

Empleo De La Ceniza De Bagazo De Caña Como Material Cementante Suplementario En Hormigones

*Use Of Sugar Cane Bagasse Ash As A Supplementary
Cementing Material In Concrete*

Autores

Giovany Alemán Carmenate

Ing. Civil, Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT),
Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (CUJAE)

giovanyal@civil.cujae.edu.cu

<https://orcid.org/0009-0008-6177-2975>

René Antonio Puig Martínez

Ing. Civil, Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT),
Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (CUJAE)

rpuig@civil.cujae.edu.cu; rpuig200453@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9025-4433>

Marietta Llanes Pérez

Ing. Civil, Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT),
Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría (CUJAE)

marietta@civil.cujae.edu.cu; mariettallanes67@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3917-8175>

Empleo De La Ceniza De Bagazo De Caña Como Material Cementante Suplementario En Hormigones

2

Use Of Sugar Cane Bagasse Ash As A Supplementary Cementing Material In Concrete

RESUMEN

La industria de la construcción es dinámica y continuamente se investigan nuevos materiales con el fin de obtener mejores prestaciones. Dentro de estos materiales se encuentran los llamados cementantes suplementarios, que adicionados al hormigón pueden sustituir proporciones de cemento portland, manteniendo o mejorando sus propiedades. Investigaciones realizadas demuestran que la ceniza del bagazo de caña, bajo adecuadas condiciones de quema, adquiere potencialidades pozzolánicas. En este caso, a solicitud de la Empresa de Construcción y Montaje de Artemisa, Cuba, se investiga la actividad cementante de la ceniza de bagazo de caña obtenida directamente de los hornos de uno de los centrales de la provincia, sin temperatura controlada de quema. Los ensayos realizados demuestran que esta ceniza posee un índice de actividad resistente con el cemento un 10% superior al mínimo establecido por la normativa. Para evaluar la influencia de su empleo en la resistencia a compresión y durabilidad, se realizaron siete diseños de mezcla con dosificación de 0% al 30% de ceniza de bagazo de caña en sustitución del cemento portland. Fueron medidas la resistencia a compresión y la velocidad del pulso ultrasónico, mostrando los resultados que con niveles de sustitución de hasta un 20%, se incrementa la resistencia a compresión respecto a la obtenida para la dosificación patrón; en todos los niveles de sustitución, los valores medios de velocidad del pulso ultrasónico clasifican como durables los hormigones producidos. Con ello se demuestra que la ceniza del central puede sustituir hasta un 20% el cemento empleado en la producción de hormigones.

Palabras claves: ceniza de bagazo de caña, puzolana, resistencia a compresión.

ABSTRACT

The construction industry is dynamic and new materials are continually being researched to achieve improved performance. These materials include so-called supplementary cementitious agents, which, when added to concrete, can replace proportions of portland cement, maintaining or improving its properties. Research has shown that sugarcane bagasse ash, under appropriate burning conditions, acquires pozzolanic potential. In this case, at the request of the Construction and Assembly Company of Artemisa, Cuba, the cementitious activity of sugarcane bagasse ash obtained directly from the kilns of one of the province's sugar mills, without a controlled burning temperature, is being investigated. The tests conducted show that this ash has a strength activity index with cement 10% higher than the minimum established by regulations. To evaluate the influence of its use on compressive strength and durability, seven mix designs were developed with dosages ranging from 0% to 30% of sugarcane bagasse ash as a replacement for portland cement. Compressive strength and ultrasonic pulse velocity were measured, showing that with replacement levels of up to 20%, compressive strength increases compared to that obtained with the standard dosage; at all replacement levels, the average ultrasonic pulse velocity values classify the concrete produced as durable. This demonstrates that mill ash can replace up to 20% of the cement used in concrete production.

Keywords: sugarcane bagasse ash, pozzolan, compressive strength.

Nota Editorial: Recibido: 23 de Abril 2025 Aceptado: 19 de Junio 2025

1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población y la economía a escala global, implica una demanda de infraestructura que, unida al aumento extensivo en la tasa de construcción, provoca el agotamiento de muchos de los recursos naturales tradicionalmente empleados en la industria de la construcción [1]. Dentro de una década, el planeta tendrá 1500 millones de nuevos residentes urbanos y se estima que para el año 2080, se pueda alcanzar la cifra de 10400 millones [2]. La industria de la construcción enfrentará, por tanto, en los próximos años, el problema de la disminución de los recursos naturales para la generación de sus productos, en particular del cemento portland.

El cemento portland es uno de los materiales más empleados en la actualidad y aunque se reconoce que ha sido uno de los materiales que más ha contribuido al desarrollo de la humanidad, es uno de los responsables de la degradación ambiental del planeta, debido a que su producción se basa en la explotación de recursos no renovables y su producción ocasiona la emisión de volúmenes significativos de gases de efecto invernadero [3]. Este impacto medio ambiental negativo, ha conducido a la comunidad científica a investigar el empleo de materiales sustitutos del cemento, los llamados materiales cementantes suplementarios [4].

Durante décadas, el sector cementero y la propia industria del hormigón, en la búsqueda de alternativas para disminuir el efecto invernadero, ha venido implementando la sustitución parcial del clínker por diferentes tipos de materiales cementantes suplementarios [5]. Sin embargo, la disponibilidad de los adecuados ha sido la principal limitación, aunque hay coincidencia que son fundamentales para un hormigón sostenible y duradero, siendo necesario explorar nuevas fuentes debido a la disminución gradual de las centrales eléctricas y la transición en la producción de acero, principales fuentes hasta la actualidad de estos materiales [6].

Las diferentes adiciones minerales pueden clasificarse como fillers o materiales cementantes suplementarios, según no presenten o presenten actividad puzolánica o hidráulica latente. Si bien los materiales inertes no experimentan reacciones puzolánicas o hidráulicas latentes, algunos, como la roca caliza finamente molida, no son completamente inertes por cuanto reaccionan con el aluminato del clínker o de otros materiales cementantes suplementarios. Pero a niveles altos de reemplazo muestran en los hormigones propiedades mecánicas y de durabilidad significativamente menores [6-7]. Por el contrario, las adiciones activas participan en las reacciones puzolánicas o hidráulicas latentes y contribuyen al rendimiento y la durabilidad de los hormigones, incluso a niveles elevados de reemplazo de clínker [7].

Los materiales puzolánicos ricos en sílice, como las cenizas volantes silíceas o las puzolanas naturales y calcinadas, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio que se genera durante el proceso de hidratación del cemento, siempre en presencia de abundante agua, para formar silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. En la mayoría de los materiales puzolánicos, los principales componentes reactivos son las fases amorfas, con algunas excepciones, como el de las zeolitas o escorias de acero ricas en calcio [8-9]. En general, los materiales que contienen grandes cantidades de fases amorfas se consideran ideales como materiales cementantes suplementarios. Sin embargo, esto no significa que puedan utilizarse combinado con el cemento o en la producción del hormigón; deben poseer además propiedades físicas y químicas adecuadas, sin influir negativamente en la laborabilidad de la mezcla, las propiedades mecánicas y la durabilidad.

Muchos materiales adquieren propiedades puzolánicas debido a un adecuado tratamiento térmico, que transforma profundamente su estructura primitiva. Dentro de esta condición cabe distinguir dos grupos: el primero, formado por materiales naturales silicatados de naturaleza arcillosa y esquistosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos; y el segundo, constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales o agrícolas, que, en virtud de su naturaleza y de las transformaciones sufridas en las mismas, adquieren las propiedades puzolánicas [10-12]. En el primero de estos grupos pueden considerarse, por su analogía, las puzolanas designadas como mixtas o intermedias, o semi artificiales; es decir, aquellas que, naturales por su origen, se mejoran por un posterior tratamiento térmico [10]. En el segundo grupo aparecen los residuos de procesos industriales, como las bauxitas utilizadas para la obtención del aluminio y el polvo de chimeneas de altos hornos. También pueden incluirse en este grupo las cenizas volantes y de parrilla de las centrales termoeléctricas y las cenizas de lignitos. Por extensión, las mismas escorias siderúrgicas pueden considerarse dentro del grupo [12].

Los minerales de la arcilla, finamente molidos, inertes en principio, presentan una actividad puzolánica notable cuando se calcinan a temperaturas comprendidas entre 600°C y 900°C. Estas puzolanas están constituidas esencialmente de sílice y alúmina. La pérdida de agua por efecto del tratamiento térmico, provoca la destrucción de la red cristalina de los constituyentes arcillosos, quedando sus componentes en estado amorfo. El empleo de la arcilla calcinada es muy antiguo y muy extendido en países como la India [12].

Las cenizas volantes son producidas en centrales termo eléctricas debido a la combustión de carbón pulverizado y recogidas en colectores mecánicos y/o electrostáticos. Por la elevada temperatura que alcanza la combustión instantánea del carbón, la ganga funde en su mayor parte y da lugar a pequeñas gotas que, en un posterior enfriamiento brusco, se transforma en partículas mayoritariamente vítreas [13-14]. Las cenizas volantes de interés en la industria del cemento están compuestas de partículas vítreas, esféricas o redondeadas y suelen ser ligeras [13]. Las cenizas volantes pulverizadas constituyen el material cementante suplementario más empleado en la industria de cemento como sustituto de clínker en la producción de cementos mezclados [14].

El humo de sílice o microsílíce es otro de los más avanzados materiales cementantes suplementarios. Es un polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso, resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferro silicio [15].

Dentro del segundo grupo de materiales cementantes suplementarios se encuentran los procedentes de la quema controlada o no de diferentes residuos agrícolas. La bibliografía científica recoge evidencias sobre el empleo de cenizas derivadas de la quema de cáscara de arroz, cascarilla de maní, hojas de plátano, bagazo de caña y otros residuos agrícolas como materiales cementantes suplementarios en sustitución del cemento portland en la fabricación de hormigones [16-18]. Cuando estos residuos agrícolas son quemados convenientemente, por lo general a temperaturas controladas, se obtiene una ceniza por lo general rica en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión [17], con adecuadas propiedades puzolánicas. En la Figura 1 pueden apreciarse fotos de cenizas de dos residuos agrícolas: cáscara de arroz y bagazo de caña.



Fig. 1- Cenizas de residuos agrícolas [17]

El artículo que se somete a la consideración de la comunidad científica, toma como base los resultados de un proyecto de investigación promovido por la Empresa de Construcción y Montaje de la Provincia de Artemisa, Cuba. Mediante este proyecto, se pretende evaluar el comportamiento de hormigones, empleando a modo de material cementante suplementario, la ceniza de bagazo de caña proveniente de los hornos de dos centrales azucareros de la provincia, que como promedio en los últimos cinco años muelen anualmente unas 310 000 toneladas de caña, que convertidas en ceniza representan aproximadamente 21 700 t de ceniza. De ser positivos los resultados, podría sustituirse parte del cemento empleado en diferentes dosificaciones por el material proveniente de los hornos de los centrales.

Varios autores han estudiado la influencia del empleo de ceniza de bagazo de caña en las propiedades del hormigón, por lo que a continuación se exponen los resultados de varias investigaciones.

Córdova y Simon (2018) investigaron el efecto de la ceniza de caña de azúcar en la resistencia a compresión de un hormigón de 21 MPa, reemplazando parcialmente el cemento en proporciones de 20% y 40%. Los resultados obtenidos con el reemplazo del cemento portland tipo I en las proporciones anteriormente especificadas, demuestran que la resistencia a la compresión del hormigón disminuye con el incremento de la proporción de ceniza, y siempre por debajo de la resistencia a compresión de la mezcla patrón. Los mejores resultados se obtuvieron con un nivel de reemplazo del 20% [19].

Una segunda investigación se relaciona con el empleo de la ceniza de bagazo de caña en el estudio de la resistencia y absorción de agua en hormigones [20]. En esta investigación se utiliza ceniza de bagazo de caña de azúcar obteniendo resultados positivos con 5% y 10% del volumen del cemento utilizado en la mezcla. Los especímenes fueron ensayados a edades de 30, 90, 120 días. A los 30 días los resultados obtenidos en la absorción de agua y resistencia a compresión fueron similares a los obtenidos en la mezcla de control. A edad de 90 días, las mezclas con porcentajes de sustitución del 5% y 10% redujeron los valores de absorción de agua, especialmente con 10% de ceniza, en que se alcanzó un 58% menos que a edad de 30 días. En la resistencia a compresión, el porcentaje de adición óptima fue el de 5% a edad de 90, aumentando un 41% respecto a la edad de 30 días. A edad de 120 días, el incremento de la resistencia fue de un 45%, alcanzando un valor promedio de 34,7 MPa; es decir, un 36% mayor que la resistencia a compresión de la mezcla de control, que fue de 25,4 MPa.

Una tercera investigación de empleo de ceniza de bagazo de caña en hormigones lo resume Espinoza (2022), en este caso dirigido a evaluar su empleo en las propiedades físicas y mecánicas de este material. Este autor emplea diferentes niveles de sustitución de ceniza por cemento. Con 5% de sustitución, logra resistencia a compresión evidentemente superior a la obtenida en la mezcla patrón; ya con 10% de sustitución, la resistencia a compresión obtenida es comparable con la obtenida en la mezcla patrón; a partir de ahí, disminuye. Otro resultado importante de este investigador, es que la temperatura de calcinación óptima oscila alrededor de 800°C; a esta temperatura, el contenido de sílice amorfa en la ceniza alcanza el 67% [21].

Otro artículo [22] describe investigaciones con el empleo de ceniza de bagazo de caña de azúcar como sustituto del cemento portland en la elaboración del hormigón estructural. En el artículo se analiza la actividad puzolánica en las distintas muestras y se comparan estos resultados con los de otras investigaciones similares. La investigación tiene en cuenta aspectos importantes, como la contaminación ambiental que podría generar este residuo, las proporciones de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) que aparecen una vez efectuada la quema y el proceso de obtención de la ceniza. Los resultados obtenidos no recomiendan el uso de este residuo en la elaboración de hormigones estructurales debido a la disminución de la resistencia a compresión; pero si admiten su empleo en la producción de morteros.

En la investigación realizada por Rodier, Villar, Mejía & Savastano (2019), se presenta el estudio de la actividad puzolánica y la hidratación de pastas de cemento que contienen bagazo de caña de azúcar y cenizas de hojas de bambú. La actividad puzolánica de mezclas binarias y ternarias de cenizas se investiga mediante mediciones de conductividad eléctrica. Se utiliza un modelo cinético difusivo para cuantificar la reacción puzolánica entre las cenizas y la solución de hidróxido de calcio. También se investiga la influencia de las cenizas en la hidratación de pastas cementosas mediante análisis de termogravimetría, difracción de rayos X, calorimetría isotérmica y ensayos mecánicos. Los resultados mostraron que las mezclas ternarias de ceniza de bagazo de caña y de hojas de bambú tienen una mayor actividad puzolánica que la mezcla binaria sólo con ceniza de bagazo de caña. Los morteros binarios y ternarios obtenidos muestran valores de resistencia a la compresión mayores que el mortero de control sin aditivos minerales. Además, la sustitución del cemento por 10% en peso de ambas cenizas, conduce a una disminución del contenido de hidróxido de calcio y del calor de hidratación. Los resultados también mostraron que la producción de una tonelada de aglomerante con cenizas agroindustriales requiere menos energía que el cemento convencional. Según los resultados del estudio, el uso de cenizas agroindustriales en cementos de mezcla binaria y ternaria puede aportar beneficios económicos, técnicos y ambientales al sector industrial, incluyendo la industria del fibrocemento, las plantas de prefabricados y los productores de hormigón [23].

La evaluación del estado del arte sobre el empleo de ceniza de bagazo de caña en la fabricación de hormigones y morteros, muestra resultados que fueron utilizados en la fundamentación del proyecto a que se hace referencia en párrafos anteriores. En los artículos e investigaciones todos coinciden que la ceniza de bagazo de caña constituye un material con propiedades puzolánicas, en mayor o menor grado en dependencia de la temperatura de quema; los diferentes autores coinciden que los porcentajes de sustitución óptimos no son elevados, todos por debajo del 30%; se aprecia una disminución de la absorción de agua en los hormigones obtenidos; en relación con la resistencia a compresión, hay resultados contradictorios, ya que algunos autores manifiestan su incremento a diferentes edades, y otros no coinciden con ello.

Estos elementos fueron tomados en cuenta en el desarrollo de la investigación, dirigida a evaluar el comportamiento de dos de las propiedades más importantes del hormigón en estado endurecido: la resistencia a compresión, como criterio de diseño; y la velocidad del pulso ultrasónico, como criterio de durabilidad, en ambas, con diferentes porcentajes de sustitución de cemento portland por ceniza de bagazo de caña obtenida directamente de los hornos del central azucarero "30 de Noviembre", de la provincia de Artemisa.

2. DESARROLLO

2.1. Caracterización De La Materia Prima Para El Experimento

La elección de los materiales se efectuó a solicitud de la empresa constructora, con los habitualmente empleados en las obras que se ejecutan en la provincia. Fueron utilizados los siguientes materiales:

- Cemento portland P-35 de uso general proveniente de la fábrica "Curazao SA", del municipio Mariel, provincia de Artemisa.
- Arena triturada y árido grueso provenientes de la cantera "Elpidio Berovides", del municipio San Cristóbal, provincia de Artemisa.
- Aditivo SikaPlast® 9100CU
- Agua potable.
- Ceniza de bagazo de caña, directamente extraída de los hornos del central "30 de Noviembre", del municipio San Cristóbal, provincia Artemisa.

La caracterización de todos los materiales empleados se efectuó en los laboratorios del Centro de Estudios para la Construcción y Arquitectura Tropical, perteneciente a la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría".

El cemento portland empleado cumplía las especificaciones de la norma cubana NC 1340.

Sin embargo, con los áridos la situación no fue igual.

La arena procedente de la cantera "Elpidio Berovides" (La Reforma), posee una granulometría que no cumple las especificaciones granulométricas establecidas en el país para la fabricación de hormigones de cemento portland, con módulo de finura promedio de 4,64 (lo normado es módulo de finura entre 2,2 y 3,58), lo que la clasifica como una arena excesivamente gruesa. No obstante, atendiendo a la solicitud de la empresa que promueve el proyecto de investigación, se decidió mantener el empleo de la misma. Además, se tuvo en cuenta que su influencia es similar en las diferentes dosificaciones. La arena cumple las restantes especificaciones establecidas en la norma cubana NC 251.

El árido grueso recibido, procedente también de la cantera "Elpidio Berovides" (La reforma), corresponde comercialmente como una piedra de hormigón con tamaño máximo de 25,4 mm y límites de fracción nominal 25-10. Posee una granulometría no uniforme que no cumple las especificaciones granulométricas establecidas en el país para estos límites de fracción nominal, con porcentos pasados en la mayoría de los tamices, por encima de lo establecido en las especificaciones. El material más fino que el tamiz 200, con valor promedio de 2,02%, incumple las especificaciones máximas normadas (1%), lo que puede influir negativamente en la resistencia a compresión del hormigón y la adherencia entre piedra y material cementante. Cumple las restantes especificaciones normadas. Aunque no cumple granulometría y tamiz 200, se mantuvo su empleo a solicitud de la empresa.

El aditivo Aditivo SikaPlast® 9100CU, es un superfluidificante de base acrílica reductor de agua de rango medio de alta eficiencia y con permanencia de trabajabilidad, libre de cloruros. Tiene una densidad de 1,13 kg/L.

Para su empleo, la ceniza de bagazo de caña se extrajo directamente de los hornos del central "30 de Noviembre", sin criterios de selección o de temperatura de quema, por cuanto la empresa promotora del proyecto pretende evaluar la factibilidad de su empleo de esta manera. La misma se sometió a un proceso dirigido a garantizar su empleo como material cementante suplementario. La toma de muestra de ceniza para los ensayos se realizó de acuerdo con lo prescrito en la NC TS 527, siendo de tipo compuesto, para lo cual, de cada uno de los sacos recibidos se extrajo una porción de 4 kg, mezclando convenientemente a fin de obtener la muestra representativa para los diferentes ensayos. Ésta se almacenó en un recipiente de plástico hasta el momento de los ensayos. Previo a estos, la muestra representativa se introdujo en la estufa durante 24 horas para eliminar la humedad, verificando ello mediante el procedimiento de masa constante. Posteriormente se sometió a un proceso de pulverización en molino de bolas, almacenando el producto en bolsas de nylon selladas. La muestra pulverizada se sometió a un proceso de tamizado, desechando todo el material retenido en el tamiz de 45 µm; el material pasado por este tamiz, fue el empleado para los ensayos. Como resultado, se obtuvo una masa específica real de 2,24 g/cm³ y un peso unitario compactado de 390 kg/m³.

La determinación del índice de actividad resistente con el cemento portland da criterios del nivel de actividad puzolánica de las muestras de ceniza de bagazo de caña, o lo que es lo mismo, permite inferir si puede o no ser empleada la ceniza en sustitución de cemento portland durante la fabricación de morteros y hormigones. El índice se determina mediante la expresión (1):

$$\text{Índice} = \frac{R_A}{R_P} 100, \% \quad (1)$$

Siendo en ella:

- R_P : Resistencia a compresión media de la muestra patrón, MPa.
- R_A : Resistencia a compresión media de la muestra con adición de ceniza, MPa.

En la determinación del índice de actividad resistente, tanto para la muestra patrón como para la muestra con adición de ceniza, se elaboró, además del ensayo principal, una réplica; y con cada una se confeccionaron tres briquetas. Los resultados de los ensayos de compresión para la determinación del índice de actividad resistente de la ceniza de bagazo de caña del central "30 de Noviembre", pueden apreciarse en la Tabla 1.

Tabla 1- Resultados del ensayo de resistencia a compresión de las muestras patrón y con adición de ceniza del central 30 de Noviembre

Muestra	Réplica	Número de briqueeta	Resistencia a compresión, MPa		
			Individual	Promedio por réplica	Prome dio por muestr a
Patrón	P-1	P-1.1	21,90	22,05	22,30
		P-1.2	22,27		
		P-1.3	21,98		
	P-2	P-2.1	22,52	22,54	
		P-2.2	22,69		
		P-2.3	22,43		
Con adición de ceniza del “30 de Noviembre”	A-1	A-1.1	19,39	19,24	19,06
		A-1.2	19,11		
		A-1.3	19,21		
	A-2	A-2.1	19,14	18,88	
		A-2.2	18,73		
		A-2.3	18,75		

Con estos resultados, el valor del índice de actividad resistente de la ceniza del central “30 de Noviembre” es la que se muestra en la expresión (2).

$$\text{Índice}_{30 \text{ de Noviembre}} = 85,48\% \tag{2}$$

Según la norma cubana NC TS 528, el índice mínimo de actividad resistente con el cemento portland que debe tener un material cementante suplementario para que pueda ser utilizado en sustitución parcial del cemento portland, debe ser del 75%, por lo que la ceniza procedente del central azucarero “30 de Noviembre”, cumple con ese valor.

2.2. Diseño Experimental

El procedimiento empleado consiste en comparar las propiedades de un hormigón patrón, con las propiedades de hormigones elaborados con diferentes proporciones de ceniza en sustitución del cemento portland, evaluando estadísticamente, la existencia o no de diferencias significativas en las mismas.

El diseño experimental empleado es un modelo estadístico unifactorial simple, en que la única variable independiente a considerar es la proporción de ceniza de bagazo de caña del central “30 de Noviembre” en sustitución del cemento portland. De acuerdo con las experiencias emanadas de investigaciones previas sobre el empleo de ceniza de bagazo de caña como material cementante suplementario en hormigones [18-22], se decidió limitar la proporción de sustitución de cemento portland por ceniza a 30%, con rangos de variación de un 5%. De esta forma, la variable independiente tiene siete niveles, tal como se aprecia en la Figura 2.



Fig. 2- Niveles de sustitución de cemento por ceniza

Como variables dependientes se midieron en estado endurecido, resistencia a compresión y velocidad del pulso ultrasónico. Estas variables permiten tener criterio en el nivel macroestructural, del comportamiento mecánico y durable del hormigón con diferentes niveles de sustitución de cemento por ceniza de bagazo de caña.

Para ello se diseña y elabora un hormigón patrón como base de comparación. De acuerdo al estudio realizado en la bibliografía especializada referida a investigaciones en este campo [18-22], la ceniza de bagazo de caña como material cementante suplementario puede ser utilizada en hormigones entre baja y media resistencia a compresión. Por ello se decide en la investigación diseñar y producir como base de comparación, un hormigón de 20 MPa de resistencia media a la compresión. Sobre la base de la dosificación patrón, se elaboraron las siete dosificaciones con sustitución parcial de cemento por ceniza de bagazo de caña.

En el diseño de la mezcla de hormigón se empleó el procedimiento del ACI, adecuado a las condiciones específicas del país, escogiendo la proporción en que se mezclan los dos tipos de áridos por el método de vacío mínimo, que ha demostrado influye económicamente en el consumo de cemento portland. Debido a que la arena de la cantera “Elpidio Berovides”, como se especificó en el numeral anterior tiene un elevado módulo de finura, cualquier dosificación que se realice con este material requerirá de proporciones superiores a lo habitual para lograr una mezcla laborable. Ello queda corroborado mediante el ensayo de vacío mínimo, que demuestra que la proporción en que deben mezclarse la arena y el árido grueso es de 65% y 35% respectivamente. La cantidad de aditivo superfluidificante fue la necesaria para que la laborabilidad de la mezcla se mantuviera entre blanda y fluida.

Con cada dosificación se elaboraron dos amasadas de 30 L, suficiente para medir la laborabilidad en estado fresco; y elaborar con cada una nueve probetas para medir las propiedades en estado endurecido a edades de 3, 7 y 28 días, lo que permite evaluar cómo fluctúan estas a edades tempranas.

En la Tabla 2 pueden apreciarse las dosificaciones para el metro cúbico, tanto patrón como con los diferentes niveles de sustitución ya mencionados.

Tabla 2- Dosificaciones empleadas en el experimento

Materiales	Unidad de medida	Cantidad de materiales por metro cúbico						
		Patrón	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Cemento portland PP-35	kg	376	357,2	338,4	319,6	300,8	282	263,2
Ceniza “30 de Noviembre”	kg	-	18,8	37,6	56,4	75,2	94	112,8
Arena “Elpidio Berovides”	kg	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Piedra “Elpidio Berovides”	kg	734	734	734	734	734	734	734
Agua	L	179	179	179	179	179	179	179
Aditivo SikaPlast® 9100CU	mL	1667	1920	2000	2333	2667	3000	3333

La laborabilidad de todos los hormigones diseñados, con o sin sustitución de cemento portland, corresponde a una mezcla entre blanda y fluida, que son las más empleadas tecnológicamente en el país, esto es, asentamientos en el cono de Abrams entre 100 mm y 210 mm. Para lograr este asentamiento, en todos los casos fue empleado un aditivo superfluidificante SikaPlast® 9100CU. Puede apreciarse que a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de cemento portland por ceniza, para lograr similar laborabilidad es necesario el incremento de la proporción de aditivo en la dosificación.

El análisis de los resultados se realizó mediante un estudio estadístico con el empleo del programa computacional Statgraphics Centurion, sobre la base de una prueba de rangos múltiples y tuvo como objetivo determinar si el porcentaje de sustitución tenía una influencia significativa en la respuesta de cada variable dependiente estudiada. Para evaluar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre grupos homogéneos, se determina el valor P de la prueba F de Fisher.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resistencia A Compresión

En la Figura 3 pueden apreciarse los resultados promedios de resistencia a compresión a edades de 3, 7 y 28 días, tanto en la dosificación patrón como en las seis dosificaciones con diferentes porcentajes de sustitución del cemento por ceniza.

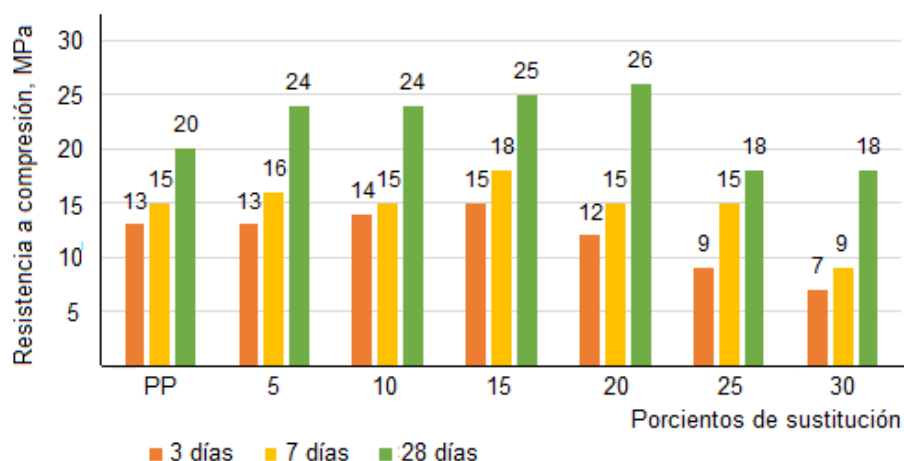


Fig. 3- Variación de la resistencia a compresión en el tiempo según porcentos de sustitución

En primer lugar, en todos los casos y como es normal, en cada dosificación se aprecia un incremento de la resistencia a compresión con el aumento de la edad. Entre 5% y 20% de sustitución, se observa incremento de la resistencia a compresión respecto a la dosificación patrón. De un 20% con niveles de sustitución de 5% y 10%; de 25% para nivel de sustitución del 15%; y de 30% para nivel de sustitución del 20%. Los resultados a edad de 28 días, son superiores a los obtenidos por Córdova y Simón [19], Rodríguez [20] y Ruiz, Peñaranda, Fuentes & Semprun [22], y muy similares a los de Espinoza [21], y demuestran las potencialidades que desde el punto de vista mecánico posee la ceniza de bagazo de caña proveniente del central “30 de Noviembre”, o sea, su potencialidad puzolánica con independencia de no haberse efectuado quema controlada. Los mejores resultados se obtienen para un 20% de sustitución. Ya para porcentajes de sustitución de 25% y 30%, la resistencia a compresión disminuye sensiblemente.

Para evaluar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de resistencia a compresión a edad de 28 días en los diferentes niveles de sustitución, se realiza la prueba de rangos múltiples mediante el programa Statgraphics Centurion. Este procedimiento de comparación múltiple se utiliza para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, y en base a ello, corroborar estadísticamente si procede o no emplear los niveles de sustitución experimentados. Los resultados estadísticos de la prueba de rangos múltiples se pueden apreciar en la Tabla 3.

En la tabla pueden apreciarse dos grupos homogéneos: Uno correspondiente a las medias de resistencia a compresión patrón y porcentajes de sustitución de 25% y 30%; un segundo grupo corresponde a los restantes porcentajes de sustitución. Coinciden en el primer grupo los dos niveles de sustitución cuyas medias de resistencia a compresión son menores que la patrón, lo que indica, que, desde el punto de vista estadístico, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las tres medias. El segundo grupo está conformado por los cuatro niveles de sustitución cuyas medias de resistencia a compresión superan la resistencia media patrón. Determinado el valor P de la prueba F de Fisher, menor en este caso que 0,05, se llega a la conclusión de que existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos con un 95% de confiabilidad.

Tabla 3- Resultados de la prueba de rangos múltiples para la resistencia media a compresión a 28 días

Niveles de sustitución, %	Casos	Resistencia media a compresión, MPa	Grupos homogéneos	
Patrón	7	20	X	
5		24		X
10		24		X
15		25		X
20		26		X
25		18	X	
30		18	X	

Este resultado estadístico ratifica el obtenido experimentalmente, o sea, que en la variable resistencia a compresión es factible sustituir el cemento por la ceniza de bagazo de caña del central “30 de Noviembre” hasta en un 20%. Precisamente, los mayores valores a edad de 28 días, se obtienen para un 20% de sustitución.

3.2 Velocidad De Pulso Ultrasónico

Los resultados promedio de la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a las tres edades y porcentajes de sustitución de ceniza por cemento, pueden apreciarse en la Figura 4.

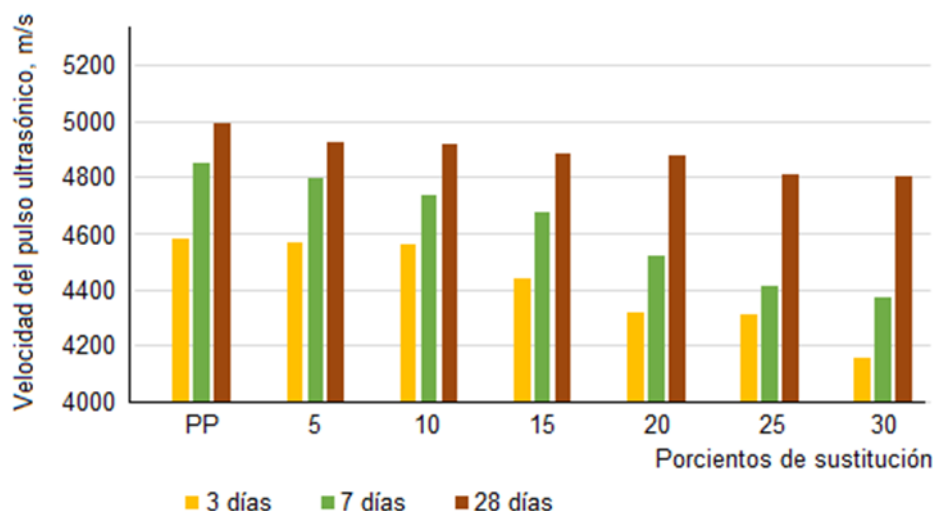


Fig. 4- Variación de la velocidad de ultrasonido en el tiempo según porcentos de sustitución

El análisis de estos resultados muestra tanto en la dosificación patrón, como en las dosificaciones con diferentes niveles de sustitución, que la velocidad de propagación del pulso ultrasónico en el hormigón se va incrementando con el tiempo de hidratación de los materiales cementantes empleados (edad del hormigón), lo que infiere que se van cerrando los poros a medida que aumenta la edad del hormigón. También a medida que se incrementa la proporción de ceniza en el hormigón, va disminuyendo levemente la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, con independencia de la edad de los ensayos. Este resultado puede evaluarse como contradictorio, ya que la ceniza de bagazo de caña, como material con actividad puzolánica comprobada experimentalmente, debe tener reacción tardía. Es posible que a mayores edades esta tendencia se invierta, lo que podría comprobarse en investigaciones posteriores. No obstante, a las tres edades experimentadas, el hormigón clasifica como un hormigón durable, en particular a 28 días, en que todos los resultados de velocidad de propagación del pulso ultrasónico fluctúan entre 4800 m/s y 5000 m/s. Las diferencias, físicamente parecen no ser significativas, lo que se pretende comprobar con el correspondiente análisis estadístico.

Al igual que se procedió con la resistencia a compresión, para evaluar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de velocidad del pulso ultrasónico a edad de 28 días en los diferentes niveles de sustitución, se realiza la prueba de rangos múltiples mediante el programa Statgraphics Centurion. Los resultados estadísticos de la prueba de rangos múltiples se pueden apreciar en la Tabla 4. En ella se identifican cuatro grupos homogéneos: Por un lado, la dosificación patrón que alcanza el mayor valor de velocidad de propagación del pulso ultrasónico; los otros tres grupos identifican respectivamente niveles de sustitución de 5% y 10%, de 5%, 15% y 20%, y el último grupo, de 25% y 30%. Esto indica que, dentro de cada uno de los grupos, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de valores de velocidad del pulso ultrasónico. Determinado el valor P de la prueba F de Fisher, menor en este caso que 0,05, se llega a la conclusión de que existen diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro grupos con un 95% de confiabilidad.

Tabla 4- Resultados de la prueba de rangos múltiples para la velocidad del pulso ultrasónico a 28 días

Niveles de sustitución, %	Casos	Velocidad media del pulso ultrasónico, m/s	Grupos homogéneos			
PP	12	4999	X			
5		4932		X	X	
10		4951		X		
15		4887			X	
20		4892			X	
25		4811				X
30		4804				X

Este resultado estadístico ratifica el obtenido experimentalmente, o sea, que en la variable velocidad del pulso ultrasónico, físicamente, también son muy similares las medias de velocidad del pulso ultrasónico en los niveles de sustitución de cada uno de los grupos homogéneos. Como en todos los casos la velocidad del pulso ultrasónico no está por debajo de los 4000 m/s, se concluye que la adición de ceniza de bagazo de caña del central "30 de Noviembre", no afecta significativamente la durabilidad de los hormigones.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el proyecto de investigación sobre las potencialidades de empleo de la ceniza de bagazo de caña del central "30 de Noviembre" en la fabricación de hormigones demuestra que:

- La ceniza de bagazo de caña obtenida directamente de los hornos del central, sin control de la temperatura de quema, luego de un proceso de secado, molienda y tamizado, posee índice de actividad resistente con cemento portland superior en más del 10% al mínimo establecido en la normativa cubana, lo que demuestra sus potencialidades de empleo como material cementante suplementario en la fabricación de hormigones y morteros.
- Con hasta un 20% de sustitución del cemento portland por la ceniza en la fabricación de hormigones, se obtienen valores medios de resistencia a compresión superiores entre un 20% y un 30% a los obtenidos en la dosificación patrón, elaborada sólo con cemento portland; los mayores valores de resistencia a compresión se obtienen para un 20% de sustitución, decreciendo por debajo de la obtenida para la dosificación patrón a partir del 25% de sustitución.
- El empleo de la ceniza de bagazo de caña obtenida directamente del central, en proporciones hasta un 30% en sustitución del cemento portland, tiene influencia significativa estadísticamente ya que la prueba de rangos múltiples así lo demuestra. No así ingenierilmente, ya que todos alcanzan la categoría de durable.

1. H. Duan, T. R. Miller, G. Liu & V. W. Tam, "Construction debris becomes growing concern of growing cities", *Waste Management*, vol. 83, pp. 1-5, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044>
2. A. O. Daoud, A. A. E. Othman, O. J. Ebohon & A. Bayyati, "Analysis of factors affecting construction and demolition waste reduction in Egypt", *International Journal of Construction Management*, vol. 23, no. 8, pp. 1395-1404, 2023. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1974682>
3. S. Sutar, P. V. Patil, R. V. Chavan & M. M. Maske. "Study and review of ordinary portland cement", *ASEAN Journal of Science and Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 153-160, 2021. <https://doi.org/10.17509/ajse.v1i3.37973>
4. R. Snellings, P. Suraneni & J. Skibsted. "Future and emerging supplementary cementitious materials". *Cement and Concrete Research*, Vol. 171, 107199, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>
5. M. C. G. Juenger, R. Snellings & S. A. Bernal. "Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights", *Cement and Concrete Research*, Vol. 122, pp. 257-273, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
6. K. de Weerd, M. B. Haha, G. Le Saout, K. O. Kjellsen, H. Justnes & B. Lothenbach. "Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 279-291, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>
7. R. G. Pillai, R. Gettu & M. Santhanam. "Uso de materiales cementicios suplementarios en sistemas de concreto armado - Beneficios y limitaciones", *Revista ALCONPAT*, Vol. 10, No. 2, pp. 147-164, 2020. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477>
8. M. A. Mosaberpanah & S. A. Umar. "Utilizing Rice Husk Ash as Supplement to Cementitious Materials on Performance of Ultra High Performance Concrete: – A review", *Materials Today Sustainability*, Vol. 7, 100030, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100030>
9. A. A. J. Hernández, H. Z. López Calvo & R. Martínez Barrita. "Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto preparado con ARAT y CBC", *Revista Academia XXII*, Vol. 15, No. 29, 2024. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252xp.2024.15.29.88666>
10. F. Chyliński. "Microstructural Assessment of Pozzolanic Activity of Ilmenite Mud Waste Compared to Fly Ash in Cement Composites", *Materials*, Vol. 17, No. 11, 2483, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17112483>
11. J. Mañosa, A. Alvarez, J. Marco Gibert, A. Maldonado Alameda & J. M. Chimenos. "Enhancing reactivity in muscovitic clays: Mechanical activation as a sustainable alternative to thermal activation for cement production", *Applied Clay Science*, Vol. 250, 107266, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107266>
12. K. C. Onyelowe, A. Naghizadeh, F. I. Aneke, D. P. N. Kontoni, M. E. Onyia, M. Welman Purchase et al. "Characterization of net-zero pozzolanic potential of thermally-derived metakaolin samples for sustainable carbon neutrality construction", *Scientific Reports*, Vol. 13, 18901, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46362-y>
13. M. Kuźnia. "A Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment", *Energies*, Vol. 18, No. 1, 52, 2024. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
14. M. Mathapati, K. Amate, C. D. Prasad, M. L. Jayavardhana & T. H. Raju. "A review on fly ash utilization", *Materialstoday: Proceeding*, Vol. 50, No. 5, pp. 1535-1540, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.106>
15. S. Nasir Abbas, M. Irshad Qureshi, M. K. Alkharisi, M. Alturki & Z. Ahmad. "Combined effect of silica fume and various fibers on fresh and hardened properties of concrete incorporating HDPE aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 445, 137940, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137940>
16. H. Islam, D. W. Law, C. Gunasekara, H. Rahman Sobuz, N. Rahman, A. Habib et al. "Assessing the Influence of Banana Leaf Ash as Pozzolanic Material for the Production of Green Concrete: A Mechanical and Microstructural Evaluation", *Materials*, Vol. 17. No. 3, 720, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma17030720>
17. J. D. Gonzales Zarpán & W. Quispe Prado. "Influencia de la ceniza de subproductos agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto", *Revista de Climatología*, Vol. 24, pp. 2152-2190, 2024. <https://doi.org/10.59427/rccli/2024/v24cs.2152-2190>

18. N. Prabhath, B. Sampath Kumara, V. Vithanage, A. Indupama Samarathunga, N. S. Hidallana Gamage, H. Damruwan et al. "Investigation of Pozzolan Properties of Sugarcane Bagasse Ash for Commercial Applications", ACS Publications, Vol. 8, No. 13, 2023. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c07844>
19. M. G. F. Córdova & H. H. Pastor Simón. "Ceniza de bagazo de caña de azúcar en la resistencia a la compresión del concreto", UCV Hacer, Vol. 7, No 3, pp. 25-31, 2018. <https://doi.org/10.18050/RevUCVHACER.v7n3a2>
20. A. Rodríguez. "Análisis del comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto de 21 MPa empleando la ceniza de bagazo de caña de azúcar", Tesis de maestría, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2019. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59144>
21. R. A. Espinoza Huapaya. "Ceniza de bagazo de caña de azúcar para mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto estructural", Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2022. <https://info.eu-repo/semantics/bachelorThesis>
22. A. F. Ruiz, C. J. Peñaranda, G. Fuentes & M. D. Semprun. "Análisis comparativo de resultados en el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como material sustituyente del cemento portland en el concreto", Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, Vol. 11, No. 2, pp. 8-17, 2020. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.51>
23. L. Rodier, E. Villar Cociña, J. Mejia Ballesteros & H. Savastano Junior. "Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials", Journal of Cleaner Production, Vol. 231, pp. 54-63, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.208>