

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4746

Análisis del desempeño de concreto con sustitución de ceniza de bagazo de caña en zapatas aisladas experimentales

Oscar Moreno Vázquez

omorenov@itsm.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6267-9504>

Pablo Julián López González

jlopezg@itsm.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6281-6756>

David Reyes González

dreyesg@itsm.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6400-5984>

Jorge Luis Del Juncal Aguirre

182t0585@itsm.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5312-3501>

Juan Carlos González Tapia

182t0600@itsm.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9004-8635>

Departamento de ingeniería civil
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Misantla, Veracruz, México

Correspondencia: omorenov@itsm.edu.mx

Artículo recibido 05 diciembre 2022 Aceptado para publicación: 05 enero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Moreno Vázquez, O., López González, P. J., Reyes González, D., Del Juncal Aguirre, J. L., & González Tapia, J. C. (2023). Análisis del desempeño de concreto con sustitución de ceniza de bagazo de caña en zapatas aisladas experimentales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 4154-4172.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4746

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el estudio experimental de zapatas aisladas, evaluando el efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto en diferentes porcentajes en el cemento, esto con el objetivo de evaluar las variaciones en la resistencia a la compresión, además se analizan las fallas que presenta la zapata aislada. La elaboración del espécimen consta de la caracterización de los agregados que conforman la mezcla de concreto asimismo de la ejecución de las sustituciones en el cemento en un (0%, 3%, 5%), sin refuerzo y (0%) con refuerzo. El diseño es ejecutado por el método del ACI 211.1 por volúmenes absolutos, para una resistencia estimada de 250 kg/cm^2 , una vez elaborados los especímenes de concreto se introdujeron en el suelo arcilloso a una profundidad de 0.50 m. del nivel de piso terminado, donde permanecieron por 50 y 112 días. posteriormente se ejecuta la prueba de resistencia a la compresión mediante la normativa NMX-C-083-ONNCCE-2014. donde se observan resistencias mecánicas inferiores al valor del concreto control y la falla más predominante es la de tipo compresión, sin embargo, se recomienda especímenes del 5%, debido a que su comportamiento es similar al concreto control.

Palabras clave: *cemento; zapatas aisladas; cimentación; puzolana.*

Performance analysis of concrete with sugarcane bagasse ash replacement in experimental isolated footings

ABSTRACT

This paper aims to analyze the experimental study of isolated footings through an evaluation of the effect of sugarcane bagasse ash as a replacement with different percentages in cement, with the intention of evaluating compression resistance variations, in addition, isolated footing failure analysis is carried out. The making of the sample consists of a description of the aggregates that make up the concrete mix, as well as of the cement replacement application (in a proportion of the 0%, 3%, 5%) unreinforced, and (0%) reinforced. The design is carried out with the ACI 211.1 absolute volume method, for an estimated resistance of 250 kg/cm², once the concrete samples were made, they were deposited into clay soil as deep as .50 m below completed flooring, where they remained for 50 and 112 days. Subsequently, the compression resistance test is made under NMX-C-083-ONNCCE-2014 regulatory standards wherein lower control concrete value mechanical resistance is apparent, and the prevailing failure is that of compression type, however, samples at 5% are recommended since its performance is like control concrete.

Key words: *cement; isolated footings; foundation; pozzolana.*

INTRODUCCIÓN

En México existen más de 35 millones de viviendas edificadas con diferentes materiales, tan solo el 92% de esas viviendas son elaboradas mediante materiales como block, tabique, concreto, o cantera. (Instituto Nacional de estadística y Geografía [INEGI], 2020) la gran mayoría de estas edificaciones usan diferentes tipos de cimentaciones dependiendo del suelo donde se desplante la construcción.

En las cimentaciones, la interacción suelo estructura es importante debido al contacto dinámico que hay con el suelo, la cimentación y la estructura (Villareal, 2020). Esta interacción está regida por los elementos estructurales y los suelos adyacentes, (Fouda et al., 2022) donde se ve directamente afectada la estructura por el desplazamiento de partículas de suelo que se encuentra debajo de la Zapata aislada (Conniff y Kiousis, 2007). Dando como resultado fuerzas internas dentro de la estructura que afectan a elementos estructurales como Vigas, columnas, losas y muros, estos pueden transferir los esfuerzos a otros niveles de la edificación. por otra parte, es importante conocer el suelo donde se ejecuta la obra, debido a que hay tipos de suelos donde resulta inviable la construcción con algunos tipos de cimentaciones (Anagua, 2019), por consecuencia se pueden desencadenar diferentes tipos de fallas en la cimentación. (González, 2015)

Las zapatas aisladas presentan diferentes tipos de fallas como: flexión, compresión cortante y punzonamiento, estas son producidas por diferentes tipos de esfuerzos críticos los cuales son: compresión de la columna sobre la zapata, la presión de la zapata contra el suelo de desplante, esfuerzos diagonales de tensión, esfuerzos tensores en el acero, esfuerzos de compresión en el concreto y esfuerzo de adherencia entre el concreto y acero (Narayanasamy et al., 2012).

Otro punto que se analiza en este trabajo es el Cemento, el cual es el elemento principal de gran demanda en elaboración de mezclas para concreto, sin embargo, en su producción se emana CO₂ al medio ambiente, contribuyendo con un aproximado del 4 al 8% de emisiones de CO₂ global (Lippiatt, 2020; Andrew, 2018; Xi et al., 2016), al observar las cifras anteriores se debe priorizar en utilizar cementantes alternativos que reduzcan la huella de carbono (Herath et al., 2020).

La ceniza de bagazo de caña (CBCA) es un subproducto de desecho de la fabricación de la caña de azúcar producido por los Ingenios Azucareros. El CBCA se ha especificado como un material alternativo complementario al cemento (Chusilp et al., 2009). Además, el

CBCA tiene una buena actividad puzolánica debido a los altos contenidos de sílice, si se trata correctamente, se pueden maximizar su potencial puzolánico (Kolawole, 2021). sin embargo, con porcentajes inferiores al 20% de CBCA como remplazo del cemento se logra mejores desempeños mecánicos en los especímenes de concreto (Bahurudeen, 2015), por lo tanto, el CBCA podría ser un buen aliado en la elaboración de concretos para Zapatas aisladas, para disminuir la cantidad de cemento a utilizar y contribuir a la reducción del desecho agroindustrial CBCA, emanado por la industria del azúcar (Ariza et al., 2019). Por consiguiente, este concreto con sustitución de CBCA es candidato para su exposición en el suelo, en este caso como elemento tipo Zapata aislada

El objetivo de este trabajo es evaluar las propiedades mecánicas y analizar las fallas generadas en las Zapatas aisladas elaboradas con concretos modificados con CBCA con sustituciones del 0,3 y 5%, sin armado de acero y 0% con armado de acero.

METODOLOGÍA

La recolección de la ceniza de bagazo de caña (CBCA) se ejecutó en el ingenio la Gloria en ciudad Cardel, La antigua, Veracruz, México. La ceniza pasó por un proceso de molienda, secado y tamizado para su correcta utilización. por consiguiente, se caracterizaron físicamente los agregados pétreos que se utilizaron en la elaboración del concreto, como se muestra en la tabla 1. Los agregados fueron obtenidos en bancos de materiales de la región de Misantla, Veracruz, México.

Tabla 1

Características físicas de los agregados para la elaboración del concreto

Características físicas	Agregado Grueso	Agregado Fino
PVSS (gr/cm ³)	3.17	2.95
PVSV (gr/cm ³)	3.88	3.2
Módulo de Finura	8.63	3.29
Absorción (%)	1.63	1.5
Densidad (gr/cm ³)	2.54	1.24

Fuente: Elaboración Propia

Nota: Las abreviaturas colocadas en la tabla 1 son las siguientes: Peso volumétrico seco suelto (PVSS), Peso volumétrico seco varillado (PVSV).

La caracterización de los agregados se ejecutó mediante la normativa ONNCCE. (ONNCCE,2020; ONNCCE,2019; ONNCCE,2014; ONNCCE,2004).

Para la elaboración de la mezcla se utilizó el método del Instituto Americano del concreto ACI 211.1 (ACI, 2022), Una vez obtenidos los volúmenes de material para la elaboración de la mezcla, estos son convertidos en peso Kg. para su correcta ejecución, Se eligió una relación agua/cemento de 0.5 para una resistencia estimada de 250 kg/cm². Los especímenes tipo zapata aislada siguen la nomenclatura que se indican en la tabla 2 y las dosificaciones como se indica en la tabla 3.

Tabla 2 Nomenclatura empleada en los especímenes tipo Zapata aislada

Descripción	Nomenclatura	Cantidad de especímenes por edad
Zapata control sin Armado de acero	ZCS0	3
Zapata control con armado de acero	ZCA0	3
Zapata con CBCA 3% sin armado de acero	ZCBCA3	3
Zapata con CBCA 5% sin armado de acero	ZCBCA5	3

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3 Mezclas de concreto modificado base CBCA

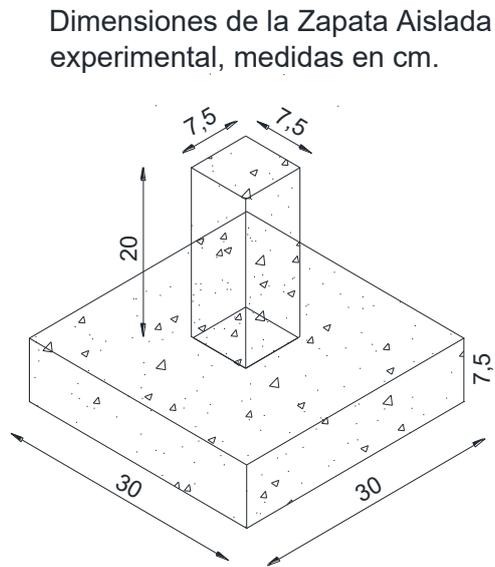
Nomenclatura	% Cemento	% CBCA
ZCS0	100	0
ZCA0	100	0
ZCBCA3	97	3
ZCBCA5	95	5

Fuente: Elaboración Propia

Para dimensionar la zapata experimental se tomó como referencia el estudio denominado “Estudio experimental de análisis de fallas en Zapatas aisladas” del autor Narayanasamy (Narayanasamy et al., 2012), quien ocupa medidas de espécimen, acorde al tipo de prensa de compresión axial que se tiene en el laboratorio de materiales.

Las zapatas aisladas experimentales tienen un dimensionamiento de 30cm X 30cm X 27.5 cm, como se muestra en la figura 1.

Figura 1 Dimensiones de la Zapata Aislada Experimental en Cm



Fuente: elaboración propia

Se ejecutaron 3 especímenes tipo zapata aislada por cada tipo de mezcla, como se indica en la tabla 2, así como también se ejecutaron las mezclas correspondientes como se menciona en la tabla 3, con una relación agua/cemento de 0.5 y con obtención de pesos de los materiales mediante el método ACI 211.1 (ACI, 2022)

Se ejecutó primero la dosificación de los materiales y agregados para la mezcla, figura 2. después se habilitaron los moldes, los cuales fueron elaborados con madera y se lubricaron con aceite para evitar que se pegue el concreto y la superficie del molde como se muestra en la figura 3.

Figura 2 Obtención de pesos en kg para la ejecución de mezclas modificadas.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. *Habilitado y engrasado de moldes tipo zapata aislada.*



Fuente: elaboración propia.

La mezcla se ejecutó en una superficie limpia y plana, utilizando palas para la correcta homogenización de los materiales constituyentes. los especímenes tipo zapata se colocaron en un lugar limpio, sin vibraciones ni corrientes de aire o cambios bruscos de temperatura, posteriormente el concreto fresco se colocó por capas en el espécimen, al ser un espécimen experimental prismático se ejecutaron las penetraciones con varilla tomándose como referencia lo que menciona norma NMX-C-159-ONNCCE-2016, esto para eliminar oquedades y porosidad en los especímenes (ONNCCE, 2016).

Para la obtención del revenimiento de la mezcla se ejecutó mediante el procedimiento establecido por la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010, además se consultó la norma ACI 211.1 donde señala el revenimiento óptimo para la ejecución de Cimentaciones y Zapatas, donde se menciona que la mezcla debe obtener un revenimiento de 7 a 2.5 cm. (ACI,2022; ONNCCE,2010)

El acero utilizado en la elaboración de los especímenes con armado, tipo ZCA0, fue varilla del no 3 (3/8"), en la zona de la zapata se emplearon 5 varillas horizontales y 5 varillas verticales ejecutando un emparrillado con espaciado entre varillas de 5.5 cm, las varillas tienen una longitud de 28 cm para dejar 1 cm de recubrimiento en cada extremo, como se muestra en la figura 4 y 5. En la columna se emplearon 4 varillas del no 3 (3/8") de 35 cm contando con excedente para ejecutar el anclado con el emparrillado de la losa de zapata, estas tendrán una separación de 3.5 cm, entre ellas y un recubrimiento libre de 1 cm en cada extremo. Los estribos se ejecutan con alambón con una separación entre estribos de 5 cm en la zona de la columna de la zapata.

Figura 4

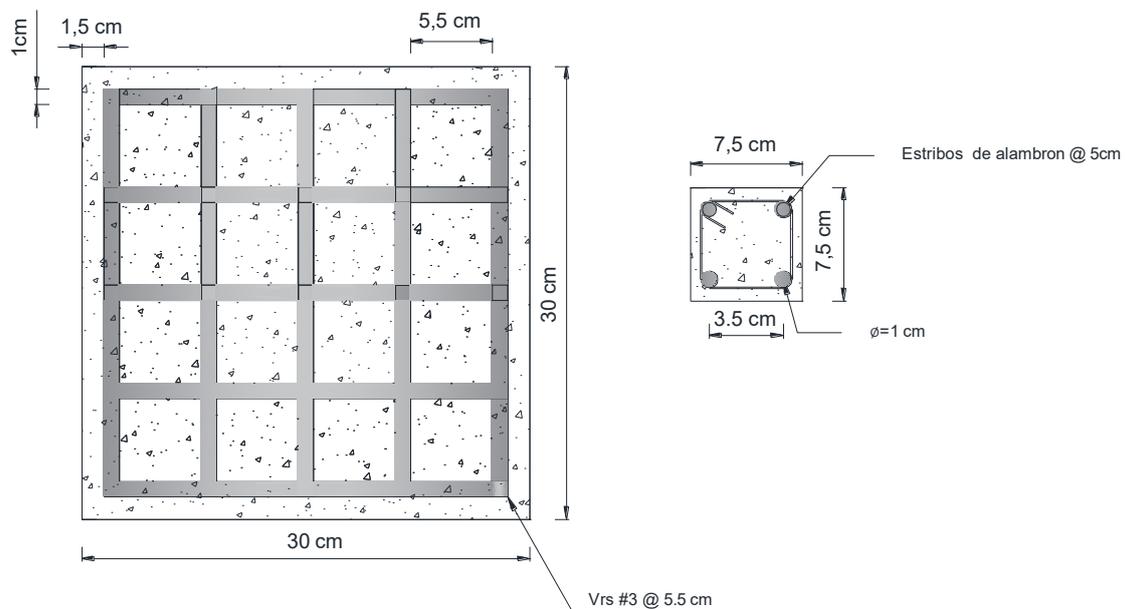
Especimen del tipo ZCA0.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5

Distribución y espaciado en el acero de refuerzo para los especímenes tipo ZCA0.



Nota: las abreviaturas colocadas en la figura 5 son las siguientes, Vrs significa varillas, ϕ Significa diámetro, # significa Número de designación. la separación entre varillas mostrada no es a ejes, es la medida del claro entre varillas, las medidas están en cm.

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Colado de especímenes tipo Zapata aislada.



Fuente: elaboración propia.

Una vez colados los especímenes tipo zapata como se muestra en la figura 6, se procedió a desmoldar a las 24 horas para el proceso de curado, sin embargo, los especímenes se analizaron lo más apegado a las condiciones de obra de la región. Estos se transportaron a la estación de trabajo en la Ciudad de Misantla, Veracruz, México y se introdujeron en el suelo, a 50 cm del nivel de piso terminado, con el fin de analizar la interacción y afectación del suelo con el espécimen de concreto modificado tipo Zapata aislada. se colocaron distribuidas por el terreno como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Introducción de zapata aislada con concreto modificado en el suelo de la estación de trabajo.



Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la compresión de los especímenes se llevó a cabo conforme a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, colocando los especímenes tipo zapata aislada en la máquina

para obtener la resistencia a la compresión y la distribución de esfuerzos en la zapata, con respecto un área determinada, como se muestra en la figura 8, se utilizó la máquina de compresión axial, cronometro, y placas para calzar el espécimen y asiente correctamente. (ONNCCE, 2014)

Figura 8. *Ensayo de resistencia a la compresión axial en espécimen tipo Zapata aislada con concreto modificado con CBCA.*



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, al finalizar el ensayo de resistencia a la compresión se analizaron los resultados obtenidos en la prueba y las fallas ocasionadas en la zapata (McCormac et al., 2018; Narayanasamy et al., 2012).

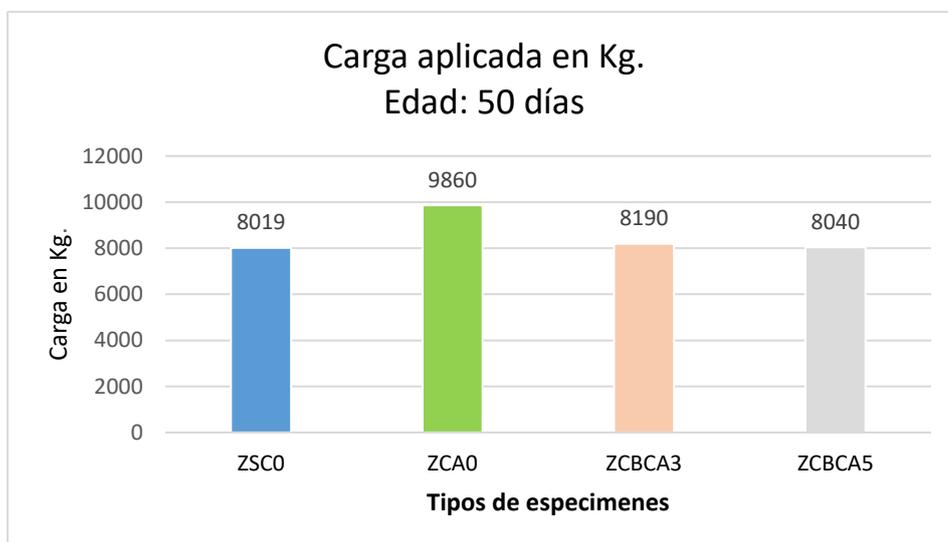
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinaron las resistencias a la compresión simple de los especímenes tipo zapata aislada con concreto modificados en edades de 50 y 112 días, estos fueron extraídos de la estación de trabajo y llevados a laboratorio. se ensayaron los especímenes tomando las recomendaciones de ensayo de la norma NMX-083-ONNCCE-2014. Obteniendo los resultados de los especímenes promedio como se muestran en la figura 10 con respecto a la resistencia a la compresión axial en elementos del tipo Zapata aislada de 250 kg/cm^2 , donde se ejecutó el análisis con respecto a la base de la columna del espécimen, el cual cuenta con un área de 56.25 cm^2 .

El empleo de diferentes porcentajes de ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) como sustituto al cemento, puede contribuir a la variación de resistencia a la compresión axial, por ejemplo en los especímenes (ZCBCA3) con una sustitución al 3% de CBCA con una edad de 50 días, obtuvieron un resultado de 145.6 kg/cm^2 , superando al espécimen

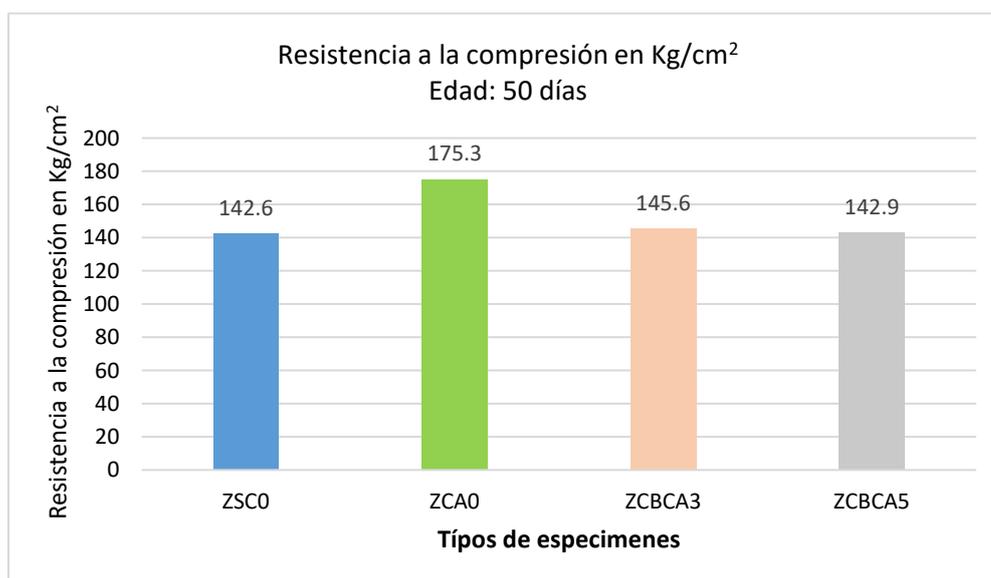
control con una resistencia promedio de 142.6 kg/cm², como se muestra en la figura 10, sin embargo los especímenes tipo Zapata aislada con armado (ZCA0), obtuvieron resistencia mayores debido a la contribución del Acero de refuerzo en el espécimen.

Figura 9. Carga aplicada en Kg. a los especímenes tipo Zapata aislada a una edad de 50 días.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 10. Resistencia a la compresión aplicada en kg/cm² a los especímenes tipo Zapata aislada a una edad de 50 días.



Fuente: Elaboración Propia

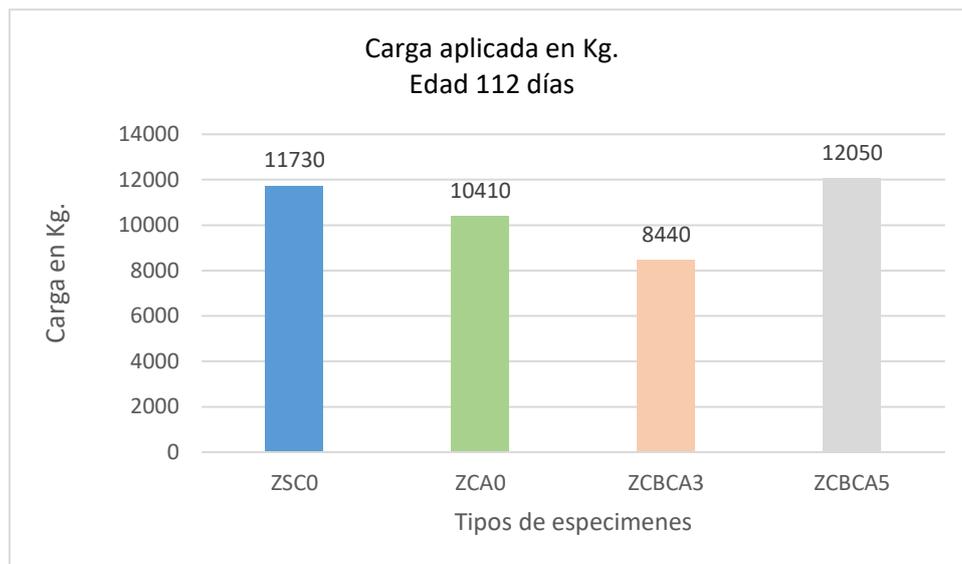
Por otra parte, en la figura 9 se pueden observar la carga soportada en cada uno de los diferentes especímenes a una edad de 50 días, mostrando una ventaja en los especímenes con acero de refuerzo (ZCA0) con respecto a los demás.

Por consiguiente, se analizaron los especímenes de edades de 112 días, donde se observa que las mezclas de ZCBCA5 con 5% de CBCA, incrementaron en su resistencia promedio,

como se observa en la figura 12 donde el espécimen (ZCBCA5) alcanzó una resistencia de 214.2 kg/cm² superando al concreto control (ZSCO) y al concreto con acero de refuerzo (ZCA0).

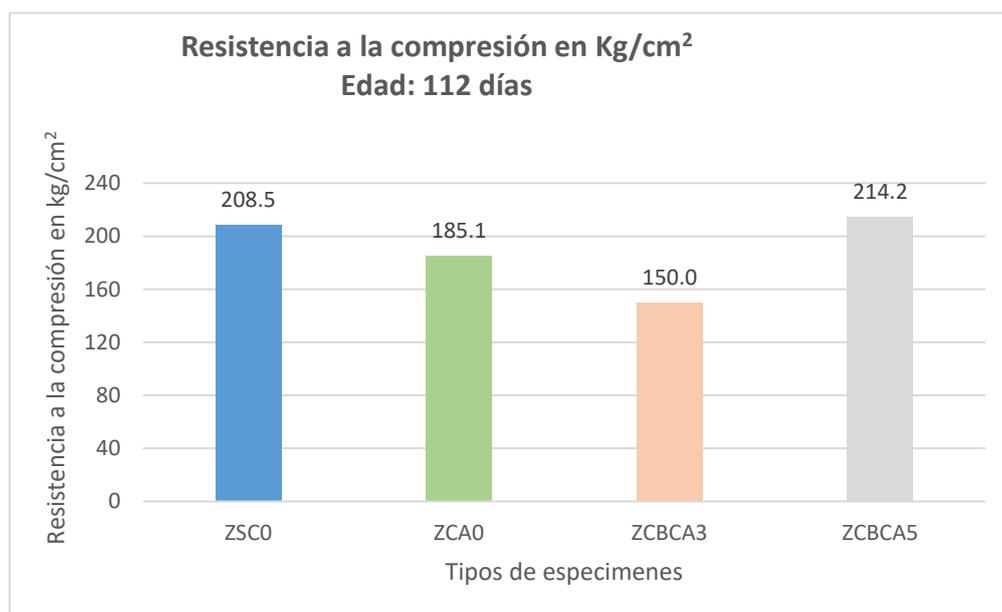
Continuando con el análisis se muestra la figura 11, donde el resultado más prominente fue el de los especímenes (ZBCA5) al 5% de CBCA con una carga de 12050 kg. los cuales superaron a los demás especímenes.

Figura 11. Carga aplicada en Kg. a los especímenes tipo Zapata aislada, edad de 112 días.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 12 Resistencia a la compresión aplicada en kg/cm², a los especímenes tipo Zapata edad de 112 días



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4 *Análisis de Fallas en especímenes Tipo Zapata con edad de 50 días*

Nomenclatura Zapata	Carga en kg.	Observaciones	Tipo de Falla
ZCS0-1	8013	Alto grado de fisuramiento en la base de zapata	Compresión
ZCS0-2	8025	Alto grado de fisuramiento en la base Zapata y grietas en columna	Flexión y cortante
ZCS0-3	8018	Alto grado de fisuramiento en la base de zapata	Compresión
ZCA0-1	9856	Fisuramiento considerable en base de zapata y grietas en la zona de columna	Flexión y cortante
ZCA0-2	9852	Fisuramiento considerable en la zona de columna y se presenta fisuras en la zona de losa	Compresión
ZCA0-3	9871	Fisuramiento considerable en la zona de columna, falla en columna	Flexión y cortante
ZBCA3-1	8199	Alto grado de fisuramiento en la base de zapata	Compresión
ZBCA3-2	8189	Alto grado de fisuramiento en la base de zapata	Compresión
ZBCA3-3	8181	Alto grado de fisuramiento en la base de zapata	Compresión
ZBCA5-1	8053	Fisuramiento importante en losa de la zapata	Compresión
ZBCA5-2	8029	Fisuramiento considerable en la zona de columna, falla en columna	Flexión y cortante
ZBCA5-3	8039	Alto grado de fisuramiento en la base de zapata	Compresión

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4 se puede observar los tipos de fallas que presentaron en los diferentes tipos de especímenes introducidos en el suelo, teniendo como falla frecuente las de tipo compresión, flexión y cortante. esto a una edad de 50 días, por otra parte, se puede analizar la tabla 5, la cual muestra las fallas más recurrentes, entre ellas la de compresión que fue la más predominante, estos especímenes se encontraban introducidos en el suelo con una edad de 112 días.

Tabla 5. Análisis de Fallas en especímenes Tipo Zapata con edad de 112 días

Nomenclatura Zapata	Carga en kg.	Observaciones	Tipo de Falla
ZCS0-4	11745	Alto grado de fisuramiento en la base y falla en columna	Compresión
ZCS0-5	11710	Alto grado de fisuramiento en la base y falla en columna	Compresión
ZCS0-6	11735	Alto grado de fisuramiento en la base y falla en columna	Compresión
ZCA0-4	10429	Colapso en Zapata y columna	flexión y cortante
ZCA0-5	10395	presentó falla a los costados de la columna quitando el recubrimiento de concreto	Compresión
ZCA0-6	10405	Elevado número de grietas zapata y colapso en columna	flexión y cortante
ZBCA3-4	8399	La columna falló por aplastamiento	Compresión
ZBCA3-5	8390	La columna falló por aplastamiento	Compresión
ZBCA3-6	8530	Elevado número de grietas en la zona de zapata. Colapso en columna	flexión y cortante
ZBCA5-4	13011	Columna falló por aplastamiento	Compresión
ZBCA5-5	12008	Columna falló por aplastamiento	Compresión
ZBCA5-6	11132	Columna falló por aplastamiento	Compresión

Fuente: Elaboración Propia

En las figuras 13,14 y 15, se muestran algunos ejemplos de las fisuras obtenidas en los ensayos de resistencias a la compresión y que fueron analizadas para su identificación. entre ellas se muestran fallas por compresión, flexión y cortante.

Figura 13. Fisuramiento en la base de la zapata



Fuente: Elaboración Propia

Figura 14. *Columna fallada por aplastamiento en la zona de columna*



Fuente: Elaboración Propia

Figura 15. *Alto grado de fisuramiento en la base y falla en columna*



Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

Se identificó que los especímenes (ZBCA3) que fueron introducidos en suelo arcilloso por 50 días, obtuvieron un incremento del 2% en sus resistencias a la compresión con respecto al espécimen control (ZSC0), sin embargo, con el espécimen que tiene acero de refuerzo y cemento convencional (ZCA0) incrementó su resistencia en un 16.9% con respecto al espécimen control (ZSC0) demostrando la contribución del acero de refuerzo. Se recomienda usar pequeños porcentajes para sustituir con Ceniza de bagazo de caña CBCA a edades tempranas. debido a la respuesta favorable en especímenes con sustitución del 3%.

Por otra parte, los especímenes evaluados a 112 días mostraron resultados favorables, las mezclas (ZBCA5), obtuvieron valores superiores a la zapata de concreto control (ZSC0) y por encima de la zapata con acero de refuerzo (ZCA0). esto demuestra que las mezclas con el 5% de sustitución de cemento por CBCA, puede contribuir a mejores resistencias a la compresión. la mayoría de las zapatas falló a compresión debido a la posición y transmisión de la carga a la estructura geométrica del espécimen.

La mezcla tiene beneficios en costo y reducción en impacto ambiental, debido a que se pueden obtener concretos con características mecánicas similares o superiores.

Con respecto a la resistencia de diseño de concreto para Zapata aislada como marca la norma ACI 211.1 (ACI,2022), no se llegó a lo esperado, lo cual es 250 kg/cm^2 esto puede atribuirse a diferentes factores como las características del agregado, el vibrado, la homogenización de los materiales pudiendo afectar las características mecánicas del espécimen.

se recomienda a investigaciones futuras tener cuidado con el amarre de acero de refuerzo y su correcta colocación, así como también ejecutar moldes que den acceso a instrumentos para la vibración del concreto, debido a que es un factor sumamente importante para la distribución del agregado en la zapata aislada y evitar inducción de fallas.

LISTA DE REFERENCIAS

- ACI Committee 211 (2002), Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).
- Anagua Coila, R. (2019). Evaluación del comportamiento carga-asentamiento en escala completa de zapatas sobre limo arcillo blando y limo arcilloso reforzado por columnas de suelo-cemento compactado (Tesis de licenciatura).
- Andrew, R. M. (2017). Global CO2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*, August, 1–52.
- Ariza-Figueroa, H. A., Croche, R., Almeraya-Calderón, F., Cabral, J., Gaona-Tiburcio, C., Ramírez-García, A. C., ... & Baltazar-Zamora, M. A. (2019). Estudio de la durabilidad de concretos ternarios con ceniza de bagazo de caña de azúcar y humo de sílice. <https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V2PAT177>
- Bahurudeen, A., Kanraj, D., Dev, V. G., & Santhanam, M. (2015). Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete*

- Composites, 59, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>
- Conniff, D. E., & Kiousis, P. D. (2007). Elastoplastic medium for foundation settlements and monotonic soil–structure interaction under combined loadings. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 31(6), 789-807. <https://doi.org/10.1002/nag.556>
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3352-3358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030>
- Fouda, M. A., Ibrahim, A., El-Kateb, M., Elkateb, T., & Khalil, A. (2022). Numerical investigation for strengthened RC footings with square concrete jacketing. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00807. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00807>
- González Sandoval, M. Y. (2015). Estudio de la interacción suelo-estructura en el rango elástico e inelástico de una zapata aislada mediante modelos físicos a escala y mediante elementos finitos (Tesis Doctoral, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito).
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2020). Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 258, 120606. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820326118>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2020). Viviendas. Cuéntame INEGI. Recuperado 14 de diciembre de 2022, de <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/vivienda.aspx>
- Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., Fanijo, E., Paul, S. C., & Combrinck, R. (2021). State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>
- Lippiatt, N., Ling, T.-C., & Pan, S.-Y. (2020). Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective. *Journal of Building Engineering*, 28(101062), 101062. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101062>

- McCormac, J. C., Brown, R. H., & de la Cera Alonso, J. (2018). Diseño de concreto reforzado: edición 318-14 del Código ACI (10.a ed.). Alfaomega.
- ONNCCE. (2004). NMX-C-073-ONNCCE-2004-Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico- Masa Volumétrica - Método de Prueba.
- ONNCCE. (2010). NMX-C-156-ONNCCE-2010-Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación Del Revenimiento En El Concreto Fresco.
- ONNCCE. (2014). NMX-C-164-ONNCCE-2014-Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico- Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso - Método de Prueba.
- ONNCCE. (2014). NMX-C-083-ONNCCE-2014-Industria De La Construcción- Concreto- Determinación De La Resistencia A La Compresión De Especímenes-Método De Ensayo.
- ONNCCE. (2016). NMX-C-159-ONNCCE-Industria De La Construcción-Concreto- Elaboración Y Curado De Especímenes De Ensayo.
- ONNCCE. (2019). NMX-C-077-ONNCCE-2019-Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico- análisis granulométrico - Método de Prueba.
- ONNCCE. (2020). NMX-C-165-ONNCCE-2020-Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico- Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino- Método de Prueba.
- Narayanasamy, R., Ceniceros García, P. A., Salazar Ayala, O., Leal Rebollosa, H., Jaramillo Alonso, R., & López Ortega, V. A. (Eds.). (2012). Estudio experimental de análisis de fallas en zapatas aisladas (18.a ed.) [Congreso]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Villarreal, G. (2020). Interacción Suelo Estructura En Edificaciones Con Zapatas Aisladas. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(3), 311-332.
- Xi, F., Davis, S., Ciais, P. et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geosci* 9, 880–883 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.