

Determinación de la resistencia a la compresión de concreto elaborado con ceniza proveniente de madera de cedro común a diversas concentraciones Compressive strength determination of concrete made with common cedar tree wood ash, at various concentrations

Jorge D. López-Alcántara ^a, Adán Jiménez-Montoya ^{a,*}, Juan C. Contreras-Ramírez ^a, Héctor García-Sámano ^a

^a División de Ingeniería Civil, Tecnológico Nacional de México TES-San Felipe del Progreso, 50640, San Felipe del Progreso, Estado de México, México.

Resumen

En el presente trabajo se reporta la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto con incorporación de ceniza proveniente de la quema de leña de cedro común (*cupressus sempervirens*) en sustitución de cemento portland a porcentajes de 15 %, 25 %, 40 %, 50 %, 65 %, 75 % y 100 %. El objetivo es determinar el porcentaje óptimo de incorporación de ceniza, realizar una propuesta de uso para aplicaciones estructurales y no estructurales con materiales locales y comparar y validar resultados de estudios provenientes de la literatura. La dosificación y cálculo de mezclas se realizó con base en la normatividad de Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) para concretos de resistencia de 200 kg/cm², mientras que el análisis granulométrico y selección de agregados, procedimiento de elaboración, determinación del contenido de humedad y de resistencia a la compresión se realizaron con base en las reglamentaciones respectivas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE).

Palabras Clave: Materiales Puzzolanicos, ceniza de madera, concreto, resistencia a la compresión.

Abstract

This work reports compressive strength determination of concrete specimens out with the incorporation of ash from the burning of common cedar (*cupressus sempervirens*) firewood, replacing Portland cement at percentages of 15%, 25%, 40 %, 50%, 65%, 75% and 100%. The objective is to determine the optimal percentage of ash incorporation, make a proposal for use for structural and non-structural applications with local materials and compare and validate results of studies from the literature. The dosage and calculation of mixtures was carried out based on the regulations of the American Concrete Institute (ACI) for a 200 kg/cm² concrete resistance, while the granulometric analysis and selection of aggregates, preparation procedure, determination of the moisture content and compressive strength was carried out based on the respective regulations of the Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE).

Keywords: Pozzolanic materials, wooden ashes, concrete, compressive strength.

1. Introducción

Desde tiempos de la antigua Roma se tiene constancia del efecto de materiales puzolánicos en el desarrollo de cementantes, sobre todo concretos para aplicaciones en la construcción (Snellings et al., 2012), por lo que a partir de ahí y hasta la fecha se han realizado diversos estudios a nivel mundial relativos a la determinación de propiedades físico-mecánicas de concretos basados en incorporación de ceniza, enfocándose principalmente en la determinación resistencia a la compresión al ser la propiedad con mayor aplicación

estructural para este material (Chowdhury et al., 2015; Cheah & Ramli, 2011; Amare et al., 2023; Thomas et al., 2021; Nascimento et al., 2023; Teker Ercean et al., 2023), al sustituir cierta cantidad de cemento por ceniza en porcentaje de peso por unidad de volumen *wt* (%) con valores que van por lo general del 5 % al 30 %.

Acorde a la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) en su normativa C 618-22 (American Society for Testing and Materials, 2022), clasifica como puzolánicos como tipo F a aquellos que se

*Autor para la correspondencia: adanjim28@hotmail.com

Correo electrónico: lopezalcantarajorgedaniel00@gmail.com (Jorge Daniel López-Alcántara), adanjim28@hotmail.com (Adán Jiménez-Montoya), charly.cr.2805@gmail.com (Juan Carlos Contreras-Ramírez), arq.samgar@hotmail.com (Héctor García-Sámano).

obtienen como subproducto de la quema de bitúmenes o carbón triturado (ceniza volante), generalmente en plantas de co-generación y como tipo N a minerales brutos o calcinados que se obtienen como subproducto de la quema de materiales diversos como la biomasa. A pesar que los estudios relativos a la sustitución de cemento (generalmente tipo Portland) por ceniza (en adelante, indicadas como sustituciones de ceniza) para la elaboración de concretos y su respectiva determinación de la resistencia a la compresión son extensos en la literatura, en México son escasos, en especial para ceniza tipo N. Por ejemplo, el Instituto Mexicano del Transporte y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, elaboró un reporte de sustitución de ceniza volante, con valores de w_t de 50 % y 65 % (Rendón-Belmonte et al., 2018), obteniendo decrementos de resistencia a la compresión de 63 MPa y 59 MPa respectivamente en comparación con una resistencia de 71 MPa para el sujeto de control, aunque con menor tiempo de fraguado para alcanzar 45 MPa. Huaquisto Cáceres & Belizario Quispe (2018) realizaron un estudio en Perú para sustituciones de ceniza volante proveniente la central térmica Ilo-21 en valores de w_t de 2.5 %, 5 %, 10 % y 15 %. La resistencia óptima (22.65 MPa) se obtuvo a los 28 días en para $w_t = 10$ %, decreciendo al llegar al 15 %.

Coyasamin-Maldonado (2016) estudió la sustitución de cenizas de cascarilla de arroz y bagazo de caña (tipo N), obteniendo concretos de resistencias a la compresión de hasta 23% superiores respecto al espécimen de control para valores de $w_t = 15$ %, pero reduciéndose en un 7 % al utilizar valores de 30 %, mientras que Tavares et al. (2022), estudió el efecto de la sustitución ceniza de hoja de plátano para concretos “eco-amigables”, encontrando el mejor desempeño en incremento de resistencia a la compresión (18 % a 90 días de curado) para valores de $w_t = 10$ %. Lin et al. (2024) encontraron que la sustitución de ceniza de papel y ceniza de residuos alimenticios tiene efectos reductivos en resistencia a la compresión para valores de w_t de 5 % a 15 %, pero que aún cumple con los requerimientos y puede ofrecer beneficios desde un punto de vista de sostenibilidad. Mendonça et al. (2023) hallaron un incremento de resistencia a la compresión entre 10 % y 15 % (resistencias cercanas a los 30 MPa a 28 días de curado) en sustituciones de ceniza de bambú para valores w_t de 6 %, 10 % y 14 % respectivamente, con el valor óptimo a 6 % (30.59 MPa) con un incremento de resistencia del 15 % respecto al sujeto de control. Amin et al. (2024) probaron el efecto de ceniza de humo de sílice, cáscara de cacahuate y girasol de manera individual y combinada, concluyendo que el óptimo porcentaje de sustitución es $w_t = 30$ % para el girasol y 10 % para el cacahuate (con resistencias a la compresión de 73 MPa y 75.5 MPa respectivamente, considerando 72.6 MPa del sujeto de control). Se puede observar que la incorporación de cenizas tipo N o F no garantizan un incremento de resistencia a la compresión, pero en caso que sí, el porcentaje de óptimo de sustitución de cemento por ceniza oscila en valores de $w_t = 10$ %. Dentro de la ceniza tipo N, se encuentran estudios con enfoque en maderas y residuos arbóreos, que son justamente el enfoque del presente trabajo. Ates et al. (2023) determinaron el efecto del comportamiento geo-polímeros de concreto (especímenes de ceniza tipo F) con sustituciones de ceniza tratada y no tratada proveniente de residuos de pallets de madera (ceniza tipo N), hallando que aumenta la resistencia a compresión en porcentajes de

sustitución a $w_t = 30$ % a 7 días de curado (47.23 MPa). Bikoko (2021) estudió el efecto de la sustitución de ceniza de eucalipto y aguacate, en proporciones del 0 al 30% obteniendo un efecto negativo en la resistencia del concreto. Timoteo-Caro (2021) recomienda que el porcentaje de sustitución de ceniza de madera debe efectuarse en valores comprendidos entre $w_t = 10$ % (óptimo con 23.14 MPa) y 20% para obtener resistencias en valores cercanos de 29.59 MPa, aún a pesar de obtener reducciones respecto al sujeto de control (23.24 MPa). García Chumacero et al. (2023) realizaron sustituciones de $w_t = 8$ %, 12 % y 16 % de ceniza proveniente de residuos de madera, alcanzando la máxima resistencia a la compresión (30.27 MPa a 28 días de curado a una concentración de 8 %), teniendo un incremento de 9.04 % respecto al sujeto de control. Rissanen et al. (2019) estudiaron el efecto de la sustitución de cenizas de turba y madera mediante combustión por proceso de lecho fluido y de ceniza volante, a concentraciones de $w_t = 10$ %, 20 % y 40 %. Obtuvieron que la resistencia a la compresión a 28 días se redujo de manera general para un aumento del porcentaje de sustitución en cualquier tipo de mezcla (con $w_t = 10$ %, más cercanos al valor del espécimen de control, pero con su máximo de resistencia en un tipo de mezcla a 20 %), pero aun mostrando resistencias aceptables (de 39.6 MPa a 48.2 MPa), mientras que Gharibi et al. (2023) determinaron la resistencia a compresión de concretos, a porcentajes de sustitución del 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de ceniza proveniente de hojas y madera de pino, concluyendo que el porcentaje óptimo de sustitución se encuentra entre el 10 % y 15 % con valores máximos de 43.5 MPa y 46.5 MPa respectivamente. Kareem et al. (2023) realizaron un estudio en que se sustituyó ceniza de hoja de anacardo en porcentajes de $w_t = 5$ %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %, encontrando que, en todos los casos, la resistencia a la compresión a mayor porcentaje de sustitución es decreciente (24.69 a 20.33 MPa) y menor que la del sujeto de control (0 % a 24.8 MPa), excepto para la concentración de 5 % pasados 56 días.

Rahul Rollakanti et al. (2021) determinaron que la sustitución de ceniza de aserrín quemado mezclado 50 %-50 % con polvo de concha de mar, en porcentajes de $w_t = 5$ %, 10 % y 15 %. Se encontró que al 10 % de sustitución (5 % efectivo de ceniza de aserrín) se da la máxima resistencia a compresión, con 33.69 MPa a 28 días de curado. Hamid & Rafiq (2021) hallaron que la sustitución de ceniza proveniente de un horno de un restaurante (leña) y madera de residuos en porcentajes de sustitución de $w_t = 5$ %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 % ofrece un decremento de resistencia a la compresión respecto al sujeto de control (31.4 MPa) en todos los casos al aumentar el porcentaje de sustitución, siendo la ceniza de horno a la de mayor resistencia a un porcentaje de sustitución del 10 % (24.71 MPa). Sirico et al. (2021) realizaron un estudio para determinar la resistencia a compresión de concreto con sustitución de carbón triturado, en concentraciones de $w_t = 2.5$ %, 5 %, 7.5 % y 10 %, obteniendo que los valores óptimos de sustitución son de 2.5 % a 28 días de secado, para curado en húmedo (de 42 MPa) y en seco (46 MPa), mientras que para el secado a 365 días (con resistencias cercanas a los 55 MPa para curado en húmedo y 47 MPa para curado en seco).

De acuerdo a lo anterior y en consistencia con las revisiones efectuadas por Chowdhury et al. (2015), Cheah & Ramli

(2011), Nascimento et al. (2023) y Teker Ercan et al. (2023) se tiene de manera general que el porcentaje óptimo de incorporación para su uso como concreto estructural el del 10% en sustitución de cemento, en contraste que la resistencia a la compresión de concretos a partir de ceniza proveniente de madera o residuos arbóreos varía significativamente dependiendo del tipo de especie arbórea, por lo que sería necesario realizar un estudio a profundidad de la ceniza de cada especie antes de considerar su aplicación definitiva. El presente estudio pretende determinar la resistencia a la compresión de un concreto con sustitución de cemento por ceniza proveniente de una especie arbórea (*cupressus sempervirens*), con la finalidad de comparar y establecer la consistencia del porcentaje óptimo de incorporación respecto al reportado en los estudios previos, así como proponer su uso en aplicaciones estructurales y no estructurales con materiales y normativas locales.

2. Metodología y Materiales

2.1 Materiales

Como materiales cementantes se utilizó cemento Portland CPC 30 marca Cruz Azul® de densidad 3100 kg/m³ y ceniza volante, proveniente de la quema de leña para uso doméstico, de la especie *cupressus sempervirens* (cedro común) (ver Figura 1), originario del municipio del Oro, Estado de México, México cuyas características químicas y físicas pueden observarse en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades químicas y físicas de la ceniza proveniente de *cupressus sempervirens* como ceniza tipo N acorde a la ASMT C 618-22 (American Society for Testing and Materials, 2022).

Componente/parámetro	Valor
Dióxido de silicio+ Óxido de Aluminio + Óxido Férrico (%)	70% mínimo
Anhídrido Sulphúrico	4,0% máximo
Contenido de humedad	3,0% máximo
Pérdida de ignición	10,0% máximo
Finura. retenido sobre la malla de 0,045mm, utilizando el método de cribado por vía húmeda.	20
Índice de actividad puzolánica con cemento Portland a 28 días mínimo porcentaje de control	75
Requerimiento de agua máximo porcentaje de control	115
Densidad	900 kg/m ³

Se utilizó agregado fino que pasa al 100% el tamiz de 3/8” y agregado grueso de tamaño 3/4”. El análisis granulométrico, selección y determinación de propiedades se basó en las normas NMX-C-077-ONNCCE-2019 (ONNCCE, 2020), NMX-C-164-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2019) y NMX-C-165-ONNCCE-2020 (ONNCCE, 2021). Los valores de las propiedades se pueden visualizar en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de los agregados para las mezclas a utilizar.

Tipo de agregado	Densidad (g/cm ³)	Densidad específica (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Módulo de finura
Fino	2.6-2.8	2.6-2.8	2.0-3.5	2.3-3.10
Grueso	2.3-2.6	2.3-2.6	1.0-2.5	N/A

2.1. Cálculo de mezclas

Se realizó una determinación de la proporción de cada uno de los componentes utilizando la metodología marcada por la normativa ACI 211.1-22 (American Concrete Institute, 2022), considerando un concreto de resistencia de 200kg/cm². La dosificación resultante se puede observar en la Tabla 3, considerando valores de sustitución de ceniza por cemento de wt = 15 %, 25%, 40 %, 50 %, 65 %, 75 % y 100 %.



Figura 1: Ceniza de *cupressus sempervirens*. En a) se observa su obtención de un fogón casero. En b), su recolección.

2.2. Elaboración

La elaboración de los especímenes se realizó con base lo dictado por la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 (ONNCCE, 2017) (ver Figura 2), considerando especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de largo, con un desmolde después de 24 horas e inmediato traslado al cuarto de curado, a temperatura controlada de 23° ±2° C e inmersos en tina de agua al 100% de altura. La denominación para los especímenes de control es C y para los especímenes de prueba es P. Así para los especímenes de control es C-7, C-14 y C-28 a edades de curado de 7, 14 y 28 días respectivamente. Para los especímenes de Prueba es P-15, P-25, P-40, P-65, P-75 y P-100 para especímenes de 15 %, 25 %, 40 %, 65 %, 75 % y 100 % de porcentaje de sustitución de ceniza por cemento respectivamente.

Estos también se elaboraron para 7, 14 y 28 días, por ejemplo, para los especímenes de 15 % de sustitución, las nomenclaturas a 7, 14 y 28 de curado días serían P-15-7, P-15-14 y P-15-28 respectivamente. Se elaboraron 3 especímenes para cada categoría de sustitución más el de control, cada una para unas edades de 7, 14 y 28 días, dando un total de 72 especímenes ensayados. La dosificación y asignación de nomenclaturas para las respectivas mezclas y sustituciones de ceniza por cemento para los sujetos de prueba puede

Tabla 3: Dosificación de mezclas para los porcentajes de sustitución de ceniza por cemento.

Porcentaje de sustitución de ceniza por cemento wt (%)	0	15	25	40	50	65	75	100
Denominación	C	P-15	P-25	P-40	P-50	P-65	P-75	P-100
Cantidad de especímenes	9	9	9	9	9	9	9	9
Agua	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Cemento	1.68	1.42	1.26	1.00	0.84	0.58	0.42	0
Componentes (kg)								
Grava	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
Arena	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88
Ceniza	0	0.07	0.12	0.19	0.24	0.31	0.37	0.48

observarse en la Tabla 3. Se determinó el contenido de humedad de los especímenes a edades de 7, 14 y 28 días de acuerdo al procedimiento y fórmulas que establece la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

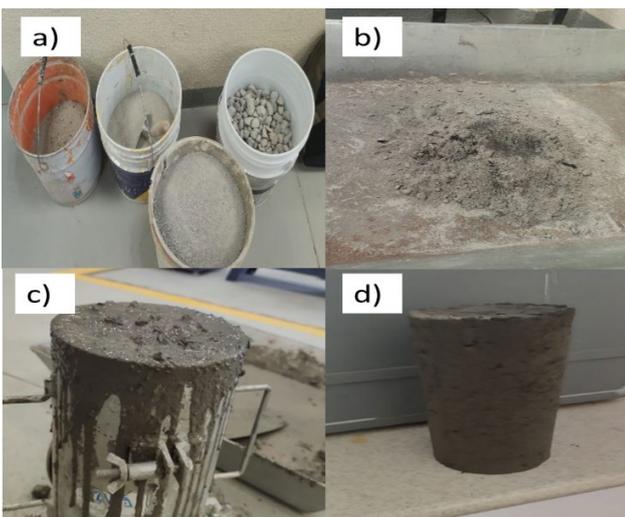


Figura 2: Elaboración de los especímenes de concreto. En a) se observa la dosificación de ceniza y agregados, en b) la mezcla, en c) el vertido de mezcla en moldes cilíndricos, en d) un cilindro recién desmoldado.

2.3. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó con base en el procedimiento de ensayo dictado por la norma NMX-C-83-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2015), con un ensayo ejecutado en una máquina de ensayos de concreto ELE International 36-3095/02 (ver Figura 3), a una velocidad de carga de 3.5 kN/s. Los resultados pueden visualizarse en las Figuras 5 y 6.

3. Resultados y Análisis

Los resultados de resistencia a la compresión promedio y contenido de humedad promedio de cada una de las mezclas con sustitución de ceniza por cemento, a 7, 14 y 28 días de fraguado se desglosan en las Tablas 4, 5 y 6. El comportamiento general de estos valores se plasma en la Figura 4, en la que se puede observar que la máxima resistencia a la compresión se presenta a 28 días de secado a un porcentaje de sustitución del 15 %, lo cual es consistente con el resultado presentado por Gharibi et al. (2023) para ceniza proveniente de especies arbóreas y por Coyasamin-Maldonado (2016) y Mendonça et al. (2023) para cenizas tipo N.

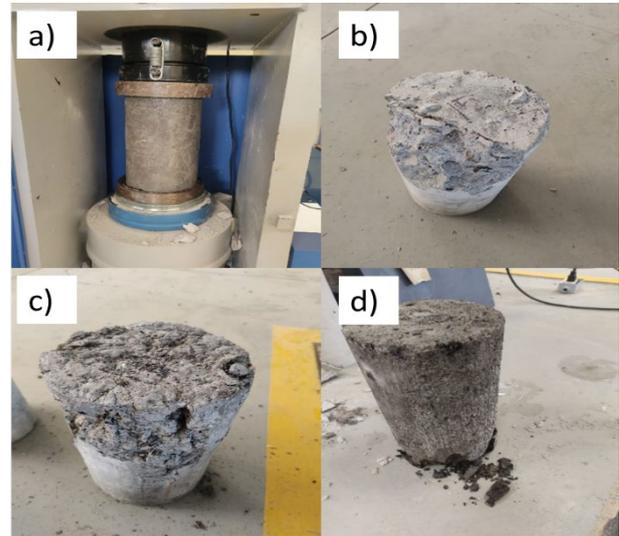


Figura 3: Ensayo a compresión para los especímenes de prueba. En a) un cilindro colocado en la máquina de ensayos a compresión. En b) un espécimen P-15, en c) en un espécimen P-65, en d) un espécimen P-100.

Tabla 4: Resultados de resistencia a la compresión y contenido de humedad de los especímenes a 14 días de secado.

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)	Contenido de humedad (%)
C	16.57	19.84 (%)
P-15	22.13	22.19
P-25	21.92	22.21
P-40	18.01	22.19
P-50	17.78	22.18
P-65	11.17	22.14
P-75	9.19	22.13
P-100	4.75	22.13

Tabla 5: Resultados de resistencia a la compresión y contenido de humedad de los especímenes a 28 días de secado.

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)	Contenido de humedad (%)
C	23.61	13.17
P-15	28.21	13.32
P-25	24.35	13.48
P-40	17.04	13.90
P-50	19.74	13.25
P-65	10.49	13.18
P-75	8.82	13.05
P-100	4.55	13.11

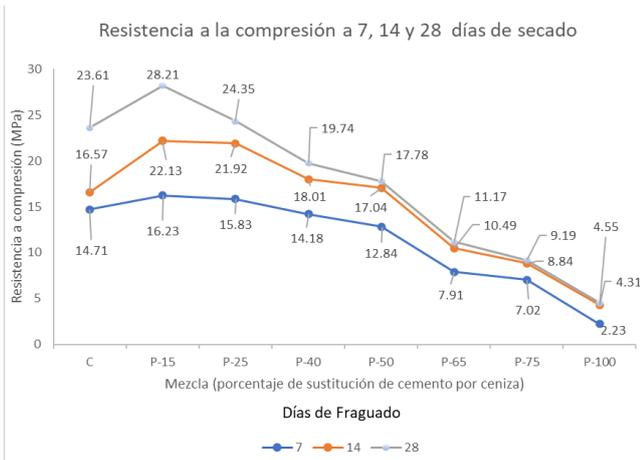


Figura 4: Comparativa de resistencia a la compresión para los especímenes de las diferentes mezclas de ceniza en concreto ensayados.

Se puede constatar que, a pesar que no se realizó la determinación de resistencia al 10 %, a decir por la curva de la Figura 1, los valores de resistencia a esta concentración representan un incremento de resistencia respecto al espécimen de control, tal y como señalan los estudios de Timoteo-Caro (2021), Rahul Rollakanti et al. (2021), Hamid & Rafiq (2021), García Chumacero et al. (2023) y Rissanen et al. (2019) para cenizas provenientes de especies arbóreas. El incremento porcentual de resistencia respecto al sujeto de control es de 19 % para la concentración de 15 % y de 3.13 % para una concentración de 25 % a 28 días de fraguado, esto es consistente con lo reportado por Ates et al. (2023). La resistencia a la compresión es menor al sujeto de control a 7 y 28 días de fraguado para concentraciones de 40 % al 100 %, pero a 14 días de fraguado esto sucede hasta concentraciones de 65 % a 100 %. Obviamente, al considerar que el concreto de manera natural tiende a endurecer al pasar el tiempo de fraguado, se considera que los valores de resistencia a considerar son los de 28 días; pero dada esta variación, se sugiere realizar más pruebas a 56 y 90 días de secado, tal como sucede en otros estudios (Tavares et al., 2022; Sirico et al., 2021). Considerando los criterios de uso local y restrictivo para aplicaciones de alto desempeño indicados por Nascimento et al. (2023), este estudio se ha limitado únicamente a la determinación de la resistencia a la compresión. En la Tabla 6 se enlistan las posibles aplicaciones de este tipo de mezclas bajo este criterio de aplicación bajo el criterio de uso acorde a la reglamentación internacional (ACI) y local vigente (ONNCCE) vigente a 28 días de fraguado mínimo.

A pesar de indicar que, la Tabla 6 considera tiempos de fraguado de 28 días mínimos, se puede observar que la resistencia a compresión a 7 días de fraguado para concentraciones de ceniza de 15 % y 25 % supera la resistencia mínima requerida para aplicaciones estructurales y de 40 % a 65 % para firmes; así como para concentraciones de ceniza de 15 % a 50 % es utilizable para firmes desde los 7 días de fraguado. Esto refuerza las conclusiones de Rendón-Belmonte et al. (2018), Ates et al. (2023), Cheah & Ramli (2011), Chowdhury et al. (2015), Nascimento et al. (2023) y Teker Ercan et al. (2023), que indican que la incorporación de ceniza en sustitución de cemento para concreto acelera los tiempos de fraguado para obtención de resistencias requeridas a la compresión (a concentraciones de ceniza alrededor del 15 %).

Tabla 6: Propuestas de aplicaciones de las mezclas de ceniza en concreto acorde a la reglamentación vigente.

Mezcla	Posible aplicación	Reglamentación
0%, 15%, 25%, 40%	Estructural (resistencia mínima de 200kg/cm ² o 19.61 MPa): Losas, Vigas, Columnas	ACI 318 (American Concrete Insitute, 2020b)
50%, 65%	Firmes de concreto (resistencia mínima requerida de 100 kg/cm ² o 9,8MPa)	NMX-C-105-ONNCCE-2010 (ONNCCE, 2015c)
75%, 100%	Aplanados, reparaciones no estructurales de emergencia, rellenos o usos en materiales cementantes (mínima de 45 kg/cm ²). Se recomienda efectuar estudios comparativos de resistencia proporcional a morteros basados en cemento)	NMX-C-021-ONNCCE-2015 (ONNCCE, 2015a)

Los resultados de resistencia para la aplicación de ceniza en concretos para aplicaciones estructurales obtenidas en el presente estudio deben considerarse de momento únicamente bajo la perspectiva de investigación, pues tal como indica Nascimento et al. (2023) con base en su estudio de revisión: no se recomienda la aplicación inmediata de este tipo de mezclas (específicamente, ceniza de origen arbóreo), siempre con la restricción de que estos resultados son ambiguos y dependen del tipo de especie arbórea elegido, así como otros factores como el proceso de obtención. (estos estudios no consideran la especie *cupressus sempervirens*). Sin embargo, para efectos ilustrativos, extrapolando la formulación del ACI 211.1-22 basado en los criterios de resistencia recomendada del ACI 318, en la Tabla 8 se propone una tabla de formulaciones para las aplicaciones propuestas en la Tabla 7 (se consideran los mismos materiales de origen local propuestos en la metodología).

En la revisión bibliográfica de Cheah & Ramli (2011), Chowdhury et al. (2015) y Teker Ercan et al. (2023), se menciona que el incremento en el contenido de ceniza tiende a mantener el contenido de humedad durante el estado de transición del concreto, teniendo como efecto reducir el agrietamiento por contracción plástica a edades tempranas de fraguado, además de alcanzar rápidamente altas resistencias a la compresión en tiempos a concentraciones entre 15 % y 30 % de ceniza, pero con efectos de reducción de resistencia a la compresión final a concentraciones mayores al 30 %. Para el presente estudio se corrobora la tendencia respecto al contenido de humedad para todas las concentraciones únicamente a 14 días de fraguado, pero a 28 días solo para concentraciones de 15 % a 65 %, por lo que sería necesario profundizar en futuras investigaciones en determinar en mayores rangos de edad de fraguado y concentración de ceniza la variación de esta propiedad, la resistencia a la compresión, así como en la determinación de otras propiedades como resistencia a la flexión, tensión, conductividad eléctrica, aislamiento térmico y durabilidad.

Es necesario indicar que para sugerir el uso de ceniza como un componente regular del concreto es necesario realizar estudios de sustentabilidad como la huella de carbono para

Tabla 7: Proporciones para aplicaciones de concreto basado en sustitución parcial de ceniza, acorde a la aplicación recomendada por el ACI.

Aplicación		Columnas y losas especiales	Losas y zapatas	Trabes, castillos y dalas	Firmes y muros
Resistencia requerida		250kg/cm ²	200kg/cm ²	150kg/cm ²	100 kg/cm ²
Material	Agua (L)	27	31.5	36	45
	Agregado fino (kg)	108	162	198	252
	Agregado grueso (kg)	150	165	195	240
	Cemento (kg)	12.5	25	30	37.5
	Ceniza (kg)	37.5	25	20	12.5

determinar el beneficio de su uso como un cementante sustituto. Para abordar en este aspecto, es necesario considerar el origen de los cementantes y agregados, el proceso empleado en la producción del cemento, así como la aplicación final directa del concreto. De manera práctica, basado en otras investigaciones (León-Velez & Guillén-Mena, 2020; Aristizabal-Alzate & González-Manosalva, 2021; Cámara Nacional del Cemento, 2023) se puede establecer que cada kg de cemento produce una emisión de entre 0.5 y 0.9 kg de CO₂, así como también, que la quema de biomasa tiene un efecto cero de emisiones, al emitir la cantidad de carbono que en su formación capta de la atmósfera. Por tanto, acorde a Arbelaez-Perez et al. (2022), se puede indicar que el porcentaje directo de reducción de emisiones es directamente proporcional al porcentaje de reemplazo de ceniza por cemento en proporción de 1 a 1; así, para el presente caso de estudio, el porcentaje de reducción de emisión de CO₂ para aplicaciones estructurales como columnas y losas es de hasta 400 g en firmes de concreto desde hasta 650 g y en aplanados o en reparaciones de emergencia hasta el 100% por cada kg de cemento reemplazado por ceniza. A pesar que el presente estudio no ahonda en otros aspectos de sustentabilidad, la obtención de la presente ceniza es derivado de un proceso doméstico cotidiano, por lo que su obtención es eventual y no supone una quema directa de recursos forestales.

Conclusiones

La sustitución de ceniza de *cupressus sempervirens* por cemento de cualquier porcentaje tiene potenciales aplicaciones. Para casos estructurales, de 0 a 40%, para firmes de 50% a 65% y para aplanados de 75% a 100%.

El porcentaje óptimo de sustitución de ceniza por cemento se encuentra en el 15%, pero a 25% se tiene aún una resistencia de similar valor al concreto base.

Los resultados obtenidos parecen confirmar parcialmente las tendencias de incremento de resistencia a la compresión de sustitución de cemento por ceniza reportadas en la literatura.

Se requieren más estudios para determinar la resistencia a la compresión a edades de fraguado mayores, para establecer con mayor seguridad las potenciales aplicaciones. Las aplicaciones definitivas dependerán de una confirmación y extensión del presente estudio, así como de pruebas in situ o en modelos a escala, bajo un mayor número de pruebas físico-mecánicas.

La sustitución de ceniza por cemento resultaría en un concreto como material estratégico sostenible, siempre que se obtenga como subproducto de una actividad cotidiana, y que no implique una quema expreso para su obtención, con

posibles aplicaciones estructurales tales como vigas y losas en los porcentajes adecuados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 19403.24-PD, así como a la Red Nacional de Minerales Estratégicos del Tecnológico Nacional de México por el apoyo técnico brindado.

Referencias

Amare, M., Swara, S., Haish, M., Pani, A. K., & Saha, P. (2023). Performance of agro-wastes and chemical admixtures used in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.058>

American Concrete Insitute. (2020). ACI 318S-19. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural.

American Concrete Insitute. (2022). ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High -Density Concrete- Guide.

American Society for Testing and Materials. (2022). ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

Amin, M., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., & Heniegal, A. M. (2024). Effect of peanut and sunflower shell ash on properties of sustainable high-strength concrete. *Journal of Building Engineering*, 89, 109208. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109208>

Arbelaez-Perez, O. F., Buriticá-Cardona, Y., & Cataño-Ramos, W. A. (2022). Estimación de las emisiones de CO₂ de concretos con residuos de vidrio. *Revista Politécnica*, 18(35), 52–70. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n35a4>

Aristizabal-Alzate, C. E., & González-Manosalva, J. (2021). Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3). <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021006>

Ates, F., Park, K. T., Kim, K. W., Woo, B.-H., & Kim, H. G. (2023). Effects of treated biomass wood fly ash as a partial substitute for fly ash in a geopolymer mortar system. *Construction and Building Materials*, 376, 131063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131063>

Bikoko, T. G. L. J. (2021). A Cameroon Study on Mixing Concrete with Wood Ashes: Effects of 0-30% Wood Ashes as a Substitute of Cement on the Strength of Concretes. *Revue Des Composites et Des Matériaux Avancés*, 31(5), 275–282. <https://doi.org/10.18280/rcma.310502>

Cámara Nacional del Cemento. (2023). Hoja de Ruta México: Industria del Cemento.

Cheah, C. B., & Ramli, M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>

Chowdhury, S., Mishra, M., & Suganya, O. (2015). The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>

Coyasamin-Maldonado, O. V. (2016). Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón adicionado con cenizas de cáscara de arroz (CCA) y hormigón adicionado con cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBC). Universidad Técnica de Ambato.

- García Chumacero, J. M., Arriola, G., Villena Zapata, L. I., & Muñoz Perez, S. P. (2023). Strength of Concrete Using Partial Addition of Residual Wood Ash with Respect to Cement. *Revista Politécnica*, 52(1), 45–54. <https://doi.org/10.33333/rp.vol52n1.05>
- Gharibi, H., Mostofinejad, D., & Teymouri, M. (2023). Impacts of Conifer Leaves and Pine Ashes on Concrete Thermal Properties. *Construction and Building Materials*, 377, 131144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131144>
- Hamid, Z., & Rafiq, S. (2021). An experimental study on behavior of wood ash in concrete as partial replacement of cement. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3426–3429. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.776>
- Huaquisto Cáceres, S., & Belizario Quispe, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 20(2), 255–234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- Kareem, M. A., Akintonde, B. B., Adesoye, J. S., Ishola, K., Tijani, I. A., Adebajo, A. U., Thanni, M. O., Oduoye, W. O., Adeyanju, D. O., & Bello, A. A. (2023). Influence of cashew leaf ash as partial replacement for cement on the properties of fresh and hardened concrete. *Cleaner Waste Systems*, 4, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100063>
- León-Velez, A., & Guillén-Mena, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construido*, 20(3), 611–625. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>
- Lin, J., Yong, C. L., Zhang, F., Tan, T. H., Metselaar, H. S. C., El Hassan, H., & Mo, K. H. (2024). Sorted municipal solid waste ash as cement substitute: A study on paper ash and food waste ash. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03329. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03329>
- Mendonça, M. de F., Farias, M. M., Farias, C. L. de R., Picanço, M. de S., & Macêdo, A. N. (2023). Partial replacement of Portland cement by bamboo ashes. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 28(2). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0298>
- Nascimento, L. C., Baptista Junior, G., Xavier, G. de C., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., de Azevedo, A. R. G., & Alexandre, J. (2023). Use of wood bottom ash in cementitious materials: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4226–4243. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.071>
- ONNCCE. (2015a). NMX-C-021-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cemento para Albañilería (Mortero) - Especificaciones y Métodos de Ensayo.
- ONNCCE. (2015b). NMX-C-083-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo.
- ONNCCE. (2015c). NMX-C-105-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico Ligero Para uso Estructural - Determinación de la Masa Volumétrica.
- ONNCCE. (2017). NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo.
- ONNCCE. (2019). NMX-C -164-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso.
- ONNCCE. (2020). NMX-C-077-ONNCCE-2019. Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Ensayo.
- ONNCCE. (2021). NMX-C-165-ONNCCE-2020. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo.
- Rahul Rollakanti, C., Venkata Siva Rama Prasad, C., Poloju, K. K., Juma Al Muharbi, N. M., & Venkat Arun, Y. (2021). An experimental investigation on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with wood ash and fine sea shell powder. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1325–1330. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.164>
- Rendón-Belmonte, M., Martínez-Madrid, M., Martínez-Pérez, R. V., & Arroyo-Olvera, M. (2018). Concretos híbridos durables y sustentables, con Contenidos de ceniza volante.
- Rissanen, J., Giosuè, C., Ohenoja, K., Kinnunen, P., Marcellini, M., Letizia Ruello, M., Tittarelli, F., & Illikainen, M. (2019). The effect of peat and wood fly ash on the porosity of mortar. *Construction and Building Materials*, 223, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.228>
- Sirico, A., Bernardi, P., Sciancalepore, C., Vecchi, F., Malcevski, A., Belletti, B., & Milanese, D. (2021). Biochar from wood waste as additive for structural concrete. *Construction and Building Materials*, 303, 124500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124500>
- Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74(1), 211–278. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>
- Tavares, J. C., Lucena, L. F. L., Henriques, G. F., Ferreira, R. L. S., & dos Anjos, M. A. S. (2022). Use of banana leaf ash as partial replacement of Portland cement in eco-friendly concretes. *Construction and Building Materials*, 346, 128467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128467>
- Teker Ercan, E. E., Andreas, L., Cwirzen, A., & Habermehl-Cwirzen, K. (2023). Wood Ash as Sustainable Alternative Raw Material for the Production of Concrete—A Review. *Materials*, 16(7), 2557. <https://doi.org/10.3390/ma16072557>
- Thomas, B. S., Yang, J., Mo, K. H., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Ariyachandra, E. (2021). Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102332. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102332>
- Timoteo-Caro, Y. R. (2021). Influencia de sustitución del cemento por ceniza de madera sobre la resistencia a la compresión del concreto f'c=210 kg/cm² – 2021 [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.