DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 398-406

Influencia de la grava volcánica en la resistencia a la compresión del concreto simple
Influence of volcanic gravel on the compressive strength of plain concrete

B. Samperio-Hernández [a], I.N. Cuevas-López [a], O. Caballero-Garatachea [a], J. Olguín-Coca [a], L. Lizárraga-Mendiola [a],

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México*

Resumen

Se presenta una investigación sobre el uso del tezontle, una roca volcánica ligera y porosa, como sustituto parcial de la grava en la elaboración de concreto simple. El objetivo fue evaluar su resistencia a la compresión para determinar su viabilidad como material alternativo y sostenible. Se elaboraron dos mezclas: una convencional con grava triturada y otra con sustitución del 20 % de la grava por tezontle, ambas diseñadas para una resistencia de 250 kg/cm². Los ensayos se realizaron en cilindros de concreto sometidos a curado por membrana y evaluados a los 7, 14 y 28 días. La mezcla con tezontle alcanzó resistencias promedio de 109.71, 132.08 y 195.68 kg/cm², lo que evidencia un incremento progresivo de la resistencia y su viabilidad técnica en aplicaciones en las que se priorice el aligeramiento simple. Asimismo, el uso de tezontle favorece el aprovechamiento de recursos locales y reduce los impactos ambientales asociados a la extracción y al transporte, lo que respalda su potencial como alternativa sostenible para la producción de concreto, siempre que se optimicen el diseño de la mezcla y las condiciones de curado.

Palabras clave: Sustitución de agregados, resistencia a la compresión, curado y diseño de mezcla, alternativa sostenible, innovación en materiales constructivos.

Abstract

This paper presents research on the use of tezontle, a lightweight and porous volcanic rock, as a partial substitute for gravel in plain concrete. The objective was to evaluate its compressive strength to assess its viability as an alternative, sustainable material. Two mixtures were prepared: a conventional one with crushed gravel and another with 20% of the gravel replaced by tezontle, both designed for a compressive strength of 250 kg/cm². Tests were performed on concrete cylinders subjected to membrane curing and evaluated at 7, 14, and 28 days. The mixture with tezontle achieved average compressive strengths of 109.71, 132.08, and 195.68 kg/cm², demonstrating a progressive increase in strength and its technical viability in applications where plain concrete weight reduction is prioritized. Furthermore, the use of tezontle favors the consumption of local resources and reduces the environmental impacts associated with extraction and transport, supporting its potential as a sustainable alternative for concrete production, provided that the mix design and curing conditions are optimized.

Keywords: Aggregate replacement, compressive strength, curing and mix design, sustainable alternative, innovation in construction materials.

1. Introducción

La industria de la construcción ha experimentado una evolución continua en sus materiales y procesos, impulsada por la necesidad de mejorar la durabilidad, la sostenibilidad y la eficiencia de las estructuras; sin embargo, a Isaac Johnson se le conoce como el padre del cemento moderno por las mejoras que implementó (Vidaud, 2013). Entre los materiales más utilizados se encuentra el concreto, cuya versatilidad y resistencia lo han posicionado como un componente fundamental en obras civiles y arquitectónicas (Ortiz Calderón, 2019).

Los agregados alternativos han cobrado relevancia, especialmente aquellos que pueden obtenerse de forma local y con menor impacto ambiental. En particular, las rocas volcánicas, como el tezontle, representan una opción viable en las regiones volcánicas del centro de México, donde este

*Autor para la correspondencia: omar_caballero@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: sa361870@uaeh.edu.mx (Berenice Samperio-Hernández), cu435368@uaeh.edu.mx (Ingrid Nayeli Cuevas-López), omar_caballero@uaeh.edu.mx (Omar Caballero-Garatachea), olguinc@uaeh.edu.mx (Francisco Javier Olguín-Coca), mendiola@uaeh.edu.mx (Liliana Lizárraga-Mendiola).

Historial del manuscrito: recibido el 07/06/2026, última versión-revisada recibida el 03/09/2026, aceptado el 24/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18091

material es abundante y accesible. El tezontle, caracterizado por su porosidad y ligereza, es una roca volcánica empleada en diversas aplicaciones de la construcción por sus propiedades de aislamiento térmico y su capacidad para reducir el peso de las estructuras (Rodríguez Morales, 2018). Este material, por su naturaleza, permite reducir la carga muerta en las construcciones, lo cual puede resultar ventajoso en diseños simples específicos, como muros divisorios y edificaciones de bajo impacto.

La utilización de tezontle no solo puede reducir la dependencia de materiales convencionales, sino que también apoya la sostenibilidad al aprovechar un recurso ampliamente disponible en regiones de origen ígneo, cuya extracción y procesamiento requieren un nivel mínimo de tratamiento y movilización, lo que contribuye a reducir sus costos en comparación con otros agregados. La incorporación de tezontle en elementos constructivos contribuye a disminuir el peso propio de las estructuras, lo que puede permitir el diseño de cimentaciones y componentes simples más ligeros y, en consecuencia, más económicos (Rodríguez Morales, 2011).

A lo largo de los años, el uso de agregados ligeros ha permitido desarrollar concreto de menor densidad, conocido como concreto ligero. Este tipo de concreto es valorado no solo por reducir la carga muerta de las estructuras, sino también por sus propiedades de aislamiento térmico y acústico, que pueden contribuir a la eficiencia energética de los edificios (Muñoz Vargas, 2025). Sin embargo, los desafíos inherentes a los agregados ligeros incluyen su mayor absorción de agua y menor resistencia en comparación con los agregados convencionales, lo que requiere ajustes en la mezcla y un proceso de curado adecuado para asegurar que el concreto final cumpla con los requisitos simples. De acuerdo con Rodríguez Morales (2018), el uso del tezontle en el concreto puede ser adecuado en proyectos que prioricen la reducción de peso y en construcciones con requerimientos específicos de aislamiento.

En diversos estudios se han evaluado diseños de mezcla de concreto en los que la grava ha sido sustituida parcialmente por tezontle, con el propósito de comparar su desempeño con el del concreto tradicional. La metodología analizada por González Hernández (2024) y Muñoz Vargas (2025) se centró en la fabricación de cilindros de concreto con tezontle mediante tres métodos de curado: aspersión, curado con membranas y curado a temperatura ambiente. La elección de estos métodos permitió observar cómo el curado influye en el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto, especialmente en etapas críticas del fraguado y del endurecimiento (González Hernández, 2024; Muñoz Vargas, 2025).

Según las pruebas realizadas en otras investigaciones sobre agregados volcánicos, el control del curado es esencial para alcanzar la resistencia óptima en concretos con alta porosidad, ya que un curado inadecuado puede reducir la durabilidad y la resistencia del material (Zambrano Navarrete et al., 2022). En términos de resistencia, el concreto con tezontle puede presentar diferencias respecto del concreto tradicional. El tezontle, al ser un material menos denso que la grava, reduce el peso del concreto, lo cual podría resultar beneficioso en construcciones de bajo impacto simples (González Hernández, 2024). No obstante, esta reducción de la densidad también puede conllevar una disminución de la resistencia a la compresión, lo que podría limitar su aplicabilidad en determinadas estructuras. En las primeras etapas de curado, el concreto con tezontle tiende a desarrollar resistencias inferiores a las del concreto convencional con grava. Esto se debe a la menor densidad y resistencia a la compresión del tezontle en comparación con los agregados más densos, como la grava (Solís Carcaño et al., 2013). El uso de tezontle como agregado en el concreto puede mejorar la retención de humedad y la distribución interna del agua durante el curado, pero también puede aumentar la porosidad, lo que puede requerir un manejo cuidadoso del curado para evitar secados prematuros y asegurar la resistencia adecuada del concreto.

1.1. Planteamiento del problema

En la construcción se conoce al concreto como el material más utilizado debido a su gran resistencia y durabilidad, sin embargo, para su producción se necesitan diferentes agregados, entre ellos la grava. La extracción de este agregado convencional ocasiona impactos ambientales como la erosión del suelo y la reducción de la biodiversidad. Según la ONU (2019) la demanda mundial de arena y grava, que asciende a unos cincuenta mil millones de toneladas cada año, provoca inundaciones o el agotamiento de los acuíferos y contribuye a empeorar las sequías. Además, el desarrollo de la infraestructura ha triplicado la demanda de esta materia prima en los últimos 20 años.

De acuerdo con González Hernández (2024), se considera posible la utilización de un concreto simple liviano reemplazando la grava tradicional por grava de origen volcánica, la cual se encuentra en gran cantidad en el estado de Hidalgo, por lo que resulta ser un material más económico y abundante; además, cuenta con propiedades relevantes como ligereza, resistencia y propiedades de aislamiento térmico. Debido a lo anterior, Muñoz Vargas (2025) evaluó el comportamiento del concreto con sustitución parcial del agregado grueso por tezontle y determinó que una proporción del 25% presentó un desempeño satisfactorio conforme a los criterios de evaluación establecidos. Asimismo, otro estudio evidenció que tanto el método de curado como las condiciones ambientales durante el fraguado y el endurecimiento influyen de manera significativa en el desarrollo de la resistencia a la compresión del material (Ramos et al., 2026). Conforme a los resultados obtenidos por González Hernández (2024) y Muñoz Vargas (2025), entre los distintos curados evaluados, el curado por membrana permitió alcanzar los valores de resistencia a la compresión más favorables. Por ello, el presente estudio adoptó este método de curado, debido a su eficacia para favorecer el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto y garantizar condiciones experimentales consistentes para la evaluación del desempeño del concreto modificado con tezontle.

1.2 Objetivo de esta investigación

El objetivo de este estudio es analizar el resultado de sustituir el 20% de la grava tradicional por tezontle en un concreto diseñado para una resistencia de 250 kg/cm². A través de ensayos a los 7, 14 y 28 días de curado de membrana, se

busca determinar la viabilidad técnica de este material alternativo para su potencial aplicación en elementos simples, con el propósito de alcanzar un equilibrio entre la reducción de peso y la resistencia mecánica requerida por la normativa vigente.

2. Materiales y métodos

En este estudio se desarrolló una mezcla de concreto que mantenga una resistencia de 250 kg/cm², empleando tezontle como agregado grueso, y se comparó con una mezcla tradicional. El proceso de diseño de mezcla se sustentó por medio del código dado por el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) (ACI PRC-211.5-14, 2023).

A continuación, el estudio detalla los materiales empleados en la mezcla de concreto. En la primera fase, se diseñaron y elaboraron dos mezclas de concreto, una con tezontle como agregado grueso y otra con grava tradicional. Cada mezcla se utilizó para fabricar 12 cilindros de concreto. El proceso experimental se desarrolló en el laboratorio de Ingeniería Civil del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, donde se realizaron los diseños de mezcla y pruebas de revenimiento. Ambas mezclas fueron sometidas únicamente al curado de membrana. Finalmente, se realizó un ensayo de resistencia a la compresión en días específicos (7, 14 y 28), registrando la resistencia máxima alcanzada y documentando el comportamiento de los cilindros de concreto bajo el único método de curado empleado. Los procesos mencionados se llevaron a cabo conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Mexicana NMX-C-406-ONNCCE-2019 (DOF, 2020). Esta normativa establece los procedimientos y requisitos específicos para la ejecución de las pruebas de resistencia a compresión de los especímenes de estudio.

2.1 Diseño de mezcla

Se diseñó la mezcla de concreto conforme al código ACI PRC-211.5-22 (2022) considerando tanto la mezcla original como una versión modificada en la que se sustituyeron los agregados gruesos por tezontle (20%). Tras concluir la limpieza y preparación del sitio para elaborar la mezcla, se procedió a pesar los materiales (Figura 1) según las cantidades previamente calculadas para la dosificación de un concreto simple (Tabla 1), diseñado con una resistencia a la compresión f'c de 250 kg/cm².

Esta resistencia objetivo se eligió por ser una de las más comúnmente utilizadas en la construcción (González Hernández, 2024), ya que, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias de 2017 (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2019), en su apartado sobre "Criterios y Acciones para el diseño y construcción de estructuras de concreto", se considera adecuada.



Figura 1. Pesaje de materiales con báscula digital marca Rhino modelo Bar-8RS y báscula digital modelo Noval - PLR 40.

Se diseñaron dos tipos de mezclas: una con 20% de tezontle como sustitución parcial del agregado grueso y otra tradicional con 100% de grava triturada. Para ambas, se consideraron los siguientes materiales de diseño: agua, cemento, arena, tezontle y grava triturada. Además, se consideró un factor de desperdicio del 10%, de acuerdo con lo estipulado en el código ACI PRC-211.1-22 (2022).

2.2 Elaboración de la mezcla

Tabla 1. Materiales y cantidades utilizados en el diseño de la mezcla.

Material	Cantidad	Descripción
Cemento	17.40 kg (mezcla con agregados gruesos tradicionales) 17.40 kg (mezcla con 20% de sustitución -tezontle-) Total: 34.80 kg (1 saco de cemento de 50 kg)	Cemento Cruz Azul CPC 30 R RS, de alta calidad. Su consistencia, resistencia y durabilidad cumplen con la norma NMXC-414-ONNCCE 2017 (DOF, 2018).
Agua	10 L (mezcla convencional) 12.60 L (mezcla con 20% de sustitución) Total: 22.60 litros	Agua potable obtenida del lugar donde se elaboraron las muestras. El incremento de agua en la mezcla modificada se debió a la alta porosidad y absorción del tezontle; por ello, el agregado se prehumedeció para reducir su demanda de agua durante el mezclado.
Arena	30.40 kg (mezcla convencional) 30.40 kg (mezcla con 20% de sustitución) Total: 60.80 kg	Arena caliza comprada en un banco de materiales en Huixmi, Hidalgo.
Grava	39.51 kg (mezcla convencional) 31.20 kg (mezcla con 20% de sustitución) Total: 70.71 kg	Grava comprada en el mismo banco de materiales.
Tezontle	8.31 kg	Tezontle utilizado en los cilindros con un 20% de sustitución del agregado grueso.

2.2.1 Diseño de mezcla de concreto simple tradicional

Para la elaboración del concreto tradicional, se utilizaron las cantidades típicas de una dosificación convencional, dado que no se modificaron los elementos de diseño. Los materiales se pesaron (Figura 1) con una báscula digital (marca Rhino modelo Bar-8RS). Luego, se vertieron la grava, la arena y el cemento sobre la superficie y, enseguida, se vertió el agua. Antes de mezclar el agua con los demás componentes, se desarrolló la mezcla con una pala para asegurar una homogeneización adecuada (Figura 2). Posteriormente, se fabricaron los cilindros, cuyos detalles se proporcionarán más adelante.



I) II) III)

Figura 2. Obtención de la mezcla tradicional: I) Vaciado de cemento, arena, grava y agua. II) Mezcla de materiales. III) Resultado final.

2.2.2 Diseño de mezcla de concreto simple con 20% de tezontle

Para el concreto con 20% de sustitución por tezontle, se pesaron todos los materiales. Se inició vaciando el cemento y la arena; luego se mezclaron, formando un montículo con un círculo en el centro. En este círculo se colocó la cantidad necesaria de tezontle previamente humedecido, que había estado sumergido en agua desde el día anterior. Finalmente, se incorporó el agua de diseño y se mezcló hasta obtener una consistencia homogénea (Figura 3).



I) II)

III) IV)

Figura 3. I) Tezontle sumergido en agua. II) Vaciado de cemento, arena y tezontle. III) Se mezcló homogéneamente. IV) Se obtuvo la mezcla de sustitución.

Aunque la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 (DOF, 2016) recomienda el uso de una revolvedora para favorecer la homogeneidad del concreto durante la elaboración de especímenes de laboratorio, en la presente investigación ambas mezclas fueron preparadas mediante un procedimiento manual estandarizado bajo condiciones controladas, permitiendo una comparación consistente de los resultados obtenidos. Esta preparación manual permitió inspeccionar visualmente que la mezcla con tezontle como sustituto del agregado se mezclara de manera uniforme.

2.2.3 Revenimiento

Se realizó la prueba de revenimiento conforme a la norma NMX-C-156-ONNCCE-2020 (DOF, 2021). Para cada tipo de mezcla, se llenó el cono de Abrams hasta 1/3 de su capacidad y se golpeó 25 veces con una varilla de punta de bala. Luego, se añadió más concreto hasta la mitad del cono y se golpeó nuevamente 25 veces. Finalmente, se llenó el cono hasta su capacidad máxima, aplicando otros 25 golpes, tal como lo indica la norma. Tras completar este procedimiento, se desmontó el cono y se colocó paralelo a la mezcla, midiendo el centro como referencia a la mitad de la varilla, obteniéndose un revenimiento para concreto tradicional de 9.5 y para concreto con sustitución de 20% de tezontle de 7.5 cm (Figura 4).



I) II)

Figura 4. Prueba de revenimiento de mezclas de concreto con: I) agregados tradicionales y II) agregados de tezontle.

2.2.4 Elaboración de cilindros de concreto

Una vez obtenidos el diseño y el revenimiento de cada mezcla, se procedió a elaborar los cilindros de concreto correspondientes. En primer lugar, se aplicó aceite a los moldes con un trapo para facilitar el desmolde. Se aseguraron los moldes apretándolos correctamente para evitar fugas. Con una cuchara, se comenzó a verter la mezcla en los cilindros de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro (Figura 5). Al mismo tiempo, se golpeó la mezcla alrededor con una varilla 25 veces para eliminar agua o aire, de acuerdo con lo estipulado en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 (DOF, 2015).



I) II) III)

Figura 5. Elaboración de especímenes de prueba: I) Aplicación de desmoldante. II) Llenado de cilindros con las mezclas. III) Cilindros finalizados.

2.2.5 Desmontaje y curado de cilindros

Finalmente, el desmontaje de los cilindros se realizó 24 horas después de la elaboración de las mezclas. En primer lugar, se desatornillaron los moldes de los cilindros. Una vez extraídos, los especímenes fueron limpiados superficialmente para retirar los residuos de la mezcla adherida y se envolvieron completamente con plástico microfilm, con el fin de aplicar un proceso de curado por membrana (Figura 6). Cada cilindro fue identificado con claves, asignando fechas específicas para determinar su resistencia a la compresión en laboratorio a los 7, 14 y 28 días de curado. Posteriormente, una vez concluido el proceso de curado, se realizaron los ensayos mecánicos correspondientes.



Figura 6. Cilindros curados con membrana de plástico microfilm.

2.2.6 Ensaye de cilindros

Durante los días 7, 14 y 28, se realizaron ensayos de compresión en dos cilindros gemelos para cada edad y cada tipo de mezcla: concreto tradicional y concreto con un 20% de sustitución del agregado grueso por tezontle. Sólo fue posible su elaboración por duplicado debido a la disponibilidad de cilindros y al número de especímenes preparados con la misma mezcla (tradicional y con tezontle). El objetivo de estos ensayos fue evaluar y comparar el desarrollo de la resistencia a la compresión de ambas mezclas a lo largo del tiempo. En el laboratorio de ingeniería civil se tomaron medidas del diámetro, la altura y el peso de cada cilindro a evaluar. Posteriormente, se colocaron los cabezales con placas de neopreno en las partes inferior y superior, centrando el cilindro en la prensa. Una vez que el cilindro estuvo debidamente centrado en la máquina de ensayos de compresión, se ingresaron los datos obtenidos (diámetro, altura y peso). Finalmente, el ensayo se inició automáticamente y debió esperar a que el espécimen fallara. Este procedimiento se llevó a cabo conforme a lo establecido en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 (DOF, 2015), que define los lineamientos para la correcta ejecución del ensayo, así como las condiciones de carga y el tratamiento de los resultados. Se recolectaron los datos de resistencia obtenidos por la máquina, así como muestras de cada cilindro ensayado, para el análisis posterior de los resultados (Figura 7).



I) II) III)

Figura 7. I) Cilindro medido con calibrador vernier marca Fixtec modelo FHVC0152 y pesado con báscula marca Ohaous modelo T51P serie Defender 5000, preparado para tronar. II) Tronado de cilindro con prensa de compresión PILOT PRO C-43P04. III) Cilindro tronado hasta su fallo.

3. Resultados

Se muestran los resultados obtenidos, especificando los días de fraguado y la resistencia a la compresión obtenida en cada cilindro evaluado a 7, 14 y 28 días con resistencia propuesta de 250 kg/cm^2, siendo esta la más usada en concreto para uso simple.

3.1 Ensaye de cilindros a los 7 días de fraguado

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los cilindros elaborados con un 20% de sustitución del agregado grueso por tezontle. Se observa que las resistencias obtenidas no alcanzan la resistencia establecida en la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México, 2019).

En esta etapa inicial, los especímenes con un 20% de tezontle alcanzaron una resistencia promedio de 109.71 kg/cm², lo que representa apenas el 43.88% de la resistencia de diseño esperada. Como se observa en la Tabla 2, el valor máximo registrado para estos cilindros fue de 110.75 kg/cm².

Tabla 2. Resultados del concreto con 20% de sustitución de tezontle a los 7 días de fraguado.

Parámetro	Cilindro I	Cilindro II	Promedio
Diámetro (cm)	15	15	-
Altura (cm)	30	30	-
Peso (kg)	11.54	11.05	-
Resistencia (kg/cm²)	108.66	110.75	109.705

Por su parte, la mezcla tradicional mostró un desempeño superior, con un promedio de 117.89 kg/cm² (47.16% del diseño), según los datos de la Tabla 3. Desde una perspectiva técnica, estos valores se sitúan considerablemente por debajo del rango normativo esperado de 165 a 175 kg/cm² para esta edad. Este déficit inicial puede atribuirse a las condiciones climáticas (temperaturas promedio de 20 °C) que pudieron ralentizar la hidratación del cemento.

Tabla 3. Resultados del concreto tradicional a los 7 días de fraguado.

Parámetro	Cilindro I	Cilindro II	Promedio
Diámetro (cm)	15	15	-
Altura (cm)	30	30	-
Peso (kg)	11.29	11.13	-
Resistencia (kg/cm²)	127.61	108.16	117.89

La Figura 8 ilustra la comparación de estos resultados con estudios previos, destacando que, aunque bajos, los valores obtenidos en esta investigación muestran una mejor aproximación a la normativa que los obtenidos en investigaciones que utilizaron porcentajes de sustitución más altos (Muñoz Vargas, 2025).

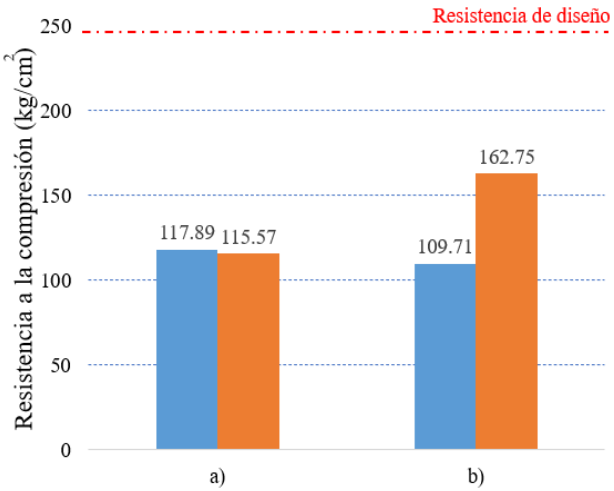


Figura 8. Comparativa entre resistencias a compresión derivadas de este trabajo (color azul) y el desarrollado por González Hernández (2024) (color naranja): a) grava tradicional y b) sustitución de grava volcánica (7 días de curado).

Aunque ambos estudios evaluaron concretos con incorporación de tezontle, las diferencias observadas deben analizarse considerando las variaciones en el porcentaje de sustitución del agregado grueso (20% y 25%, respectivamente), el diseño de la mezcla y las condiciones de curado. Bajo estas condiciones, el concreto evaluado en esta investigación se aproximó más a los valores establecidos en la normativa. No obstante, la comparación tiene un carácter descriptivo debido a las diferencias metodológicas y al número limitado de especímenes evaluados, por lo que los resultados constituyen una referencia para orientar futuras investigaciones sobre la optimización del diseño de mezclas con tezontle.

3.2 Ensaye de cilindros a los 14 días de fraguado

Al alcanzar la mitad del periodo estándar de curado (14 días), la mezcla con sustitución de tezontle incrementó su resistencia a un promedio de 132.08 kg/cm², mientras que la mezcla convencional alcanzó 149.22 kg/cm², tal como se detalla en las Tablas 4 y 5, respectivamente. Bajo condiciones ideales y conforme a la normativa técnica, el concreto debería alcanzar aproximadamente el 70% de su resistencia de diseño (175 kg/cm² aproximadamente) a los 14 días.

Tabla 4. Resultados del concreto con 20% de sustitución de tezontle a los 14 días de fraguado.

Parámetro	Cilindro I	Cilindro II	Promedio
Diámetro (cm)	15	15	-
Altura (cm)	30	30	-
Peso (kg)	10.98	11.03	-
Resistencia (kg/cm²)	125.77	138.38	132.08

Tabla 5. Resultados del concreto tradicional a los 14 días de fraguado

Parámetro	Cilindro I	Cilindro II	Promedio
Diámetro (cm)	15	15	-
Altura (cm)	30	30	-
Peso (kg)	11.31	11.30	-
Resistencia (kg/cm²)	152.66	145.78	149.22

El hecho de que ninguna de las mezclas alcanzara este umbral constituye un indicador clave. La brecha entre el concreto con tezontle y el tradicional se vuelve más evidente en esta etapa; la Figura 9 muestra que la incorporación del agregado volcánico reduce la capacidad de carga respecto al agregado tradicional debido a la porosidad intrínseca del material. Esto sugiere que la absorción de agua del tezontle modifica la relación agua-cemento efectiva en la zona de transición de la pasta, lo que limita el endurecimiento temprano.

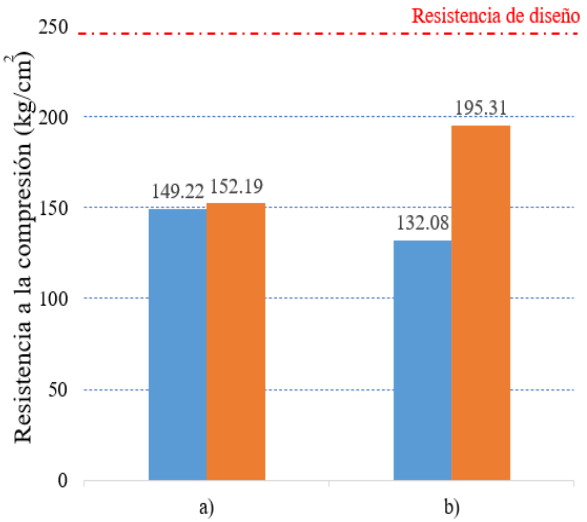


Figura 9. Comparativa entre resistencias a compresión derivadas de este trabajo (color azul) y el desarrollado por González Hernández (2024) (color naranja): a) grava tradicional y b) sustitución de grava volcánica (14 días de curado).

3.3 Ensaye de cilindros a los 28 días de fraguado

Al finalizar el ciclo de 28 días, el concreto con un 20% de tezontle alcanzó una resistencia promedio de 195.68 kg/cm², equivalente al 78.27% del objetivo de 250 kg/cm² (Tabla 6). En comparación, la mezcla tradicional alcanzó 218.24 kg/cm² (87.30% del diseño), como se indica en la Tabla 7. Es notable que, a pesar de la mejora progresiva, ninguno de los cilindros cumplió con la resistencia especificada para uso simple conforme a la normativa vigente.

Tabla 6. Resultados del concreto con 20% de sustitución de tezontle a los 28 días de fraguado

Parámetro	Cilindro I	Cilindro II	Promedio
Diámetro (cm)	15	15	-
Altura (cm)	30	30	-
Peso (kg)	11.07	11.02	-
Resistencia (kg/cm²)	191.90	199.45	195.68

Tabla 7. Resultados del concreto tradicional a los 28 días de fraguado

Parámetro	Cilindro I	Cilindro II	Promedio
Diámetro (cm)	15	15	-
Altura (cm)	30	30	-
Peso (kg)	11.26	11.27	-
Resistencia (kg/cm²)	220.35	216.13	218.24

No obstante, el análisis de la Figura 10 revela un dato importante para la investigación: el uso de una sustitución del 20% en este estudio resultó en un desempeño significativamente mejor que el reportado por González Hernández (2024), quien con un 25% de sustitución solo alcanzó el 59.77% de la resistencia de diseño. Esto confirma que una menor proporción de sustitución favorece la integridad mecánica del concreto modificado. El estudio concluye que, aunque la resistencia es insuficiente para aplicaciones simples de alta exigencia, la mezcla es viable para elementos no estructurales o aligerados, siempre que se optimicen factores como el prehumedecimiento del agregado y el uso de mezclado mecánico para mejorar la homogeneidad.

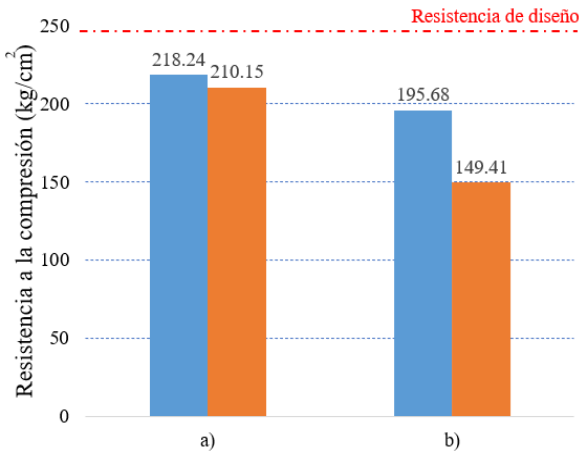


Figura 10. Comparativa entre resistencias a compresión derivadas de este trabajo (color azul) y el desarrollado por González Hernández (2024) (color naranja): a) grava tradicional y b) sustitución de grava volcánica (28 días de curado).

3.7 Discusión de resultados

Los hallazgos de este estudio confirman que la porosidad intrínseca del tezontle es el factor determinante en la reducción de la resistencia mecánica, ya que su estructura celular actúa como un concentrador de esfuerzos que debilita la microestructura del concreto (Miyanwi et al., 2026). De acuerdo con estos autores, este fenómeno se explica porque la estructura celular de la escoria volcánica (tezontle) actúa como un concentrador de esfuerzos. Un factor crítico observado fue la menor trabajabilidad de la mezcla con sustitución, la cual presentó un revenimiento de apenas 7.5 cm frente a los 9.5 cm de la mezcla convencional. Esta reducción en la fluidez, derivada de la alta capacidad de absorción del agregado volcánico que altera la relación agua-cemento efectiva, influyó directamente en una compactación deficiente de los especímenes. Al emplear un método de compactación manual y no contar con una mezcla lo suficientemente plástica, se favoreció la presencia de aire atrapado y una menor homogeneidad, lo que se tradujo en una capacidad de carga de 195.68 kg/cm², situándose por debajo del objetivo de 250 kg/cm². A pesar de esto, el uso de un 20% de sustitución demostró ser más eficaz que niveles superiores evaluados en estudios previos, preservando mejor la integridad del material (González Hernández, 2024; Muñoz Vargas, 2025).

Por otra parte, la dinámica de absorción del agregado volcánico desempeña un papel destacado en la estabilidad química de la mezcla. Debido a su naturaleza porosa, si el tezontle no alcanza una saturación óptima, tiende a sustraer agua de la mezcla, lo que altera la relación agua-cemento efectiva indispensable para una hidratación completa (Zambrano Navarrete et al., 2022). Estos autores destacan que el método de curado por membranas, aunque representa resultados similares a otros métodos como el de aspersión, limita el potencial del cementante debido a la escasez de agua externa de aporte (es decir, humedad continua).

Respecto a la eficacia del porcentaje de sustitución, los datos revelan una correlación directa entre la cantidad de material volcánico y la resistencia a la compresión final. Al contrastar los hallazgos en la figura 10, se observa que emplear un 20% de sustitución permitió alcanzar el 78.27% de la resistencia objetivo, un desempeño superior al reportado por González Hernández (2024), quien con un 25% de reemplazo solo obtuvo un 59.77%. Estos datos validan que una menor proporción de sustitución preserva mejor la integridad del concreto, lo cual se alinea con principios de ingeniería (Zhang y Gjvorv, 1991) que asocian el volumen de agregados ligeros con la reducción del módulo de elasticidad.

Por último, aunque el concreto con tezontle no cumple con los estándares para aplicaciones simples de alta demanda, su viabilidad y sostenibilidad lo posicionan como un material de gran valor para la construcción sostenible. El uso de recursos locales no solo puede optimizar los costos, sino también favorecer la reducción del impacto ambiental y de la huella de carbono asociados a la explotación de gravas convencionales (Ramos et al., 2026). Por lo tanto, este estudio concluye que este material es apto para aplicaciones no estructurales o para elementos aligerados, tales como banquetas, rellenos o muros de mampostería, y que cumple con las tendencias globales de

eficiencia energética y aprovechamiento de materiales regionales.

4. Conclusiones

En esta investigación se concluye que el empleo de tezontle como sustituto parcial del 20% de la grava convencional es una alternativa técnicamente viable y sostenible desde una perspectiva ambiental, aunque presenta limitaciones para su uso simple. Los principales resultados muestran un incremento progresivo de la resistencia a la compresión, alcanzando promedios de 109.71 kg/cm² a los 7 días, 132.08 kg/cm² a los 14 días y 195.68 kg/cm² a los 28 días. A pesar de esta evolución positiva, la mezcla solo alcanzó el 78.27% de la resistencia de diseño de 250 kg/cm², por lo que no se cumplió el objetivo de alcanzar la resistencia necesaria para aplicaciones simples bajo las condiciones evaluadas. No obstante, el estudio cumplió satisfactoriamente con el análisis de la influencia de la grava volcánica en la resistencia a la compresión del concreto simple, el cual es potencialmente apto para la elaboración de elementos no estructurales como banquetas, firmes, rellenos y muros de mampostería.

La resistencia a la compresión se vio condicionada por diversas limitaciones técnicas intrínsecas tanto del material como del proceso experimental. La alta porosidad y la absorción del tezontle afectaron la relación agua-cemento efectiva, lo que debilitó la adhesión en la zona de transición interfacial y limitó la hidratación del cemento. Además, el carácter exploratorio del estudio contó con un número limitado de especímenes, lo que limita la posibilidad de realizar análisis estadísticos inferenciales más profundos. Factores como el mezclado manual y la compactación no mecánica también pudieron incrementar la variabilidad y reducir la homogeneidad de la mezcla, lo que contribuyó a que no se alcanzara el estándar de 250 kg/cm². No obstante, se intentó replicar las prácticas comunes aplicadas en una obra, en la que el personal técnico, en la mayoría de las ocasiones, realiza manualmente la mezcla. Para optimizar el uso de este material en etapas futuras, se plantean recomendaciones orientadas a mejorar el diseño de la mezcla y su ejecución.

Es muy importante implementar un prehumedecimiento sistemático del tezontle, junto con pruebas rigurosas de absorción, para estabilizar la demanda de agua. Asimismo, se recomienda transitar hacia un mezclado mecánico y utilizar equipos vibratorios para la compactación, a fin de asegurar la eliminación del aire atrapado y una distribución uniforme de los agregados. Finalmente, se sugiere ampliar el programa experimental, evaluando diferentes porcentajes de sustitución, el uso de aditivos y un mayor número de muestras, a fin de fortalecer la validez y la reproducibilidad de los resultados sobre la elaboración de un concreto con agregado volcánico para uso simple.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT para corrección gramatical, mejora de redacción y traducción. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

American Concrete Institute. (2022). ACI PRC-211.1-22: Selección de proporciones para hormigón de densidad normal y alta densidad – Guía. DOI: https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211122&Language=English&Units=US_Units

American Concrete Institute. (2023). ACI PRC-211.5-14: Guide for submitatal of concrete proportions. DOI: https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211514&Language=English&Units=US_AND_METRIC

Diario Oficial de la Federación (2015). Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo. DOI: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387841&fecha=06/04/2015#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (2016). NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción-Concreto-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo. DOI: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5445530&fecha=22/07/2016#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (2018). Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo. DOI: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510053&fecha=04/01/2018#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (2020). NMX-C-406-ONNCCE-2019. Industria de la Construcción-Componentes Estructurales Prefabricados de Concreto para Sistemas de Losas-Especificaciones y Métodos de Ensayo. DOI: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5591805&fecha=17/04/2020#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (2021). Norma Mexicana NMX-C-156-ONNCCE-2020. Industria de la Construcción- Concreto-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco-Método de Ensayo. DOI: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5630812&fecha=24/09/2021#gsc.tab=0

González Hernández, J.A. (2024). Diseño y análisis de un concreto modificado con tezontle para uso estructural. DOI: http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/4842/ATD236.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Miyanwi, C., Ekengoue, C., & Mackongo, J., (2026) Assessing the compressive strength of concrete incorporating volcanic scoria as partial replacement for gravel. *Discov. Concr. Cem.* (2), 38 (2026). DOI: https://doi.org/10.1007/s44416-026-00076-2

Muñoz Vargas, H. (2025). Efectos del curado en la resistencia de un concreto con gravas de origen volcánico. DOI: http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/6616/ATD927.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2019). La explotación insostenible de la arena destruye ríos y mares. DOI: https://news.un.org/es/story/2019/05/1455611#:~:text=La%20demanda%20mundial%20de%20arena,informe%20de%20ONU%20Medio%20Ambiente.

Ortiz Calderón, M. (2019). El tezontle, la piedra de México. MOLEQLA, Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide, (33), 9-12. DOI: https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero33/33.pdf

Ramos, H.; Bastidas, A., Mosquera, H. & Quishpe, J., (2026). Mezclas de hormigón sustentable con puzolanas naturales: perspectiva global, escenarios sudamericanos y casos en Ecuador. Novasinergia. 9(1). 160-184. DOI: https://doi.org/10.37135/ns.01.17.09

Rodríguez Morales, L. (2011). La práctica constructiva en la ciudad de México. El caso del tezontle, siglos XVIII-XIX. Monumentos Históricos, (22), 155–178. DOI: https://www.docsity.com/es/docs/sistemas-constructivos-del-siglo-xix/11173223/

Rodríguez Morales, L. (2018). Las bóvedas de tezontle en la Ciudad de México: siglos XVII y XVIII: El caso del templo de San Lorenzo Mártir. Boletín De Monumentos Históricos, (42), 84–106.

Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México (2019). Normas Técnicas Complementarias 2017. DOI: https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf

Solís Carcaño, R. G., Moreno, E. I., Serrano Zebadua, C. (2013). Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 4(2), 15-25. DOI: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112013000100002&lng=es&tlng=es.

Vidaud E. (2013). De la historia del cemento. (s. f.). Construcción y Tecnología En Concreto. 4(3), 24-29.

Zambrano Navarrete, L., Alava Santos, R, Ruiz Párraga, W., Menéndez, E. (2022). Aplicación de métodos de curado y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón. Vol. 23, num. 1, pp. 35-47. DOI: https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.4

Zhang, M., & Gjorv, O. (1991). Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. ACI Materials Journal, 88(3), 240–247.