1508, para EDS. El EDS del Área 2 revela una distribución elemental similar a la del Área 1, con algunos matices. El pico más dominante corresponde nuevamente al calcio (Ca K α) a 3.90 keV, lo que confirma una alta concentración de calcio en esta área. El oxígeno (O K) presenta un pico significativo a 0.52 keV, indicando su prevalencia en la estructura del concreto como parte de los óxidos. El silicio (Si K) muestra un pico a 1.74 keV, indicando la presencia de silicatos. Además, el aluminio (Al K) aparece con un pico a 1.48 keV, reflejando la presencia de fases de aluminatos. Se observa también la presencia de hierro (Fe K) con picos a 6.40 keV y 7.11 keV, aunque en menores cantidades.

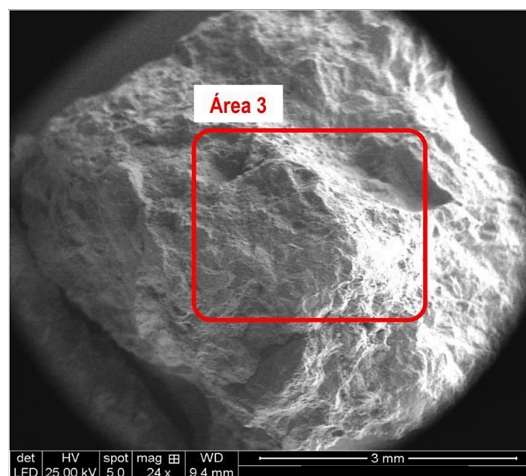


Figura 19: Imagen SEM de análisis en área 3 del concreto patrón.

Nota. Las imágenes obtenidas fueron realizadas utilizando un equipo de SEM, modelo JEOL JSM-IT500. El proceso de análisis cumple con la norma ASTM E1508. Las áreas de análisis fueron seleccionadas basándose en criterios de representatividad de la microestructura del concreto.

La imagen del Área 3, capturada a un aumento de 24X, muestra una superficie altamente rugosa con múltiples microfracturas y poros. Esta área presenta la mayor variación en la distribución de elementos químicos, con una alta concentración de silicio (11.93 %) y una significativa cantidad de calcio (24.35 %), sugiriendo la presencia de compuestos de silicato de calcio que contribuyen a la resistencia mecánica del concreto. El oxígeno sigue siendo el elemento predominante (56.49 %), y se observa una menor presencia de hierro (1.81 %) en comparación con las otras áreas. La rugosidad y las microfracturas indican una mayor susceptibilidad a la penetración de agentes externos, lo que podría afectar negativamente la durabilidad del concreto. Esta área parece ser la más afectada por los procesos de hidratación y carbonatación, resultando en una microestructura más débil en comparación con las Áreas 1 y 2. La variabilidad en la composición y la estructura microfracturada subraya la importancia de la homogeneidad en el material para asegurar propiedades mecánicas óptimas.

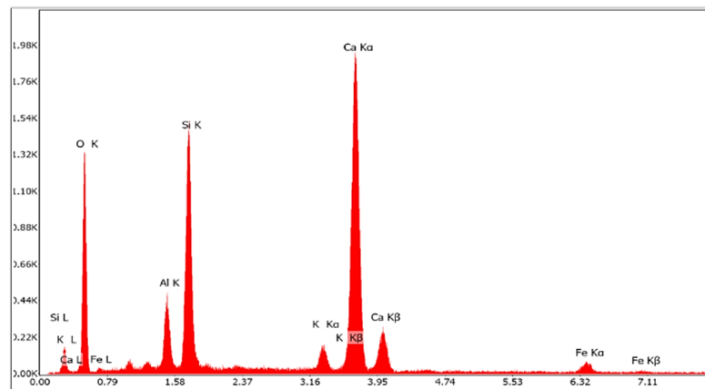


Figura 20: Espectro obtenido del análisis en el área 3 de la muestra patrón.

Nota. Los espectros EDS fueron obtenidos utilizando un equipo SEM equipado con un detector EDS, específicamente el modelo JEOL JSM-IT500 con un detector Oxford Instruments X-Max. El análisis de estos espectros se realizó siguiendo la norma ASTM E1508, para EDS. El espectro EDS del Área 3 también muestra la predominancia de calcio (Ca K α) con el pico más alto a 3.90 keV, seguido de otro pico de calcio (Ca K β), confirmando nuevamente la abundancia de este elemento. El oxígeno (O K) sigue siendo un componente significativo, con un pico a 0.52 keV. El silicio (Si K) presenta un pico a 1.74 keV, destacando la presencia de silicatos esenciales para la resistencia del concreto. El aluminio (Al K) y el hierro (Fe K) también están presentes, con picos a 1.48 keV y 6.40 keV respectivamente, en concentraciones similares a las observadas en otras áreas. Adicionalmente, el potasio (K K α y K K β) se detecta con picos a 3.31 keV y 3.59 keV, lo que sugiere la presencia de compuestos potásicos. La consistencia de estos elementos en el espectro refuerza la comprensión de la composición elemental del concreto y la posible influencia de estos elementos en las propiedades del material.

4.4.1. Características microestructurales del concreto con residuos agroindustriales.

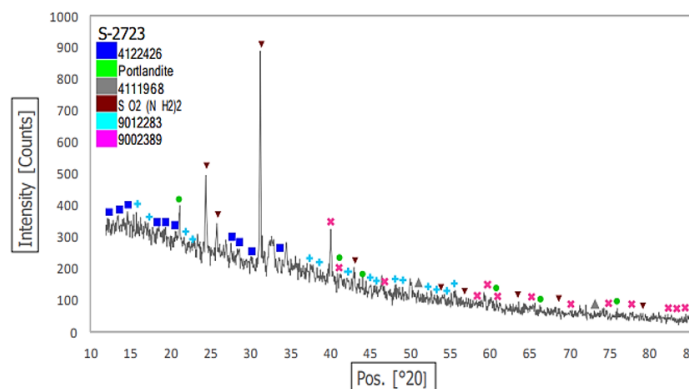


Figura 21: Difractograma del Concreto con Ceniza de Residuo Agroindustrial Representativo.

Nota. Equipo Utilizado: PANALYTICAL – MODELO AERIS. Para la muestra analizada se encontró mayormente SiO₂, compuestos de Portlandite y Albite respectivamente.

Para la RHA, estudios recientes han demostrado que contiene una alta cantidad de sílice amorfa, lo cual es benéfico para las propiedades puzolánicas del material. Los difractogramas típicos de RHA muestran un pico amplio en el rango de 2θ entre 15° y 30° , indicando la presencia de sílice amorfa, además de algunos picos menores correspondientes a cristobalita y cuarzo. La integración de RHA en morteros y concretos puede mejorar la resistencia a compresión y durabilidad debido a su capacidad para reaccionar con hidróxido de calcio y formar compuestos cementantes adicionales. En cuanto a la SCBA, contiene tanto fases cristalinas como amorfas, con presencia de óxidos de sílice, calcio y aluminio. Los difractogramas de SCBA muestran picos correspondientes a sílice amorfa en el rango de 2θ entre 20° y 30° , similar a la RHA, pero también pueden aparecer picos de calcita, portlandita y anhidrita, dependiendo de las condiciones de combustión y el tratamiento previo de la ceniza. Estos compuestos pueden influir significativamente en las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto modificado con SCBA.

La CCA se caracteriza por contener una mezcla de compuestos silíceos y aluminatos. Los estudios muestran que los difractogramas de CCA presentan picos que indican la presencia de sílice amorfa, así como fases cristalinas de mullita y gelenita. Estas características contribuyen a las propiedades puzolánicas de CCA, haciéndola adecuada para su uso en la fabricación de concretos con mejores propiedades mecánicas y durabilidad. La presencia de picos bien definidos y agudos, como los observados a aproximadamente $2\theta = 29^\circ - 36^\circ$, indica una alta cristalinidad, mientras que la línea de base elevada sugiere la presencia de una considerable fracción amorfa.

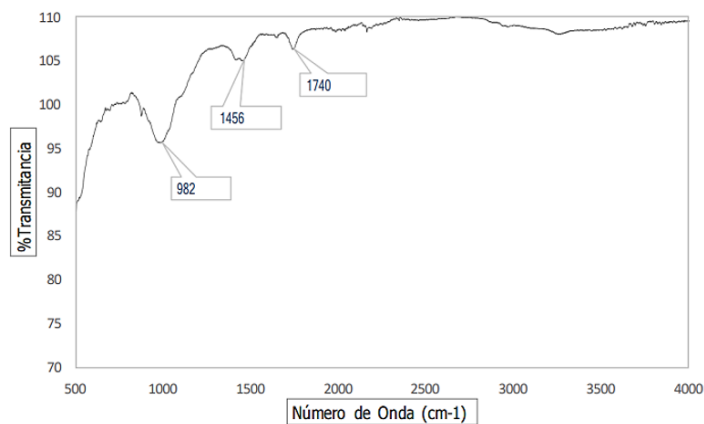


Figura 22: Curva de Espectros FTIR-ATR de la Muestra del Concreto Experimental.

Nota. Norma aplicada ASTM E1252. Equipo: Espectrofotómetro-Perkin Elmer.

Para RHA, investigaciones recientes han identificado que sus espectros FTIR típicos presentan bandas de absorción significativas alrededor de 1100 cm^{-1} , 800 cm^{-1} y 470 cm^{-1} , las cuales corresponden a las vibraciones de tensión y deformación de los enlaces Si-O y Si-O-Si, debido a la alta presencia de sílice amorfa en esta ceniza. En el espectro FTIR de la RHA, una banda ancha y fuerte alrededor de 1100 cm^{-1} indica la presencia de sílice amorfa, mientras que la banda en 800 cm^{-1} y otra en 470 cm^{-1} refuerzan la identificación de esta sílice. Estas características diferencian a la RHA por su alto contenido de sílice reactiva, que es beneficiosa para mejorar las propiedades puzolánicas cuando se utiliza en cementos y concretos.

En cuanto a la SCBA, los espectros FTIR revelan la presencia de varios grupos funcionales que incluyen enlaces Si-O, C=O y OH. Las bandas de absorción alrededor de $1050-1080\text{ cm}^{-1}$ se asocian con las vibraciones de tensión de los enlaces Si-O, mientras que las bandas en $1700-1750\text{ cm}^{-1}$ indican la presencia de grupos carbonílicos (C=O). Además, una banda ancha alrededor de 3400 cm^{-1} sugiere la presencia de grupos hidroxilos (OH), indicando la posible presencia de compuestos orgánicos residuales y óxidos de silicio. Estas características reflejan la compleja composición de SCBA, la cual no solo contiene sílice amorfa sino también otros compuestos que pueden influir en las propiedades mecánicas y durabilidad de los materiales cementantes.

Para la CCA, los espectros FTIR muestran bandas de absorción características en las regiones de $1000-1100\text{ cm}^{-1}$, $1400-1450\text{ cm}^{-1}$ y $800-900\text{ cm}^{-1}$. La banda en $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ está relacionada con las vibraciones de tensión del enlace Si-O, similar a la RHA y SCBA, indicando la presencia de sílice. Sin embargo, la banda en $1400-1450\text{ cm}^{-1}$ corresponde a las vibraciones de los enlaces C-O, sugiriendo la presencia de carbonatos. La banda alrededor de $800-900\text{ cm}^{-1}$ indica posibles vibraciones de deformación de enlaces Si-O o la presencia de sílice menos cristalina.

La tabla 18 comparativa muestra los resultados de los ensayos FTIR para diferentes tipos de cenizas. Los resultados indican RHA se caracteriza principalmente por bandas de absorción en 1100, 800 y 470 cm^{-1} , asociadas a los enlaces Si-O y Si-O-Si, reflejando su alto contenido de sílice amorfa, que contribuye significativamente a sus propiedades puzolánicas. Por otro lado, SCBA presenta bandas en los rangos de 1050-1080, 1700-1750 y 3400 cm^{-1} , correspondientes a los grupos funcionales Si-O, C=O y OH, indicando una mezcla de sílice amorfa, grupos carbonílicos e hidroxilos, lo cual sugiere una mayor complejidad química y potenciales beneficios en la mejora de las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Finalmente, CCA exhibe bandas en 1000-1100, 1400-1450 y 800-900 cm^{-1} , indicando la presencia de enlaces Si-O y C-O, lo que implica la existencia de sílice y carbonatos, proporcionando propiedades específicas que pueden mejorar la microestructura y resistencia del concreto.

Tabla 18: Tabla Comparativa de los Enlaces Generados por Cenizas en el Concreto.

Tipo de Ceniza	Principales Bandas de Absorción (cm^{-1})	Grupos Funcionales Identificados	Componentes Principales
RHA	1100, 800, 470	Si-O, Si-O-Si	Sílice amorfa
SCBA	1050-1080, 1700-1750, 3400	Si-O, C=O, OH	Sílice amorfa, grupos carbonílicos, grupos hidroxilos
CCA	1000-1100, 1400-1450, 800-900	Si-O, C-O	Sílice, carbonatos

Nota. Información tabulada a partir de los resultados generados en los ensayos FTIR para el concreto con cada adición experimental de ceniza. Los enlaces funcionales que forma parte del concreto en su proceso de endurecimiento, lo cual difiere de la RHA (Agashua et al., 2024; Al-Alwan et al., 2022; Arifin & Sanwani, 2023), de la SCBA (Abdalla et al., 2022; Sobuz et al., 2024; Spósito et al., 2023) y de la CCA (Memon et al., 2019; Mohan & Chandrasekaran, 2022).

Los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopía de dispersión de energía (EDS) muestran cómo la morfología y la composición elemental de las cenizas agroindustriales afectan las propiedades del concreto. La RHA presenta partículas angulares y porosas ricas en sílice amorfa, lo que mejora las propiedades puzolánicas del concreto al reaccionar eficientemente con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementantes adicionales (Agashua et al., 2024; Al-Alwan et al., 2022). La SCBA muestra estructuras cúbicas y esféricas con textura rugosa, combinando fases amorfas y cristalinas que aumentan la durabilidad y resistencia del concreto debido a su complejidad química (Arifin & Sanwani, 2023; Sobuz et al., 2024). La CCA tiene partículas lisas y porosas que llenan mejor los vacíos en la matriz del concreto, mejorando la distribución de tensiones y la resistencia a la compresión, gracias a la presencia de sílice y carbonatos (Memon et al., 2019; Mohan & Chandrasekaran, 2022). Estas diferencias en la morfología permiten una mejor adherencia y cohesión en el concreto, resaltando la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de ceniza para optimizar las propiedades del material cementante (Spósito et al., 2023). En resumen, la morfología y la composición elemental de las cenizas agroindustriales influyen significativamente en la microestructura y el rendimiento del concreto.

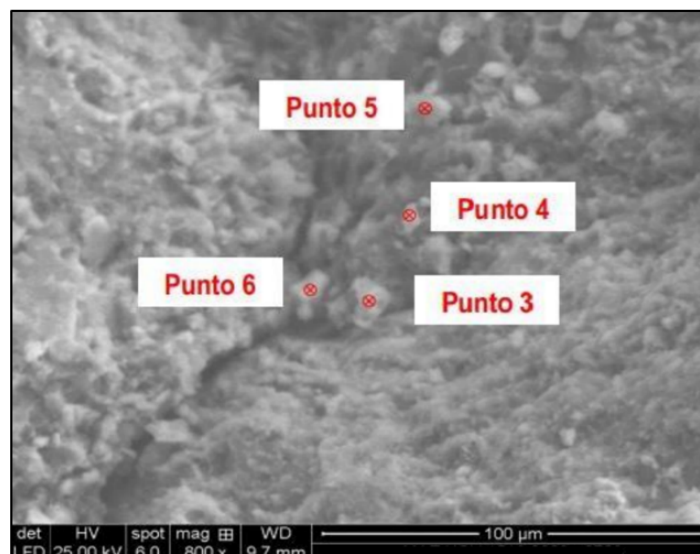


Figura 23: SEM representativo del concreto experimental.

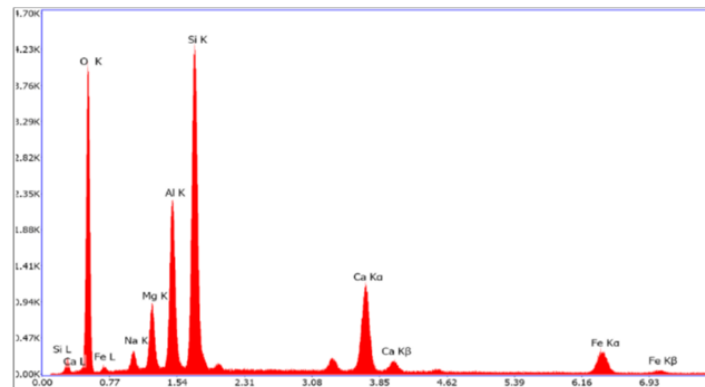


Figura 24: Espectro de la muestra pto. 4 de la Figura 23.

Nota. La muestra analizada presenta la morfología de un aglomerado de morfologías cuasiesféricas, constituidos principalmente por óxidos puzolánicos; con presencia de otros elementos minoritarios también en la forma de óxidos como sodio y posible presencia de potasio en contenidos aproximados menores a 1 % en la línea espectral de 3,31 kv, nivel de energía α .

Para la RHA, los estudios recientes han demostrado que su estructura es mayormente porosa y rica en sílice amorfa. Los análisis SEM muestran una morfología irregular con partículas angulares y porosas. En el análisis EDS, la RHA presenta un alto contenido de oxígeno y silicio, con trazas de otros elementos como aluminio y hierro. Estos componentes son consistentes con los resultados del Punto identificado, que muestra una alta proporción de oxígeno (50.41 %) y silicio (19.41 %), lo cual es típico de la RHA y sugiere su potencial para mejorar las propiedades puzolánicas en aplicaciones de concreto.

En cuanto a la SCBA, los resultados indican que esta ceniza contiene tanto fases amorfas como cristalinas, con una mezcla de óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio. Las imágenes SEM de SCBA revelaron partículas de formas variadas, incluyendo estructuras cúbicas y esféricas, con una textura rugosa. El análisis EDS sobre la SCBA muestra una composición significativa de aluminio (10.65 %) y magnesio (4.98 %), además de silicio y oxígeno, lo cual es coherente con la composición típica de SCBA, indicando su complejidad química.

La CCA presenta una morfología diversa con partículas de tamaños variables y estructuras tanto amorfas como cristalinas. Los análisis SEM muestran partículas con superficies lisas y estructuras porosas. El EDS del punto representativo en el ensayo muestra presencia de calcio (7.44 %) y hierro (4.22 %), además de oxígeno y silicio. Estos elementos son característicos de la CCA, donde la presencia de carbonatos y óxidos metálicos puede influir en las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. En comparación con RHA y SCBA, la CCA presenta una mayor proporción de calcio y hierro, lo que puede ofrecer ventajas específicas en la resistencia a la compresión y la durabilidad del material cementante.

Tabla 19: Resumen de microestructura para cada ceniza en el concreto experimental.

Tipo de Ceniza	Morfología Observada en SEM	Principales Elementos (EDS)	Características Microestructurales del Concreto
RHA	Partículas angulares y porosas	Oxígeno, Silicio, Aluminio, Hierro	Alta porosidad, mejora en propiedades puzolánicas
SCBA	Estructuras cúbicas y esféricas, textura rugosa	Oxígeno, Silicio, Aluminio, Magnesio	Mejora en durabilidad y resistencia debido a la complejidad química
CCA	Partículas con superficies lisas y estructuras porosas	Oxígeno, Silicio, Calcio, Hierro	Aumento en la resistencia a la compresión y durabilidad

Nota. Elaboración a partir de la información extraída de los informes de los ensayos en el laboratorio SLAB.

5. Discusión

En la Tabla 13 se tabulan los resultados de las características químicas de los residuos subagrícolas contrastado con las especificaciones de la norma ASTM C618, que cumplen y asegura su uso idóneo como material cementante suplementario además de ser una puzolana natural, esto coincide con los resultados de las muestras investigadas por (Abdalla et al., 2022; Andrade Neto et al., 2021; Bayapureddy et al., 2020; Diniz et al., 2022) donde las cenizas de sus muestras están en un rango de 75-90 % de la suma de los óxidos puzolánicos principales. Los

residuos agroindustriales se calcinaron a 750 °C, está dentro del intervalo, cotejado con (Hakeem, Agwa, et al., 2022; Hussien & Oan, 2022; Mohan & Chandrasekaran, 2022; Murthi et al., 2020; A. Nikhade & Pammar, 2022; Praveenkumar & Sankarasubramanian, 2019; Tarekegn et al., 2022), lo cual, establece como rango de calcinación para estos residuos entre 600°-800°C. Adicional, es importante, que las cenizas de los residuos de la biomasa cumplan íntegramente con las especificaciones de la norma para sustituir al cemento (J. Li et al., 2023), es el caso de que el $SO_3 < 4\%$ y $N_2O + 0.658K_2O$ esté entre $[0.5-0.8]\%$, lo cual se cumple para todos los residuos, se reafirma en contraste con los estudios de (Al-Alwan et al., 2022; Karim et al., 2024; Ma et al., 2023). Estas especificaciones definen específicamente que, al cumplir con la primera, se evita las consecuencias del “falso fraguado” que genera exceder el 4% establecido según norma y que afecta al concreto; en cuanto a el límite del equivalente de óxido de sodio, mientras esté en el rango, se asegura que el material adicionado al concreto no contribuye en la formación de la reacción álcali-agregado del concreto lo cual afecta la durabilidad del concreto en servicio.

En la Tabla 14 se tabulan las características físicas que deben cumplir los materiales que potencialmente sustituyen al cemento de forma parcial en un concreto normal, a partir del contraste con (Bayapureddy et al., 2020; Memon & Khan, 2018) que usaron en su estudio un material con actividad puzolánica mayor al 75%. En cuanto a la densidad del material, este fluctúa en un rango de 1800-3000 kg/m³, siendo la RHA el material quien más se aproxima a la densidad del cemento tipo I (marca SOL), según el ensayo desarrollado en la presente investigación y cotejado con los investigadores (Lu et al., 2021; Makul, 2019). En cuanto a la finura del material, para lograr la muestra que cumpla con la especificación, después de que el material del residuos agroindustrial, pase por la calcinación es importante que primero se aplique un proceso de molienda de la ceniza antes de que pase por la malla #325, cuando se pase el material por este tamiz se considera válido el material siempre que él % 34 como máximo se quede retenido en dicho tamiz (Dharmaraj et al., 2023). A partir de esta discusión se asegura que los materiales de las cenizas de residuos agroindustriales son idóneos como adición al concreto y sustituto parcial del cemento.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se observa en la Figura 6 que la ceniza con mayor significancia en la mejora de esta resistencia es la RHA, seguido de la SCBA y CCA en la adición del 6%, pero también se observa que con la adición del 4% esta propiedad mecánica empieza a aumentar en los tres residuos investigados, los cuales aumenta el valor del f'_c del concreto cuando llegan al 6%; después de esta exploración la RHA y SCBA superan al patrón, pero la muestra de CCA evidencia que decae en su resistencia aún más cuando se experimenta el 10% de adición a más, lo que a partir de la exploración y contraste con otras investigación de (Abdalla et al., 2022; Andrade Neto et al., 2021; Diniz et al., 2022; Memon et al., 2019; Oyebisi et al., 2017) se concluye que el rango de adición de las cenizas de residuos agroindustriales estaría entre un rango de 5%-10% para asegurar una mejora significativa en la resistencia a la compresión. La variación de la RHA seguido de la SCBA, no obstante, los investigadores consideran que se debe tener en cuenta los efectos negativos del uso de CCA, después de añadir de 8% a más en el concreto, lo cual se puede entender como un material que debe primero ser tratado antes de su uso como material cementante suplementario.

Los resultados de la resistencia a la tracción indirecta para cada residuo investigado y de cada % de experimentación, en esta gráfica se observa que la variación de los resultados entre los residuos es algo variable, se muestra que la RHA al 6% es representativo, seguido de esta es la SCBA, detrás en la CCA, sin embargo se muestra que en el residuo mencionado últimamente llegar al 10% de adición reduce negativamente la propiedad respecto al patrón lo que implica que este material presenta % de adición menos restrictivos que la RHA y SCBA, los cuales proporcionan mejoras similares para la resistencia a la tracción al concreto, que coincide con los investigadores (Arifin & Sanwani, 2023; Jagadesh et al., 2023; Karim et al., 2024). En la Figura 9, se muestra que con la adición del 6% se logra una mejora similar y representativa, sin embargo, a partir de la adición del 8% todos los residuos muestran una mejora importante que debe tenerse en cuenta para no ser usada en futuras investigaciones con estos materiales.

Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión del concreto mejora significativamente con la adición de RHA y SCBA, alcanzando incrementos del 10.79% y 10% respectivamente a un 6% de sustitución. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que destacan la efectividad de estas cenizas como aditivos puzolánicos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (Gedefaw et al., 2022; Asfaw et al., 2022). Sin embargo, el rendimiento de la CCA fue inferior, lo que sugiere que su aplicación debería limitarse a situaciones donde no se requiera alta resistencia.

El análisis microestructural mediante difracción de rayos X (XRD) y espectroscopia infrarroja (FTIR) confirmó la presencia de sílice amorfa en las cenizas, esencial para la reactividad puzolánica. Estos resultados son consistentes con la literatura que destaca la importancia de la sílice amorfa en la mejora de la durabilidad y resistencia del concreto (Li et al., 2022; Hu et al., 2020). La imagen SEM mostró una distribución homogénea de las partículas de ceniza en la matriz del concreto, lo cual es crucial para lograr una buena integración y mejorar las propiedades mecánicas. La investigación realizada se alinea con estudios recientes en el campo de materiales de construcción sostenibles. Investigaciones han demostrado consistentemente que la adición de cenizas de residuos agroindustriales puede mejorar las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto. Por ejemplo, un estudio reciente

destacó que el uso de RHA en concreto puede aumentar la resistencia a la compresión y reducir la permeabilidad (Abolhasani et al., 2022). Similarmente, estudios sobre SCBA indican que su uso puede mejorar la resistencia y durabilidad del concreto, aunque su efectividad depende en gran medida de las condiciones de calcinación y la finura de las cenizas (Rajasekar et al., 2019).

En cuanto a la RHA, las imágenes SEM revelan partículas angulares y porosas. Esta morfología es indicativa de una estructura rica en sílice amorfa, lo cual es corroborado por estudios previos que destacan la capacidad de la RHA para mejorar las propiedades puzolánicas del concreto (Agashua et al., 2024). El análisis EDS muestra un alto contenido de oxígeno y silicio, con trazas de aluminio y hierro, lo que confirma la presencia de sílice amorfa. Estas características permiten una mejor reacción con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementantes adicionales que mejoran la durabilidad y resistencia del concreto (Al-Alwan et al., 2022). Por otro lado, la SCBA presenta una morfología compleja con estructuras cúbicas y esféricas de textura rugosa, según los análisis SEM. Este tipo de morfología sugiere la presencia de fases tanto amorfas como cristalinas, lo cual ha sido documentado en investigaciones anteriores que señalan la diversidad química de la SCBA como un factor clave para mejorar la durabilidad y resistencia del concreto (Arifin & Sanwani, 2023). El análisis EDS de la SCBA revela la presencia de oxígeno, silicio, aluminio y magnesio. Esta complejidad química permite interacciones diversas dentro de la matriz del concreto, mejorando sus propiedades mecánicas y de durabilidad (Sobuz et al., 2024).

La CCA se distingue por presentar partículas con superficies lisas y estructuras porosas en las imágenes SEM. Esta morfología sugiere la presencia de fases amorfas y cristalinas que contribuyen a mejorar la microestructura del concreto. Los resultados del análisis EDS muestran una composición rica en oxígeno, silicio, calcio y hierro. La presencia significativa de calcio indica la formación potencial de carbonatos, que son conocidos por aumentar la resistencia a la compresión del concreto (Memon et al., 2019). Estas características permiten que la CCA llene mejor los vacíos dentro de la matriz del concreto, resultando en una estructura más densa y robusta, lo cual es consistente con estudios recientes sobre el uso de CCA en materiales cementantes (Mohan & Chandrasekaran, 2022).

Los resultados de la SEM y la espectroscopía de dispersión de energía (EDS) muestran cómo la morfología y la composición elemental de las cenizas agroindustriales afectan las propiedades del concreto. La RHA presenta partículas angulares y porosas ricas en sílice amorfa, lo que mejora las propiedades puzolánicas del concreto al reaccionar eficientemente con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementantes adicionales (Agashua et al., 2024; Al-Alwan et al., 2022). La SCBA muestra estructuras cúbicas y esféricas con textura rugosa, combinando fases amorfas y cristalinas que aumentan la durabilidad y resistencia del concreto debido a su complejidad química (Arifin & Sanwani, 2023; Sobuz et al., 2024). La CCA tiene partículas lisas y porosas que llenan mejor los vacíos en la matriz del concreto, mejorando la distribución de tensiones y la resistencia a la compresión, gracias a la presencia de sílice y carbonatos (Memon et al., 2019; Mohan & Chandrasekaran, 2022). Estas diferencias en la morfología permiten una mejor adherencia y cohesión en el concreto, resaltando la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de ceniza para optimizar las propiedades del material cementante (Spósito et al., 2023). Se considera que, la morfología y la composición elemental de las cenizas agroindustriales influyen significativamente en la microestructura y el rendimiento del concreto.

En cuanto a la RHA presenta una microestructura caracterizada por partículas angulares y porosas, como se observa en las imágenes SEM. Esta morfología particular es atribuida a la alta concentración de sílice amorfa en la RHA, que es crucial para sus propiedades puzolánicas. Las partículas angulares aumentan la superficie de contacto, lo que mejora la interacción con el hidróxido de calcio presente en la matriz del concreto, resultando en la formación de compuestos cementantes adicionales como el silicato de calcio hidratado (C-S-H) (Agashua et al., 2024). Además, la porosidad de las partículas facilita la absorción de agua, lo que puede mejorar la trabajabilidad de las mezclas de concreto. El espectro EDS del punto 4 muestra picos significativos de oxígeno y silicio, confirmando la presencia dominante de sílice amorfa, con trazas de aluminio y hierro que también contribuyen a la reactividad de la ceniza (Al-Alwan et al., 2022).

Respecto a la SCBA se distingue por una microestructura compuesta de partículas cúbicas y esféricas con una textura superficial rugosa, como se puede ver en las imágenes SEM. Esta variada morfología indica la presencia de fases tanto amorfas como cristalinas, que son beneficiosas para mejorar la durabilidad y la resistencia del concreto (Arifin & Sanwani, 2023). Las partículas esféricas facilitan una mejor distribución en la matriz del concreto, reduciendo los vacíos y mejorando la cohesión interna del material. La textura rugosa aumenta la adherencia entre las partículas y la pasta de cemento, mejorando la integridad estructural del concreto. El análisis EDS del punto 4 revela la presencia de oxígeno, silicio, aluminio y magnesio, lo que sugiere una compleja química de óxidos que interactúan favorablemente con los componentes del concreto, aumentando su resistencia y durabilidad (Sobuz et al., 2024).

Sobre la ceniza CCA muestra una microestructura con partículas de superficies lisas y estructuras porosas, como se observa en las imágenes SEM. Esta morfología es indicativa de una mezcla de fases amorfas y cristalinas, que ayudan a mejorar la microestructura del concreto (Memon et al., 2019). Las partículas lisas y porosas permiten una mejor compactación dentro de la matriz del concreto, llenando los vacíos y distribuyendo de manera uniforme

las tensiones internas, lo que incrementa la resistencia a la compresión y la durabilidad del material. El espectro EDS del punto 4 muestra picos de oxígeno, silicio, calcio y hierro, indicando la presencia de sílice y carbonatos, los cuales son conocidos por contribuir a la formación de compuestos cementantes que refuerzan la matriz del concreto (Mohan & Chandrasekaran, 2022).

Las propiedades mecánicas del concreto mejorado con ceniza de cáscara de arroz (RHA) son notablemente superiores en términos de resistencia a la compresión y durabilidad. Investigaciones realizadas por Agashua et al. (2024) han demostrado que la adición de RHA al concreto resulta en un aumento significativo de la resistencia a la compresión debido a la alta reactividad de la sílice amorfa presente en la RHA. Esta reactividad facilita la formación de más productos de hidratación, como el silicato de calcio hidratado (C-S-H), que densifican la matriz del concreto. Al-Alwan et al. (2022) también señalan que la porosidad de las partículas de RHA contribuye a una mejor trabajabilidad y cohesión de la mezcla, lo que resulta en un concreto más uniforme y con menos defectos internos.

La ceniza de bagazo de caña de azúcar (SCBA) ofrece beneficios significativos en términos de mejora de la durabilidad y resistencia del concreto. Arifin y Sanwani (2023) han destacado que la presencia de fases amorfas y cristalinas en la SCBA proporciona una química compleja que interactúa favorablemente con los componentes del concreto, aumentando su durabilidad y resistencia. La textura rugosa de las partículas de SCBA mejora la adherencia entre los componentes del concreto, lo que resulta en una mayor cohesión y resistencia estructural. Sobuz et al. (2024) también indican que la presencia de aluminio y magnesio en la SCBA contribuye a la formación de compuestos adicionales que refuerzan la matriz del concreto, mejorando su resistencia a largo plazo.

La ceniza de CCA se distingue por su capacidad para mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto. Memon et al. (2019) han demostrado que las partículas lisas y porosas de la CCA permiten una mejor compactación y distribución de tensiones en la matriz del concreto, resultando en una estructura más densa y robusta. La presencia de sílice y carbonatos en la CCA, como se señala en los estudios de Mohan y Chandrasekaran (2022), contribuye a la formación de compuestos cementantes adicionales que mejoran la resistencia y durabilidad del concreto.

6. Conclusiones

Se concluye que, a partir del análisis inferencial de los resultados para cada ensayo representativo de las propiedades mecánicas contrastadas con la muestra de control, se define que el 6% es una adición representativa y significativa que logra la mejora de las propiedades mecánicas del concreto convencional con la adición experimental y controlada de cada uno de los residuos experimentados. A partir de los ensayos de muestras experimentales con la adición sustitutiva del 6% de residuos agrícola, es posible mejoras en las propiedades mecánicas sobre el diseño convencional del concreto convencional. Con este porcentaje se puede describir el contraste entre las características microestructurales de la muestra patrón y la experimental con el porcentaje óptimo, es decir, de los resultados se evidencia que los enlaces "C=O" y "-C-O-C-" son importantes en la formación del clínker del concreto, pero más importante es en los primeros días, debido a la ganancia temprana de la resistencia del concreto, la formación del enlace "Si-O-" lo que asegura la formación de los Silicatos Dicalcicos propio del clínker y mejora la resistencia temprana del concreto. Las cenizas de RHA, SCBA y CCA mejoran las características microestructurales del concreto. Se observó un aumento en la formación de enlaces de silicio-oxígeno, indicando una alta cantidad de sílice amorfa que es crucial para la reactividad puzolánica.

7. Recomendaciones

Se recomienda que en futuras investigaciones se reduzca el intervalo de experimentación entre 5 y 8% de adición de los residuos estudiados para establecer un rango más preciso.

Se recomienda que adicionalmente a las características físicas y químicas se realice sobre los materiales residuales de estudio ensayos microestructurales de FTIR, TGA y SEM para una caracterización más completa del material, con el fin de complementar la interpretación en el análisis de los resultados de las propiedades mecánicas antes de análisis estadístico inferencial de datos. Es crucial controlar la temperatura y el tiempo de calcinación para maximizar la producción de sílice amorfa y minimizar la presencia de impurezas que puedan afectar negativamente las propiedades del concreto.

Se recomienda complementar la presente investigación con la información de la microestructura de cada residuo investigado con su respectivo % de experimentación con el fin de analizar las características de la interacción interfacial de la ceniza en la interfase cementante que genera el clínker.

8. Referencias bibliográficas

- Abdalla, T. A., Koteng, D. O., Shitote, S. M., & Matallah, M. (2022). Mechanical Properties of Eco-friendly Concrete Made with Sugarcane Bagasse Ash. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(6), 1227–1239.
- Abolhasani, A., Samali, B., & Aslani, F. (2022). Rice Husk Ash Incorporation in Calcium Aluminate Cement Concrete: Life Cycle Assessment, Hydration and Strength Development. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2).
- Adhikary, S. K., Ashish, D. K., & Rudz̄ionis, Z. (2022). A review on sustainable use of agricultural straw and husk biomass ashes: Transitioning towards low carbon economy. *Science of the Total Environment*, 838(February).
- Agashua, L. O., Arum, C., Oluyemi-Ayibiowu, B. D., & Ikumapayi, C. M. (2024). Workability and durability analysis of waste based geopolymer concrete. *Sinergi (Indonesia)*, 28(1), 199–208.
- Aguirre-Braggiant, H., Martinez-Odalís, C., Pehovaz-Alvarez, H., & Raymundo, C. (2021). Comparative Model of the Physical-Mechanical Properties of Shotcrete with content of steel fibers and polypropylene used in the support of underground mining operations in Peru. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July(December)*.
- Agwa, I. S., Omar, O. M., Tayeh, B. A., & Abdelsalam, B. A. (2020). Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 235, 117541.
- Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction and Building Materials*, 178, 1–9.
- AIRE, C., & AGUADO, A. (2013). Método de doble punzonamiento de tracción indirecta para concreto. *October 2014*.
- Al-Alwan, A. A. K., Al-Bazoon, M., I.Mussa, F., Alalwan, H. A., Hatem Shadhar, M., Mohammed, M. M., & Mohammed, M. F. (2022). The impact of using rice husk ash as a replacement material in concrete: An experimental study. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, xxxx, 0–6.
- Andrade Neto, J. da S., de França, M. J. S., Amorim Júnior, N. S. de, & Ribeiro, D. V. (2021). Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 266.
- Arifin, D. N., & Sanwani, E. (2023). Potential utilization of natural zeolite, fly ash and rice husk ash for geopolymer concrete production. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 86–92.
- Asfaw, F. B., Hareru, W. K., & Ghebrab, T. (2022). Physical and Chemical Characterization of Coffee Husk Ash Effect on Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(1), 167–184.
- Aswin, M., Maranatha, E. S., & Nola, L. (2021). Effect of use of corn leaf ash on concrete compressive strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1122(1), 012026.
- Bagcal, O. R., & Baccay, M. A. (2019). Effect of maize cob ash as supplementary cementitious material on the mechanical properties of concrete. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 10(2), 83–97.
- Balagopal, V., Rahim, A., & Viswanathan, T. S. (2017). Sustainable supplementary cementitious materials derived from agro-wastes - A review. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(12), 572–582.
- Bayapureddy, Y., Muniraj, K., & Mutukuru, M. R. G. (2020). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in cement composites: strength, durability, and microstructural analysis. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57(5), 513–519.
- Carrillo, J., & Silva-Páramo, D. (2016). Ensayos a flexión de losas de concreto sobre terreno reforzadas con fibras de acero. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(3), 317–330.
- Castillo Piscocoya, G. E., Chavarry Koosi, J. C., Peralta Panta, J. K., & Muñoz Pérez, S. P. (2021). Uso de residuos agroindustriales en las propiedades mecánicas del concreto: Una revisión literaria. *Revista Ingeniería*, 5(13), 123–142.
- Dharmaraj, R., Dinesh, M., Sampathkumar, S., Hariprasath, M., & Chandraprakash, V. (2023). High performance concrete using rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.
- Dineshkumar, R., & Balamurugan, P. (2021). Behavior of high-strength concrete with sugarcane bagasse ash as replacement for cement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2), 1–12.
- Diniz, H. A. A., dos Anjos, M. A. S., Rocha, A. K. A., & Ferreira, R. L. S. (2022). Effects of the use of agricultural ashes, metakaolin and hydrated-lime on the behavior of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 319(September 2021), 126087.

- Gedefaw, A., Worku Yifru, B., Endale, S. A., Habtegebreal, B. T., & Yehualaw, M. D. (2022). Experimental Investigation on the Effects of Coffee Husk Ash as Partial Replacement of Cement on Concrete Properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- Hakeem, I. Y., Agwa, I. S., Tayeh, B. A., & Abd-Elrahman, M. H. (2022). Effect of using a combination of rice husk and olive waste ashes on high-strength concrete properties. *Case Studies in Construction Materials*, 17(August), e01486.
- Hakeem, I. Y., Amin, M., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., Maglad, A. M., & Agwa, I. S. (2022). Effects of nano sized sesame stalk and rice straw ashes on high-strength concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 370(October 2021), 133542.
- Hidalgo, S., Soriano, L., Monzó, J., Payá, J., Font, A., & Borrachero, M. V. (2021). Evaluation of rice straw ash as a pozzolanic addition in cementitious mixtures. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2), 1–17.
- Hu, L., He, Z., Shao, Y., Cai, X., & Zhang, S. (2021). Microstructure and properties of sustainable cement-based materials using combustion treated rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 294, 123482.
- Hu, L., He, Z., & Zhang, S. (2020). Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121744.
- Hussien, N. T., & Oan, A. F. (2022). The use of sugarcane wastes in concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1), 1–9.
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., Rajasulochana, P., Hasan, M. A., Murugesan, R., Khan, A. H., Magbool, H. M., & Khan, N. A. (2023). Effect of processed sugarcane bagasse ash on compressive strength of blended mortar and assessments using statistical modelling. *Case Studies in Construction Materials*, 19(April), e02435.
- Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 115(March), 389–400.
- Karim, R., Islam, M. H., Datta, S. D., & Kashem, A. (2024). Synergistic effects of supplementary cementitious materials and compressive strength prediction of concrete using machine learning algorithms with SHAP and PDP analyses. *Case Studies in Construction Materials*, 20(October 2023), e02828.
- Kassa, Y. (2019). Application of cane molasses as concrete retarder admixture. *SN Applied Sciences*, 1(12).
- Kim, H. T., Razakamandimby R., D. F. T., Szilágyi, V., Kis, Z., Szentmiklósi, L., Glinicki, M. A., & Park, K. (2021). Reconstruction of concrete microstructure using complementarity of X-ray and neutron tomography. *Cement and Concrete Research*, 148.
- Li, J., Luo, C., Jie, J., & Cui, H. (2023). Rheological Properties and Microscopic Morphology Evaluation of UHMWPE-Modified Corn Stover Oil Bio-Asphalt. *Buildings*, 13(9).
- Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhang, X., & Si, Z. (2022). Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in construction technology: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 56(February), 104774.
- Liu, J., Xie, X., & Li, L. (2022). Experimental study on mechanical properties and durability of grafted nano-SiO₂ modified rice straw fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 347(February), 128575.
- Lu, L., Ma, Q., Hu, J., & Li, Q. (2021). Mechanical properties, curing mechanism, and microscopic experimental study of polypropylene fiber coordinated fly ash modified cement-silty soil. *Materials*, 14(18).
- Luo, Q., Wu, Y. Y., Qiu, W., Huang, H., Pei, S., Lambert, P., & Hui, D. (2021). Improving flexural strength of UHPC with sustainably synthesized graphene oxide. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 754–767.
- Ma, Z., Huang, H., Hu, X., & Yang, H. (2023). Experiment study on the mechanical properties and alkali silica reaction (ASR) of mortar blended rice husk ash (RHA). *Case Studies in Construction Materials*, 18(February), e02028.
- Makul, N. (2019). Combined use of untreated-waste rice husk ash and foundry sand waste in high-performance self-consolidating concrete. *Results in Materials*, 1(July), 100014.
- Martínez-Ramírez, S., Frías, M., Nakanishi, E. Y., & Savastano, H. (2019). Pozzolanic Reaction of a Biomass Waste as Mineral Addition to Cement Based Materials: Studies by Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(1).
- Memon, S. A., Javed, U., & Khushnood, R. A. (2019). Eco-friendly utilization of corncob ash as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 165–177.
- Memon, S. A., & Khan, M. K. (2018). Ash blended cement composites: Eco-friendly and sustainable option for utilization of corncob ash. *Journal of Cleaner Production*, 175, 442–455.

- Miller, S. A., Cunningham, P. R., & Harvey, J. T. (2019). Resources , Conservation & Recycling Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation & Recycling*, 146(March), 416–430.
- Mohan, S., & Chandrasekaran, P. (2022). Effect of Artificial Fibers and Corn Cob Ash on Mechanical Behavior of High Performance Concrete. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(4), 3713–3721.
- Montero Flores, S. Y. (2019). Evaluación de las propiedades del concreto empleando ceniza de cáscara de arroz como sustituto del cemento en porcentajes para las edificaciones en la ciudad de Chiclayo. Universidad Señor de Sipán.
- Mounika, G., Baskar, R., & Sri Kalyana Rama, J. (2022). Rice husk ash as a potential supplementary cementitious material in concrete solution towards sustainable construction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1).
- Murthi, P., Poongodi, K., & Gobinath, R. (2020). Effects of Corn Cob Ash as Mineral Admixture on Mechanical and Durability Properties of Concrete - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1006(1).
- Nasir Amin, M., Ur Rehman, K., Shahzada, K., Khan, K., Wahab, N., & Abdulalim Alabdullah, A. (2022). Mechanical and microstructure performance and global warming potential of blended concrete containing rice husk ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 346(July), 128470.
- Nikhade, A., & Pammar, L. (2022). Parametric study of concrete by using SCBA, metakaolin, rice husk ash in concrete – A review. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1793–1799.
- Nikhade, H. R., & Ram Rathan Lal, B. (2022). Effect of addition of glass fibre on sugar cane bagasse ash under compressive loading. *Materials Today: Proceedings*, 61, 1109–1114.
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315–318.
- Oyebisi, S. O., Olutoge, F. A., Ofuyatan, O. M., & Abioye, A. A. (2017). Effect of corncob ash blended cement on the properties of lateritic interlocking blocks. *Progress in Industrial Ecology*, 11(4), 373–387.
- Polat, S. (2021). A Research on the Usage of Corn Cob in Producing Lightweight Concrete. *Natural Resources*, 12(10), 339–347.
- Praveenkumar, S., & Sankarasubramanian, G. (2019). Mechanical and durability properties of bagasse ash-blended high-performance concrete. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1–7.
- Quedou, P. G., Wirquin, E., & Bokhoree, C. (2021). Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00545.
- Raheem, A. A., & Ikotun, B. D. (2020). Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar – A review. *Journal of Building Engineering*, 31(July 2019), 101428.
- Rajasekar, A., Arunachalam, K., Kottaisamy, M., & Saraswathy, V. (2018). Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 171, 350–356.
- Rithuparna, R., Jittin, V., & Bahurudeen, A. (2021). Influence of different processing methods on the recycling potential of agro-waste ashes for sustainable cement production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 316(July), 128242.
- Rodríguez de Sensale, G., & Rodríguez Viacava, I. (2018). A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, 166, 873–888.
- Rolón, B. G., & Castañeda, P. F. (2021). Mechanical resistance and corrosion of concrete added with ashes of corn, sorghum, and wheat. *Cleaner Materials*, 2(April), 1–11.
- Rushendramani, V., Ganesh Naidu, G., & Tech, J. M. (2014). Partial Replacement of Cement with Corn Cob Ash and Saw Dust Ash and Fine Aggregates with Steel Slag in Concrete. *International Journal of Engineering Trends and Applications (IJETA)*, 5(March).
- Salas Fortón, E. J. (2018). Incremento de resistencia a la compresión del concreto obtenido a través de adición de ceniza de rastrojo de maíz. *Yachay - Revista Científico Cultural*, 6(01), 160–166.
- Saloni, Parveen, Yan Lim, Y., & Pham, T. M. (2021). Influence of Portland cement on performance of fine rice husk ash geopolymer concrete: Strength and permeability properties. *Construction and Building Materials*, 300(July), 124321.
- Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. En S. . McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES (Ed.), McGRAW-HILL (Primera).

- Sangeetha, R. K., Karthi, S., Mounishbalaji, K. S., Praveenraj, K. S., & Ragunath, M. (2020). Experimental study on partial replacement of cement with rice husk ash in paver blocks. *AIP Conference Proceedings*, 2259(11), 152–156.
- Setayesh Gar, P., Suresh, N., & Bindiganavile, V. (2017). Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 153, 929–936.
- Shafiq, N., Hussein, A. A. E., Nuruddin, M. F., & Al Mattarneh, H. (2018). Effects of sugarcane bagasse ash on the properties of concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 171(3), 123–132.
- Singh, K., Singh, J., & Kumar, S. (2018). Evaluation of corn cob ash as partial replacement of cement in concrete. *Agricultural Research Journal*, 55(4), 737.
- Sobuz, M. H. R., Al-Imran, Datta, S. D., Jabin, J. A., Aditto, F. S., Sadiqul Hasan, N. M., Hasan, M., & Zaman, A. A. U. (2024). Assessing the influence of sugarcane bagasse ash for the production of eco-friendly concrete: Experimental and machine learning approaches. *Case Studies in Construction Materials*, 20(November 2023), e02839.
- Sounthararajan, V. M., Ramadasu, T. L., & Sivasankar, S. (2019). Strength development properties of sugar cane bagasse ash blended geopolymer concrete containing waste steel fibers. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6), 1151–1156.
- Spósito, C. C. A., Fazzan, J. V., Rossignolo, J. A., Bueno, C., Spósito, F. A., Akasaki, J. L., & Tashima, M. M. (2023). Ecodesign: Approaches for sugarcane bagasse ash mortars a Brazilian context. *Journal of Cleaner Production*, 385(May 2022).
- Sua-iam, G., Makul, N., Cheng, S., & Sokrai, P. (2019). Workability and compressive strength development of self-consolidating concrete incorporating rice husk ash and foundry sand waste – A preliminary experimental study. *Construction and Building Materials*, 228, 116813.
- Syahida Adnan, Z., Ariffin, N. F., Syed Mohsin, S. M., & Abdul Shukor Lim, N. H. (2021). Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 48(xxxx), 842–848.
- Tarekegn, M., Getachew, K., & Kenea, G. (2022). Experimental Investigation of Concrete Characteristics Strength with Partial Replacement of Cement by Hybrid Coffee Husk and Sugarcane Bagasse Ash. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- Tayeh, B. A., Hakamy, A. A., Fattouh, M. S., & Mostafa, S. A. (2023). The effect of using nano agriculture wastes on microstructure and electrochemical performance of ultra-high-performance fiber reinforced self-compacting concrete under normal and acceleration conditions. *Case Studies in Construction Materials*, 18(November 2022).
- Torres de Sande, V., Sadique, M., Pineda, P., Bras, A., Atherton, W., & Riley, M. (2021). Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. *Journal of Building Engineering*, 39(September 2020), 102277.
- Trapero-casas, A., Escobar, R. F., & J. Dominguez. (2015). Experimentación en Agricultura (Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. (ed.); Número January 2010). Secretaría General Técnica. Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Tripathy, A., & Acharya, P. K. (2022). Characterization of bagasse ash and its sustainable use in concrete as a supplementary binder – A review. *Construction and Building Materials*, 322(July 2021), 126391.
- Vieira, A. P., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Cordeiro, G. C. (2020). Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. *Construction and Building Materials*, 236, 117553.
- Wu, N., Ji, T., Huang, P., Fu, T., Zheng, X., & Xu, Q. (2022). Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 317(August 2021), 125881.
- Xu, Q., Ji, T., Gao, S. J., Yang, Z., & Wu, N. (2018). Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, 12(1), 1–19.
- Zareei, S. A., Ameri, F., & Bahrami, N. (2018). Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 184, 258–268.

Zunino, F., & Lopez, M. (2017). A methodology for assessing the chemical and physical potential of industrially sourced rice husk ash on strength development and early-age hydration of cement paste. *Construction and Building Materials*, 149, 869–881.