

Análisis del desempeño mecánico del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza volcánica como sustituto parcial del cemento y agregados de la cantera Megarok

Analysis of the Mechanical Performance of $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ Concrete with Volcanic Ash as a Partial Cement Replacement and Aggregates from the Megarok Quarry

Carlos José Zavala Vásquez¹

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Manabí, Ecuador, carlos.zavala@unesum.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.61236/xwn77163>

Recibido: 15 de julio de 2026 – Revisión aceptada: 24 de septiembre de 2026

Resumen

El empleo de puzolanas naturales como sustitutos parciales del cemento Portland constituye una alternativa para reducir su consumo y favorecer la producción de concretos con menor impacto ambiental. El objetivo de esta investigación fue analizar el desempeño mecánico de un concreto con resistencia especificada $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, elaborado con agregados de la cantera Megarok y ceniza volcánica del Cotacachi como sustituto parcial del cemento. Se desarrolló una investigación experimental de enfoque cuantitativo. Los materiales fueron caracterizados física y químicamente y las mezclas se dosificaron mediante el método ACI 211.1. Se evaluaron cuatro porcentajes de sustitución: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %, utilizando 32 probetas cilíndricas de $10 \times 20 \text{ cm}$ ensayadas a compresión a los 7, 14, 28 y 56 días. La ceniza presentó un contenido combinado de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de 82,56 %, 0,11 % de SO_3 y 1,39 % de pérdida por ignición, valores compatibles con los criterios químicos evaluados para una puzolana natural Clase N. A los 28 días, las mezclas M0, M10, M20 y M30 alcanzaron resistencias de 218,08; 214,19; 153,91 y 107,90 kg/cm^2 , respectivamente. La sustitución del 10 % mostró el desempeño más cercano al concreto patrón y superó la resistencia especificada, mientras que porcentajes superiores redujeron progresivamente la resistencia. Se concluye que, entre las proporciones estudiadas, el 10 % constituyó la alternativa técnicamente más favorable.

Palabras claves: concreto; ceniza volcánica; puzolana natural; resistencia a compresión; sustitución parcial del cemento.

Abstract

The use of natural pozzolans as partial replacements for Portland cement represents an alternative for reducing cement consumption and promoting concrete with a lower environmental impact. This study aimed to analyze the mechanical performance of concrete with a specified compressive strength of $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, produced with aggregates from the Megarok quarry and volcanic ash from Cotacachi as a partial cement replacement. A quantitative experimental study was conducted. The materials were physically and chemically characterized, and the concrete mixtures were proportioned using the ACI 211.1 method. Four cement replacement levels were evaluated: 0%, 10%, 20%, and 30%. A total of 32 cylindrical specimens measuring $10 \times 20 \text{ cm}$ were tested for compressive strength at 7, 14, 28, and 56 days. The volcanic ash showed a combined $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ content of 82.56%, an SO_3 content of 0.11%, and a loss on ignition of 1.39%, values consistent with the chemical criteria evaluated for a Class N natural pozzolan. At 28 days, mixtures M0, M10, M20, and M30 achieved compressive strengths of 218.08, 214.19, 153.91, and 107.90 kg/cm^2 , respectively. The 10% replacement mixture exhibited the closest performance to the control concrete and exceeded the specified compressive strength, whereas higher replacement levels progressively reduced strength. It is concluded that, among the proportions studied, 10% was the most technically favorable replacement level.

Keywords: concrete; volcanic ash; natural pozzolan; compressive strength; partial cement replacement.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto continúa siendo uno de los materiales de construcción de mayor utilización debido a su versatilidad, disponibilidad de materias primas y capacidad para alcanzar propiedades mecánicas compatibles con una amplia variedad de aplicaciones estructurales. Sin embargo, su producción depende en gran medida del cemento Portland, cuya fabricación implica un elevado consumo energético y una importante generación de emisiones de dióxido de carbono asociadas principalmente con la producción de clínker. Esta situación ha incrementado el interés por desarrollar materiales cementantes suplementarios capaces de sustituir parcialmente el cemento y contribuir a reducir el impacto ambiental del concreto sin comprometer sus prestaciones mecánicas [1].

Entre los materiales cementantes suplementarios, las puzolanas naturales de origen volcánico presentan particular interés debido a la presencia de compuestos silíceos y aluminosos capaces de participar en reacciones puzolánicas con los productos derivados de la hidratación del cemento. Como resultado de estas reacciones pueden formarse productos cementantes secundarios que modifican la microestructura y las propiedades del material endurecido.

La aptitud de una ceniza volcánica para su incorporación en concreto no depende exclusivamente de su origen, sino también de su composición química y mineralógica, finura, morfología de las partículas y grado de reactividad [2], [3]. La literatura especializada muestra, por tanto, que las cenizas volcánicas no deben considerarse materiales de comportamiento uniforme y que su caracterización constituye una etapa necesaria antes de establecer porcentajes de sustitución.

La proporción de ceniza incorporada también condiciona el comportamiento del concreto. Estudios recientes muestran que niveles moderados de sustitución pueden conservar o incluso favorecer determinadas propiedades mecánicas cuando existe suficiente reactividad puzolánica, mientras que porcentajes elevados tienden a reducir la resistencia inicial debido, entre otros factores, a la disminución del contenido efectivo de clínker y al desarrollo más lento de las reacciones secundarias.

Al evaluar sustituciones de 10 %, 20 % y 30 % con polvo de origen volcánico, un estudio reciente encontró un mejor comportamiento para el nivel del 10 %, mientras que los porcentajes superiores disminuyeron las propiedades mecánicas [4]. Asimismo, se ha identificado una reducción de la resistencia a compresión al emplear ceniza volcánica en niveles elevados, aunque con beneficios en determinados indicadores de durabilidad [5]. Estas diferencias evidencian que la valoración de una puzolana debe realizarse considerando conjuntamente el porcentaje de sustitución, las características del material y la edad del concreto.

La variabilidad asociada con la fuente volcánica ha sido confirmada por investigaciones recientes. Una revisión amplia concluyó que las propiedades mecánicas dependen de manera importante de las características físico-químicas y de la cantidad de material incorporado [3]. De igual forma, el estudio de tobas volcánicas naturales en proporciones comprendidas entre 10 % y 50 % mostró que el nivel de sustitución modifica la evolución resistente y la microestructura del concreto [6].

También se ha señalado que la ceniza volcánica puede presentar actividad puzolánica y utilizarse como material cementante suplementario, aunque su incorporación puede alterar la consistencia, los tiempos de fraguado y la trabajabilidad [7]. En

conjunto, estos resultados confirman que no resulta técnicamente apropiado transferir directamente un porcentaje óptimo determinado para una fuente volcánica hacia otra sin una evaluación experimental específica.

En Ecuador, la disponibilidad de materiales de origen volcánico ha favorecido investigaciones orientadas a estudiar su aplicación en materiales cementicios. Se han evaluado sustituciones de 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en concretos con distintas resistencias de diseño, con variaciones del comportamiento mecánico relacionadas con el porcentaje incorporado [8]. Asimismo, se han analizado concretos de 21 MPa con sustituciones de 10 % y 20 %, considerando propiedades de compresión, flexión, módulo de elasticidad y permeabilidad [9].

Un estudio desarrollado en Ecuador con elevada incorporación de ceniza volcánica mostró que, aunque puede conservarse una resistencia a compresión compatible con determinadas aplicaciones estructurales, otras propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad, pueden experimentar reducciones relevantes [10]. Estos antecedentes confirman el potencial de los recursos volcánicos disponibles en el país, pero también muestran que su comportamiento está condicionado por el origen del material, el porcentaje empleado, la composición de la mezcla y las condiciones de curado.

Pese a estos avances, la evidencia disponible para Ecuador se concentra principalmente en cenizas procedentes de volcanes como Tungurahua, Cotopaxi, Pululahua, Chalupas y Guagua Pichincha, así como en materiales volcánicos empleados en la región central del país. En la revisión bibliográfica efectuada para esta investigación no se identificaron estudios que analizaran específicamente el comportamiento de ceniza procedente del volcán Cotacachi combinada con agregados de la cantera Megarok en concretos con resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Esta ausencia de información resulta relevante, debido a que las propiedades de los agregados y de la propia ceniza pueden modificar la demanda de agua, la trabajabilidad, la interacción pasta-agregado y el desarrollo de la resistencia, por lo que los resultados obtenidos con otros materiales no pueden extrapolarse directamente a esta combinación.

En correspondencia con esta brecha, el objetivo de la presente investigación fue analizar el desempeño mecánico de un concreto con resistencia especificada $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, elaborado con agregados de la cantera Megarok y ceniza volcánica procedente del volcán Cotacachi como sustituto parcial del cemento Portland. Para ello se evaluaron sustituciones de 0 %, 10 %, 20 % y 30 % en masa del cemento y se determinó la resistencia a compresión a los 7, 14, 28 y 56 días, con la finalidad de establecer la influencia del porcentaje de ceniza sobre el desarrollo resistente e identificar, entre las proporciones estudiadas, aquella que mantuviera un desempeño compatible con la resistencia especificada.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para el desarrollo experimental se empleó cemento hidráulico Portland tipo GU (Holcim Fuerte), agregado fino comercializado como Arena Megamezcla y agregado grueso Piedra N.º 67, ambos procedentes de la cantera Megarok. El agregado grueso presentó un tamaño máximo nominal de 25 mm (1"). Como material cementante suplementario se utilizó ceniza volcánica procedente del volcán Cotacachi, acondicionada previamente mediante secado, limpieza

manual y tamizado a través del tamiz N.º 200 (0,075 mm). Para el amasado se utilizó agua potable de la red de abastecimiento, tomando como referencia los requisitos para agua de consumo humano establecidos en NTE INEN 1108:2020 [11].

Los agregados fueron caracterizados mediante análisis granulométrico [12], densidad relativa y absorción del agregado fino [13] y grueso [14], y masa unitaria [15]. La Arena Megamezcla presentó un módulo de finura de 1,69, humedad natural de 13,08 %, absorción de 6,10 % y gravedad específica seca de 2,533. La Piedra N.º 67 registró un módulo de finura de 6,63, humedad natural de 4,48 %, absorción de 4,79 % y gravedad específica seca de 2,420. Estos valores se emplearon para realizar las correcciones de humedad y absorción durante la dosificación.

La ceniza volcánica fue caracterizada mediante propiedades físicas y composición química con el propósito de determinar su correspondencia con los criterios aplicables a puzolanas naturales establecidos en ASTM C618 [16]. La evaluación se concentró en las propiedades efectivamente determinadas experimentalmente, por lo que el cumplimiento normativo se interpretó únicamente respecto de los requisitos evaluados y no como una certificación integral del material como puzolana Clase N.

2.2 Diseño experimental

La investigación presentó un enfoque cuantitativo, alcance explicativo y diseño experimental, debido a que se modificó deliberadamente el porcentaje de sustitución del cemento Portland por ceniza volcánica para determinar su efecto sobre el comportamiento del concreto. La variable independiente fue el porcentaje de sustitución en masa del cemento, establecido en cuatro niveles: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %. Como variables de respuesta se consideraron principalmente la resistencia a compresión y, de manera complementaria, la trabajabilidad del concreto fresco.

Se establecieron cuatro tratamientos: M0, correspondiente a la mezcla patrón sin ceniza volcánica; M10, con 10 % de sustitución; M20, con 20 %; y M30, con 30 %. Se elaboraron 32 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Cada tratamiento estuvo constituido por ocho especímenes, distribuidos en cuatro edades de ensayo: 7, 14, 28 y 56 días, con dos probetas para cada combinación entre tratamiento y edad.

Las unidades experimentales fueron fabricadas bajo condiciones controladas de laboratorio. Se mantuvieron constantes la procedencia y cantidad de los agregados, procedimiento de mezclado, dimensiones de los especímenes, condiciones de curado y procedimiento de ensayo, de modo que la principal modificación entre tratamientos correspondiera al porcentaje de sustitución del cemento por ceniza volcánica.

2.3 Diseño y dosificación de las mezclas

Las mezclas se proporcionaron mediante el procedimiento establecido en ACI 211.1 [17] para concreto de densidad normal sin aire incorporado, considerando una resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, equivalente aproximadamente a 21 MPa. Se utilizó una mezcla patrón M0 y tres mezclas modificadas, M10, M20 y M30, correspondientes a sustituciones de 10 %, 20 % y 30 % del cemento Portland, respectivamente.

La sustitución se realizó en masa, manteniendo constante el contenido total de material cementante en las cuatro formulaciones. Las cantidades de agua y agregados fueron determinadas a partir del diseño inicial y posteriormente corregidas de acuerdo con los valores de humedad y absorción obtenidos durante la

caracterización de los agregados. Esta condición permitió comparar el efecto del porcentaje de ceniza volcánica sin modificar intencionalmente los demás componentes fundamentales de la mezcla.

2.4 Elaboración, trabajabilidad y curado de las probetas

Los materiales fueron pesados de acuerdo con las cantidades establecidas para cada dosificación. Durante el mezclado se incorporaron los agregados, el cemento Portland y la ceniza volcánica correspondiente a cada tratamiento, seguidos del agua de amasado, hasta obtener una mezcla visualmente homogénea.

La trabajabilidad del concreto fresco se determinó mediante el ensayo de asentamiento con cono de Abrams, de acuerdo con ASTM C143/C143M [18]. Este ensayo permitió comparar la variación de la consistencia del concreto a medida que aumentó el porcentaje de sustitución del cemento por ceniza volcánica.

Posteriormente, el concreto fue colocado y consolidado en moldes cilíndricos de $100 \times 200 \text{ mm}$. Después del desmolde, los especímenes fueron sometidos a condiciones equivalentes de curado hasta alcanzar las edades establecidas de 7, 14, 28 y 56 días. La preparación y el curado de especímenes de concreto elaborados en laboratorio se realizaron considerando los procedimientos aplicables de ASTM C192/C192M [19].

2.5 Ensayo de resistencia a compresión

La resistencia a compresión se determinó a los 7, 14, 28 y 56 días mediante una máquina hidráulica con sistema digital DIGITEC. Los especímenes cilíndricos fueron ensayados conforme al procedimiento establecido en ASTM C39/C39M [20]. Para cada probeta se registró la carga máxima alcanzada durante el ensayo y se determinó la resistencia correspondiente.

Los resultados obtenidos permitieron analizar el desarrollo resistente de cada tratamiento con el tiempo y comparar las mezclas con ceniza volcánica respecto de la mezcla patrón y de la resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

2.6 Procesamiento y análisis de los datos

Los resultados fueron procesados mediante estadística descriptiva. Para cada combinación de porcentaje de sustitución y edad de curado se calculó la resistencia media obtenida a partir de los dos especímenes ensayados. Posteriormente se determinó la variación porcentual de M10, M20 y M30 respecto de la mezcla patrón M0 y el porcentaje de cumplimiento con relación a la resistencia especificada.

El análisis se orientó a identificar tendencias en el desarrollo de la resistencia con la edad y a comparar el desempeño relativo de las cuatro dosificaciones. Debido a que se dispuso de dos especímenes por tratamiento y edad, los resultados se interpretaron de manera descriptiva y no se realizaron inferencias estadísticas destinadas a generalizar las diferencias observadas. En consecuencia, la proporción técnicamente viable se estableció exclusivamente entre los porcentajes evaluados y bajo las condiciones experimentales de materiales, dosificación, elaboración y curado empleadas en este estudio.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Caracterización física de los agregados

La caracterización de los agregados provenientes de la cantera Megarok permitió determinar las propiedades físicas empleadas en

el diseño de las mezclas. La Arena Megamezcla presentó un módulo de finura de 1,69, humedad natural de 13,08 %, absorción de 6,10 % y peso específico seco de 2,533. Por su parte, la Piedra N.º 67 registró un módulo de finura de 6,63, humedad natural de 4,48 %, absorción de 4,79 % y peso específico seco de 2,420. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados.

Propiedad	Arena Megamezcla	Piedra N.º 67
Módulo de finura	1,69	6,63
Humedad natural (%)	13,08	4,48
Absorción (%)	6,10	4,79
Peso específico seco	2,533	2,420
Masa unitaria suelta (kg/m³)	1403,19	1397,50
Masa unitaria compactada (kg/m³)	1598,63	1493,47
Tamaño máximo nominal	9,52 mm (3/8")	25 mm (1")

Nota. Resultados de la caracterización física de los agregados empleados en las mezclas de concreto.

3.2 Caracterización de la ceniza volcánica

La caracterización de la ceniza volcánica permitió determinar sus principales propiedades físicas y químicas antes de su incorporación como sustituto parcial del cemento Portland. Para ello se evaluaron parámetros relacionados con la humedad, finura, gravedad específica, densidad, masa unitaria y composición química. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de la ceniza volcánica.

Propiedad	Resultado
Humedad natural (%)	0,60
Pasante tamiz N.º 200 (%)	70,29
Gravedad específica	2,69
Densidad real (kg/m³)	2680
Masa unitaria suelta (kg/m³)	1130
Masa unitaria compactada (kg/m³)	1620
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	82,56
SO ₃ (%)	0,11
Pérdida por ignición (%)	1,39

Nota: Resultados de la caracterización física y química de la ceniza volcánica del Cotacachi.

La ceniza volcánica del Cotacachi presentó una humedad natural de 0,60 %, un porcentaje pasante por el tamiz N.º 200 de 70,29 % y una gravedad específica de 2,69. En cuanto a su composición química, la suma de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ alcanzó 82,56 %, mientras que el contenido de SO₃ fue de 0,11 % y la pérdida por ignición de 1,39 %. En conjunto, estos resultados evidencian características químicas favorables para su incorporación como material cementante suplementario; no obstante, su correspondencia con ASTM C618 debe limitarse a los parámetros efectivamente evaluados.

3.3 Dosificación de las mezclas

Las cuatro mezclas mantuvieron un contenido total de material cementante de 434,8 kg/m³. El agua efectiva de diseño fue de 217,4 L/m³ y, tras la corrección por humedad y absorción de los agregados, el agua añadida fue de 173,8 L/m³. Las dosificaciones se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosificación de las mezclas de concreto por metro cúbico.

Mezcla	Agua (L/m³)	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Piedra (kg/m³)
M0	173,8	434,8	0,0	755,4	1025,1
M10	173,8	391,3	43,5	755,4	1025,1
M20	173,8	347,8	87,0	755,4	1025,1
M30	173,8	304,4	130,4	755,4	1025,1

Nota. M0, M10, M20 y M30 corresponden a sustituciones de 0 %, 10 %, 20 % y 30 % del cemento Portland por ceniza volcánica, respectivamente.

3.4 Trabajabilidad de las mezclas

La trabajabilidad de las mezclas de concreto se evaluó mediante el ensayo de asentamiento, con el propósito de determinar el efecto de la sustitución parcial del cemento por ceniza volcánica sobre la consistencia del concreto fresco. Se analizaron las cuatro dosificaciones correspondientes a M0, M10, M20 y M30. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Asentamiento de las mezclas de concreto.

Mezcla	Sustitución (%)	Asentamiento (cm)	Observación
M0	0	8,0	Trabajable, sin segregación
M10	10	7,5	Ligeramente menor, aún trabajable
M20	20	6,5	Reducción notable, pero aceptable
M30	30	5,0	Baja trabajabilidad, mayor vibrado

Nota. Resultados obtenidos mediante el ensayo de asentamiento con cono de Abrams conforme a ASTM C143/C143M [18].

Los resultados evidenciaron una disminución progresiva del asentamiento conforme aumentó el porcentaje de ceniza volcánica. La mezcla patrón M0 registró 8,0 cm, mientras que M10, M20 y M30 alcanzaron 7,5; 6,5 y 5,0 cm, respectivamente. La mayor reducción se produjo en M30, con una diferencia de 3,0 cm respecto de M0. Esta tendencia muestra que el incremento de la sustitución estuvo acompañado por una reducción gradual de la trabajabilidad bajo las condiciones experimentales evaluadas.

3.5 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se evaluó a los 7, 14, 28 y 56 días con el propósito de analizar la evolución del desempeño mecánico de las mezclas en función del porcentaje de sustitución del cemento por ceniza volcánica. La comparación incluyó la mezcla patrón M0 y las mezclas M10, M20 y M30, correspondientes a sustituciones de 10 %, 20 % y 30 %, respectivamente. Los valores promedio obtenidos y su variación respecto de la mezcla patrón se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resistencia promedio a compresión según porcentaje de sustitución y edad.

Mezcla	7 días (kg/cm ²)	14 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)	56 días (kg/cm ²)	Var. 28d vs M0
M0	135,51	180,13	218,08	243,08	—
M10	128,19	174,66	214,19	238,97	-1,78 %
M20	86,21	125,57	153,91	192,18	-29,42 %
M30	68,85	91,66	107,90	141,10	-50,52 %

Nota. Valores promedio de resistencia a compresión. Variación porcentual calculada respecto a la mezcla patrón M0.

Los resultados mostraron un incremento de la resistencia a compresión con la edad de curado en las cuatro mezclas. A los 28 días, M0 alcanzó 218,08 kg/cm² y M10 registró 214,19 kg/cm², ambos valores superiores a la resistencia especificada de $f'_c = 210$ kg/cm². En contraste, M20 y M30 alcanzaron 153,91 y 107,90 kg/cm², respectivamente. A los 56 días, M0 y M10 incrementaron sus resistencias hasta 243,08 y 238,97 kg/cm², mientras que M20 alcanzó 192,18 kg/cm² y M30 registró 141,10 kg/cm². En comparación con M0, la mezcla M10 presentó las menores variaciones, con reducciones de 1,78 % a los 28 días y 1,69 % a los 56 días, mientras que las sustituciones de 20 % y 30 % produjeron disminuciones más pronunciadas.

3.6 Cumplimiento de la resistencia especificada

Con el propósito de verificar el cumplimiento de la resistencia especificada de $f'_c = 210$ kg/cm², se compararon los valores obtenidos por cada mezcla y edad de curado con la resistencia de diseño. Esta relación permitió determinar el porcentaje de cumplimiento alcanzado por M0, M10, M20 y M30 y valorar el efecto de la sustitución parcial del cemento por ceniza volcánica sobre el desempeño resistente. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Cumplimiento de la resistencia especificada $f'_c = 210$ kg/cm².

Mezcla	7 días (%)	14 días (%)	28 días (%)	56 días (%)
M0	64,53	85,78	103,85	115,75
M10	61,04	83,17	101,99	113,80
M20	41,05	59,80	73,29	91,51
M30	32,79	43,65	51,38	67,19

Nota. El porcentaje corresponde a la relación entre la resistencia promedio obtenida y la resistencia especificada $f'_c = 210$ kg/cm².

A los 28 días, la mezcla patrón M0 alcanzó el 103,85 % de la resistencia especificada, mientras que M10 registró el 101,99 %, por lo que ambas superaron el valor de diseño. A los 56 días, estos porcentajes aumentaron hasta 115,75 % y 113,80 %, respectivamente. En contraste, M20 alcanzó a esa edad el 91,51 % de f'_c y M30 únicamente el 67,19 %. Por tanto, bajo las condiciones experimentales evaluadas, M0 y M10 cumplieron la resistencia especificada desde los 28 días, mientras que las mezclas con sustituciones de 20 % y 30 % no alcanzaron los 210 kg/cm² incluso a los 56 días.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidenciaron una influencia clara del porcentaje de sustitución del cemento Portland por ceniza volcánica del Cotacachi sobre el desarrollo de la resistencia a compresión. La

mezcla M10 presentó el comportamiento más próximo al concreto patrón, alcanzando 214,19 kg/cm² a los 28 días frente a 218,08 kg/cm² de M0, lo que representa una reducción de apenas 1,78 %. A los 56 días, la diferencia disminuyó ligeramente hasta 1,69 %, con resistencias de 238,97 y 243,08 kg/cm² para M10 y M0, respectivamente. Estos resultados indican que, dentro de las condiciones experimentales evaluadas, una sustitución del 10 % permitió reducir parcialmente el contenido de cemento sin comprometer el cumplimiento de la resistencia especificada.

El comportamiento observado coincide con la tendencia general descrita para puzolanas naturales y materiales volcánicos utilizados como sustitutos parciales del cemento. Las revisiones disponibles señalan que las propiedades mecánicas dependen tanto de las características físico-químicas de la puzolana como de la cantidad incorporada y que incrementos excesivos en el porcentaje de sustitución suelen provocar reducciones de resistencia [3]. Asimismo, se ha informado que niveles de reemplazo aproximadamente entre 5 % y 20 % presentan con mayor frecuencia respuestas mecánicas favorables, aunque el porcentaje más conveniente depende de la naturaleza y reactividad del material [21].

La respuesta de M10 también resulta coherente con investigaciones que han evaluado porcentajes similares de sustitución. En mezclas con 10 %, 20 % y 30 % de polvo de piedra pómez volcánica se observó una disminución progresiva de determinadas propiedades resistentes conforme aumentó el contenido de material volcánico, mientras que el nivel del 10 % mostró el comportamiento más favorable entre las mezclas modificadas [4]. Esta coincidencia respalda que sustituciones moderadas pueden aprovechar el potencial puzolánico sin reducir excesivamente la fracción de clínker disponible para el desarrollo inicial de resistencia.

En contraste, las mezclas M20 y M30 presentaron reducciones considerables. A los 28 días alcanzaron 153,91 y 107,90 kg/cm², respectivamente, mientras que a los 56 días registraron 192,18 y 141,10 kg/cm². Frente a M0, estas disminuciones representaron 29,42 % y 50,52 % a los 28 días, y 20,94 % y 41,95 % a los 56 días. Aunque ambas mezclas incrementaron su resistencia con el tiempo, ninguna alcanzó la resistencia especificada de 210 kg/cm². Este comportamiento puede asociarse al efecto de dilución producido por la disminución del contenido de cemento, combinado con una reacción puzolánica que no compensó completamente la menor disponibilidad de productos de hidratación derivados del clínker.

La mayor recuperación relativa de M20 entre los 28 y 56 días sugiere, sin embargo, que parte de la contribución de la ceniza puede manifestarse a edades posteriores. Este comportamiento resulta compatible con el mecanismo de reacción de las puzolanas naturales, cuya contribución resistente suele desarrollarse de manera más lenta que la hidratación inicial del cemento Portland. Por esta razón, la evaluación exclusiva a edades tempranas puede subestimar parcialmente el aporte de estos materiales. No obstante, en el presente estudio, incluso a los 56 días, las sustituciones de 20 % y 30 % permanecieron por debajo de la resistencia especificada, lo que limita su viabilidad para la dosificación analizada.

Desde el punto de vista químico, la ceniza utilizada presentó una suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de 82,56 %, valor superior al umbral químico considerado por ASTM C618 para determinadas puzolanas naturales [16]. Asimismo, el contenido de SO_3 fue de 0,11 % y la pérdida por ignición de 1,39 %. Estos resultados evidencian una composición química favorable para su posible utilización como material puzolánico. Sin embargo, deben interpretarse únicamente

respecto de los parámetros efectivamente determinados, ya que la clasificación integral conforme a ASTM C618 requiere otros requisitos físicos y de desempeño no incluidos en el programa experimental.

La composición química favorable no se tradujo de manera automática en una mejora de la resistencia para todos los niveles de reemplazo. El contenido de óxidos potencialmente reactivos constituye una condición importante, pero no suficiente para predecir el desempeño del material; la actividad puzolánica también depende de la fase mineralógica, proporción amorfa, finura, superficie específica y condiciones de curado [3].

La trabajabilidad mostró igualmente una respuesta dependiente del porcentaje de sustitución. El asentamiento disminuyó de 8,0 cm en M0 a 7,5 cm en M10, 6,5 cm en M20 y 5,0 cm en M30. La reducción progresiva sugiere una mayor demanda de agua efectiva o una modificación de la reología de la mezcla conforme aumentó la cantidad de ceniza volcánica. Este comportamiento puede relacionarse con la finura, textura superficial y capacidad de absorción de las partículas incorporadas; además, se ha documentado que el efecto de las cenizas volcánicas sobre la trabajabilidad depende de sus características específicas [7].

Al comparar conjuntamente resistencia y trabajabilidad, M10 mostró el comportamiento más equilibrado entre las proporciones estudiadas. A los 28 días alcanzó el 101,99 % de la resistencia especificada y a los 56 días el 113,80 %, mientras que su asentamiento se redujo únicamente 0,5 cm respecto de la mezcla patrón. Por el contrario, M20 y M30 presentaron simultáneamente mayores pérdidas de resistencia y disminuciones más pronunciadas de trabajabilidad. Estos resultados indican que el aumento del contenido de ceniza no genera un beneficio proporcional y que existe un nivel de sustitución a partir del cual el efecto de dilución predomina sobre la contribución puzolánica potencial.

Debe considerarse, además, que los resultados corresponden a una ceniza de origen específico, agregados provenientes de la cantera Megarok y una dosificación particular de concreto con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. En consecuencia, el 10 % no debe interpretarse como un porcentaje óptimo universal para el empleo de ceniza volcánica, sino como la proporción técnicamente más favorable entre los niveles estudiados bajo las condiciones experimentales de esta investigación. Estudios posteriores deberían ampliar el número de especímenes, incorporar niveles intermedios de sustitución, evaluar propiedades microestructurales y determinar índices específicos de actividad puzolánica para establecer con mayor precisión el intervalo de reemplazo más conveniente.

5. CONCLUSIONES

1. La caracterización de los materiales permitió establecer las condiciones necesarias para el diseño del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Los agregados de la cantera Megarok presentaron propiedades físicas compatibles con la dosificación empleada, mientras que la ceniza volcánica del Cotacachi mostró características físicas y químicas favorables para su incorporación como material cementante suplementario.
2. La ceniza volcánica presentó un contenido combinado de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de 82,56 %, además de 0,11 % de SO_3 y 1,39 % de pérdida por ignición. Estos valores cumplieron los criterios químicos evaluados para una puzolana natural Clase N según ASTM C618; sin embargo, esta valoración se limita a los parámetros

analizados experimentalmente y no constituye una certificación integral del material conforme a todos los requisitos de la norma.

3. Entre los porcentajes estudiados, la sustitución del 10 % presentó el mejor desempeño mecánico. La mezcla M10 alcanzó $214,19 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días y $238,97 \text{ kg/cm}^2$ a los 56 días, superando la resistencia especificada y mostrando reducciones de apenas 1,78 % y 1,69 %, respectivamente, frente a la mezcla patrón. En contraste, las sustituciones de 20 % y 30 % produjeron disminuciones progresivas de la resistencia y no alcanzaron $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ incluso a los 56 días.

4. Bajo las condiciones experimentales y con los materiales utilizados, el 10 % de sustitución del cemento Portland por ceniza volcánica del Cotacachi se identificó como la proporción técnicamente más favorable entre las evaluadas, al permitir reducir parcialmente el contenido de cemento sin comprometer la resistencia especificada. No obstante, el aumento del contenido de ceniza disminuyó progresivamente la trabajabilidad, por lo que su incorporación debe evaluarse considerando conjuntamente el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low- CO_2 cement-based materials industry," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2–26, 2018, doi: [10.1016/j.cemconres.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015).
- [2] A. S. Alqarni, "A comprehensive review on properties of sustainable concrete using volcanic pumice powder ash as a supplementary cementitious material," *Construction and Building Materials*, vol. 323, Art. no. 126533, 2022, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2022.126533](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126533).
- [3] H. M. Hamada, F. Abed, S. Beddu, A. M. Humada, and A. Majdi, "Effect of volcanic ash and natural pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, Art. no. e02425, 2023, doi: [10.1016/j.cscm.2023.e02425](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02425).
- [4] A. M. Zeyad, M. Shubaili, and A. Abutaleb, "Using volcanic pumice dust to produce high-strength self-curing concrete in hot weather regions," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Art. no. e01927, 2023, doi: [10.1016/j.cscm.2023.e01927](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01927).
- [5] J.-C. Liu, M. U. Hossain, D. Xuan, H. A. Ali, S. T. Ng, and H. Ye, "Mechanical and durability performance of sustainable concretes containing conventional and emerging supplementary cementitious materials," *Developments in the Built Environment*, vol. 15, Art. no. 100197, 2023, doi: [10.1016/j.dibe.2023.100197](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100197).
- [6] A. Abutaba, M. O. Mohsen, M. O. Aburumman, A. Senouci, R. Taha, W. Maherzi, and D. Qtiashat, "Eco-sustainable cement: Natural volcanic tuffs' impact on concrete strength and durability," *Buildings*, vol. 14, no. 9, Art. no. 2902, 2024, doi: [10.3390/buildings14092902](https://doi.org/10.3390/buildings14092902).
- [7] D. Calderoni, D. Gastaldi, V. Merlo, L. Pellino, F. Canonico, and L. Contrafatto, "Etna volcanic ash as new sustainable supplementary cementitious material," *Journal of Building Engineering*, vol. 95, Art. no. 110264, 2024, doi: [10.1016/j.jobbe.2024.110264](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110264).
- [8] E. P. Castro Solano, "Estudio de la sustitución parcial de cemento de alta resistencia inicial por puzolana de ceniza volcánica en el diseño de hormigón," Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [9] A. S. Huertas Holguín and E. S. Miniguano Albuja, "Estudio comparativo de los efectos sobre la resistencia a la flexión del hormigón armado con ceniza volcánica," Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, 2022.
- [10] C. Pinto-Almeida, A. Abril-Camino, and D. Abril-Camino, "Mechanical performance of volcanic ash concrete showing modulus reduction with strength retention," *Civil Engineering Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 4422–4435, 2025, doi: [10.28991/CEJ-2025-011-10-024](https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-10-024).

- [11] Servicio Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 1108:2020, Agua para consumo humano. Requisitos. INEN, 2020.
- [12] ASTM International, ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2019, doi: [10.1520/C0136_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19).
- [13] ASTM International, ASTM C128-22, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, 2022, doi: [10.1520/C0128-22](https://doi.org/10.1520/C0128-22).
- [14] ASTM International, ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, 2015, doi: [10.1520/C0127-15](https://doi.org/10.1520/C0127-15).
- [15] ASTM International, ASTM C29/C29M-23, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, 2023, doi: [10.1520/C0029_C0029M-23](https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-23).
- [16] ASTM International, ASTM C618-23, Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2023, doi: [10.1520/C0618-23](https://doi.org/10.1520/C0618-23).
- [17] American Concrete Institute, ACI 211.1-91 (Reapproved 2009): Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute, 2009.
- [18] ASTM International, ASTM C143/C143M-20, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, 2020, doi: [10.1520/C0143_C0143M-20](https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20).
- [19] ASTM International, ASTM C192/C192M-19, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, 2019, doi: [10.1520/C0192_C0192M-19](https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-19).
- [20] ASTM International, ASTM C39/C39M-23, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2023, doi: [10.1520/C0039_C0039M-23](https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-23).
- [21] T. A. Fode, Y. A. C. Jande, and T. Kivevele, "Effect of natural pozzolana on physical and mechanical properties of concrete," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, Art. no. 3356641, 2024, doi: [10.1155/2024/3356641](https://doi.org/10.1155/2024/3356641).