

## Evaluación del Potencial de Uso de la Roca Volcánica Calcinada: Un Enfoque Experimental para la Optimización de la Resistencia y el Diseño de la Proporción de la Mezcla

**P. Cuello<sup>1</sup>, Siva Avudaiappan<sup>2</sup>, Cristian Canales<sup>3</sup>, Luis Felipe Montoya<sup>1</sup>, María Gutierrez-Senepa<sup>4</sup>,  
Ramon Arrue<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Concepción, Chile. Email: [pcuello2017@udec.cl](mailto:pcuello2017@udec.cl)

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile. Email: [s.avudaiappan@utem.cl](mailto:s.avudaiappan@utem.cl)

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: [cristcanales@udec.cl](mailto:cristcanales@udec.cl)

<sup>4</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile. Email: [mariavgutierrez@udec.cl](mailto:mariavgutierrez@udec.cl)

<sup>5</sup>Departamento de Ciencias Biológicas y Químicas, Universidad San Sebastián, Chile. Email: [ramon.arrue@uss.cl](mailto:ramon.arrue@uss.cl)

### Resumen

Debido a la rápida urbanización e industrialización, la cantidad de exploración de recursos naturales aumenta y causa una huella de carbono, planteando un desafío significativo para los problemas ambientales. Para esta gestión efectiva de los recursos naturales y mantener la utilización optimizada de los recursos naturales, se propuso utilizar ceniza volcánica calcinada como reemplazo de partículas de cemento como material alternativo para las industrias de la construcción. El estudio se enfoca en las propiedades mecánicas (compresión y flexión) y térmicas del concreto hecho a partir de ceniza volcánica calcinada como reemplazo de partículas de cemento en una proporción del 0 % al 30 % en incrementos del 10 %. El reemplazo de ceniza volcánica calcinada por el 30 % de cemento ha mostrado resultados prometedores que podrían mejorar las propiedades mecánicas. En consecuencia, para garantizar el parámetro influyente de las propiedades mecánicas utilizando ceniza volcánica calcinada, se realizaron investigaciones microestructurales como MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y EDS (Espectroscopía de Dispersión de Energía) a muestras de roca volcánica. Cuando comparamos el concreto convencional, exhibe propiedades mecánicas similares. El resultado de estos resultados abre una nueva era de utilización de ceniza volcánica calcinada como reemplazo de partículas en cemento, también contribuye a la reducción de la huella de carbono mediante la utilización de materiales alternativos en la producción de concreto.

**Palabras clave:** cemento calcinado, materiales de construcción alternativos, propiedades mecánicas, propiedades térmicas.

### Abstract

Due to rapid urbanization and industrialization, the amount of natural resource exploration is increasing and causing carbon footprint, posing a significant challenge to environmental issues. For this effective management of natural resources and maintaining optimized utilization of natural resources, it is proposed to use calcined volcanic ash as a replacement for cement particles as an alternative material for construction industries. The study focuses on the mechanical (compressive and flexural) and thermal properties of concrete made from calcined volcanic ash as a replacement for cement particles at a ratio of 0% to 30% in 10% increments. Replacement of calcined volcanic ash by 30% cement has shown promising results that could improve the mechanical properties. Accordingly, to ensure the influential parameter of mechanical properties using calcined volcanic ash, microstructural investigations such as SEM (Scanning Electron Microscopy) and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) were conducted on volcanic rock samples. When compared to conventional concrete, it exhibits similar mechanical properties. The result of these results opens a new era of using calcined volcanic

ash as a replacement for particles in cement, it also contributes to reducing the carbon footprint by using alternative materials in concrete production.

**Keywords:** calcined cement, alternative construction materials, mechanical properties, thermal properties.

## 1. Introducción

La producción de cemento Portland, un componente esencial en la construcción moderna y el segundo material más consumido a nivel mundial después del agua [1, 2], ha alcanzado la cifra de 4100 millones de toneladas métricas anuales. Este material, base del hormigón, ha sido fundamental para el desarrollo de infraestructuras y edificaciones en todo el mundo. Sin embargo, su producción intensiva en energía y la consecuente emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) han generado preocupación en la comunidad científica y en la sociedad en general [1]. Aunque el hormigón se considera más sostenible que otros materiales de construcción como el vidrio y el acero, su elevado consumo ha erosionado esta ventaja, convirtiendo la reducción de su impacto ambiental en un desafío urgente [1]. Las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de cemento representan aproximadamente el 8,6% de todas las emisiones antropogénicas de este gas de efecto invernadero, lo que subraya la necesidad de buscar alternativas más sostenibles [3, 4].

Las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón son indicadores cruciales de su rendimiento, y la microestructura desempeña un papel vital en la determinación de su rendimiento general [5]. Los materiales de construcción tienen una influencia muy importante en el consumo de energía. En un sistema tradicional de pérdida de calor de edificio, el 70% de la pérdida de calor del edificio se debe a la estructura envolvente. Por lo tanto, mejorar el rendimiento térmico de la envolvente del edificio es fundamental para lograr la conservación de la energía. Entre ellas, el uso racional de materiales aislantes del calor es una de las formas más eficaces de mejorar la utilización y conservación de la energía [6].

La búsqueda de soluciones para mitigar el impacto ambiental del hormigón se ha enfocado en diversos aspectos, desde la optimización de los procesos de producción hasta la modificación de su composición. En particular, la sustitución parcial del cemento Portland por materiales cementantes suplementarios ha demostrado ser una estrategia prometedora [7]. Investigaciones previas han explorado el uso de materiales como piedra caliza, cenizas volantes, escoria de alto horno e incluso arcilla calcinada como sustitutos parciales del cemento, logrando reducciones significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub> [8-16]. Estos materiales, además de disminuir la demanda de cemento Portland, pueden mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón, lo que

contribuye a la eficiencia y sostenibilidad de la construcción.

En este contexto, los materiales volcánicos, como la roca volcánica calcinada, han captado la atención de investigadores y profesionales de la construcción [17, 18]. Estos materiales, originados a partir del enfriamiento y solidificación del magma expulsado durante erupciones volcánicas [19], presentan características únicas que los hacen especialmente atractivos para su uso en la construcción. Su composición química, rica en sílice y alúmina, les confiere propiedades puzolánicas, es decir, la capacidad de reaccionar con la cal libre del cemento y formar compuestos que mejoran la resistencia y durabilidad del hormigón [21]. Además, la disponibilidad de estos materiales en regiones con actividad volcánica los convierte en una opción local y sostenible para la producción de cemento y hormigón.

Chile, un país con una vasta actividad volcánica y extensos depósitos de roca volcánica, se presenta como un laboratorio natural para la investigación y desarrollo de materiales de construcción sostenibles basados en estos recursos [20]. La presencia de puzolanas naturales, un subproducto de erupciones volcánicas pasadas, ofrece una oportunidad única para aprovechar este potencial y contribuir a la reducción de la huella de carbono de la industria de la construcción. La sustitución parcial del cemento Portland por puzolanas volcánicas no solo representa una estrategia para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino que también puede mejorar las propiedades del hormigón, como su resistencia a la compresión, flexión y durabilidad.

El presente estudio se centra en evaluar el potencial de la roca volcánica calcinada endurecida como sustituto parcial del cemento en mezclas de concreto. A través de un enfoque experimental riguroso, se analizarán las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y flexión) y térmicas de concretos con diferentes proporciones de sustitución de cemento por roca volcánica calcinada (0%, 10%, 20% y 30%). El objetivo principal es determinar la proporción óptima de sustitución que permita maximizar el rendimiento del concreto en términos de resistencia, durabilidad y propiedades térmicas, al tiempo que se minimiza el impacto ambiental asociado a la producción de cemento. Los resultados de esta investigación proporcionarán información valiosa para la industria de la construcción, promoviendo el uso de materiales locales y sostenibles, y contribuyendo a un futuro más respetuoso con el medio ambiente.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Roca volcánica

Las rocas volcánicas para reemplazo de cemento se obtuvieron por medio de una recolección manual en la zona de la cordillera de los Andes en la región de la Araucanía. En la preparación del polvo de roca volcánica para su uso como reemplazo parcial del cemento, esta fue sometida a un proceso de calcinación en un horno a una temperatura de 1000°C, este proceso de calcinación tuvo como objetivo mejorar las propiedades puzolánicas del material y asegurar su reactividad química adecuada para el proceso de mezcla con los componentes del concreto. La Figura 1 muestra el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) con el fin de investigar las características microestructurales del material. Se observa una morfología cristalina heterogénea y tamaños de partículas variados. Adicionalmente, el mapeo indica fuerte presencia de elementos como oxígeno, aluminio y silice, tal como también lo corroboran la Tabla 1 y Figura 2 donde se muestran los resultados del análisis de dispersión de energía de rayos X (EDS).

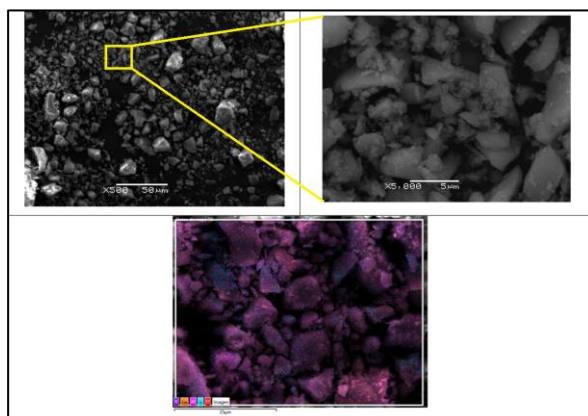


Figura 1. SEM y mapeo de roca volcánica calcinada y pulverizada.

Tabla 1. Composición química en porcentaje de la roca volcánica.

Elemento	% peso	% atómico
O	50.4	64.39
Na	3.16	2.81
Al	7.78	5.9
Si	33.12	24.11
K	3.26	1.70
Ca	0.84	0.43
Fe	1.05	0.38
Ti	0.11	0.05
Mg	0.28	0.24
Total	100	100

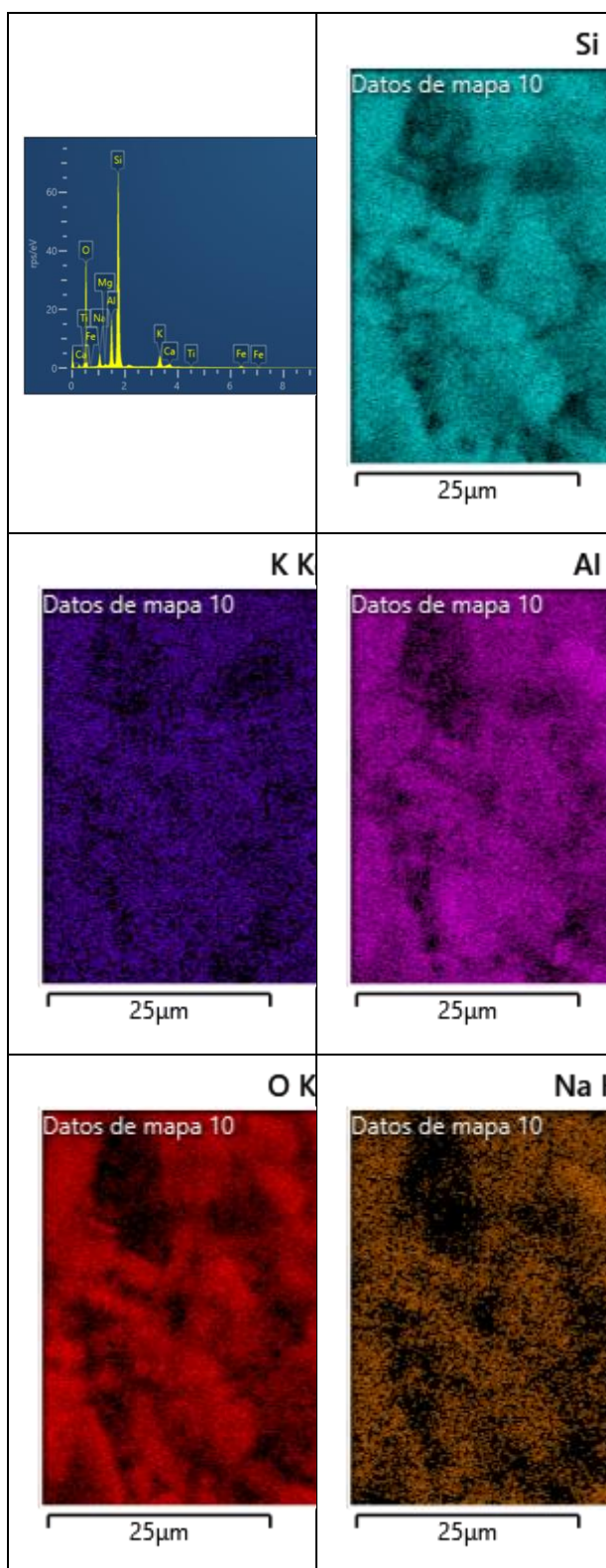


Figura 2. Imágenes EDS de muestra de roca volcánica

## 2.2. Agregado fino y cemento

El aglutinante utilizado en este estudio es un producto comercial de la empresa cementos Bio Bio (CBB), obtenido por molienda conjunta de clinker, puzolana y yeso. El producto Cbb Cementos Especial es un cemento obtenido por molienda conjunta de clinker, puzolana y yeso, grado corriente de acuerdo con la norma NCh 148 of68 [22]. El árido utilizado fue arena fina genérica comercial. Las propiedades físicas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas del agregado fino

Propiedades agregado fino	Valor
absorción agua	1,92%
Densidad	2663,9 kg/m <sup>3</sup>
Contenido de material fino	1,8%

## 2.3. Proporción de mezcla

Este estudio tuvo como objetivo investigar el rendimiento mecánico del concreto a base de un reemplazo parcial de cemento por roca volcánica calcinada. Se prepararon muestras con distintas concentraciones de reemplazo de cemento puzolanico en porcentaje de peso, además de una concentración patrón. La proporción de materiales utilizados para la mezcla de concreto se proporciona en la Tabla 3.

Tabla 3. Proporciones de materiales en mezcla

Denominación de la mezcla	Relación agua/cemento	Relación cemento/arena	Porcentaje de remplazo de cemento por roca volcánica en peso
Control	0,5	0,5	0%
10RV90			10%
20RV80			20%
30RV70			30%

La mezcla de hormigón se realizó con la máquina mezcladora rotativa disponible en el laboratorio. El procedimiento de mezcla de las muestras de concreto para este estudio se llevó a cabo siguiendo estrictamente los lineamientos establecidos por la norma ASTM C192 [23], asegurando así la estandarización y la reproducibilidad de los resultados.

Luego del proceso de disposición en los moldes metálicos prismáticos, estos fueron colocados en el laboratorio en condiciones ambientales durante 24

horas para su endurecimiento. Tras el desmoldeo, las muestras se curaron en húmedo sumergidas bajo agua a una temperatura ambiente ( $20 \pm 2$  °C) y pH 12 ( $\pm 0.5$ ) durante 7 y 28 días antes de las pruebas.

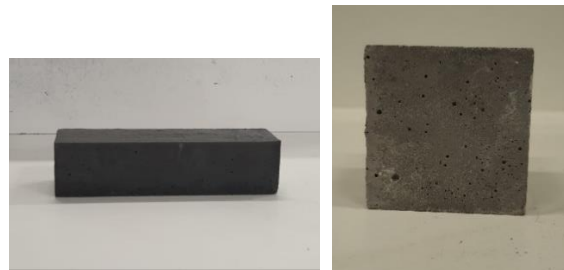


Figura 3. Muestras 10RV90

## 2.4. Métodos de ensayos

### 2.4.1. Ensayos físicos

Para evaluar la propiedad de consistencia de las mezclas, se realizó la prueba de desplazamiento de concreto con una meza de fluidez de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C230 [24]. Se realizó, además, las mediciones de densidad de las mezclas, las que permitieron a su vez la medición de porcentaje de absorción de agua y porcentaje de porosidad de las muestras.

### 2.4.2. Ensayos de propiedades mecánicas

Para evaluar la influencia de la concentración de roca volcánica en las propiedades mecánicas del concreto a los 7 y 28 días, se realizaron pruebas mecánicas de resistencia a la flexión y en muestras prismáticas de 40 x 40 x 160 mm y cubicas de 50 x 50 x 50 de mm. Las pruebas de flexión se llevaron a cabo de acuerdo con la norma ASTM C78 [25], y las de compresión según la norma ASTM C109 [26]. Para determinar las resistencias, se calcularon los promedios de tres muestras en el caso de la flexión y la compresión, todas ellas obtenidas a partir de diferentes mezclas de concreto con roca volcánica y tiempos de curado.

### 2.4.3. Ensayo de conductividad térmica

La conductividad térmica se midió utilizando un analizador de propiedades térmicas modelo adoptando el método de fuente de calor de línea transitoria de acuerdo con ASTM D5334 [27]. El instrumento utilizado (Figura 4) es un medidor portátil avanzado con una selección única de sensores de conductividad térmica transitoria modelo TLS-50.



Figura 4. Equipo TLS-50

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Trabajabilidad y propiedades físicas

La Figura 5 muestra los resultados de la prueba de fluidez del concreto. Un mayor flujo indica una mayor fluidez, lo que sugiere que el concreto se extiende más fácilmente, mientras que un flujo menor indica una consistencia más rígida.

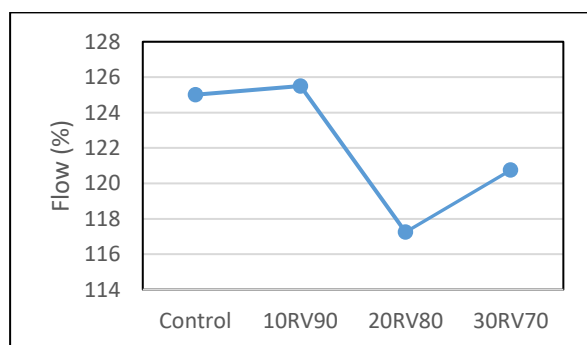


Figura 5. Resultados del ensayo de desplazamiento.

Estos valores de flujo indican un grado significativo de fluidez o trabajabilidad del concreto, sugiriendo que se extendió considerablemente durante la prueba. En términos de aplicaciones prácticas, los resultados indican que la roca volcánica calcinada tiene el potencial de mejorar la trabajabilidad del concreto a bajos niveles de reemplazo, pero aumentar el porcentaje de reemplazo puede disminuir esta trabajabilidad.

Tabla 4. Propiedades físicas de las mezclas.

Mezcla	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción %	Porosidad %
Control	2091.7	10.6	22.1
10RV90	2069.3	11.0	22.8
20RV80	2042.3	11.2	22.9
30RV70	2029.2	11.4	23.2

La Tabla 4 muestra los resultados de las pruebas de densidad, absorción y porosidad en mezclas de

concreto con diferentes niveles de reemplazo de cemento por polvo de roca volcánica.

Se observa una disminución notable en la densidad a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, lo que sugiere que la inclusión de roca volcánica reduce la densidad del hormigón. Esta reducción puede deberse a la menor densidad de la roca volcánica en comparación con el cemento. Por otro lado, la absorción de agua y la porosidad aumentan significativamente con mayores porcentajes de reemplazo. Este incremento en la absorción y porosidad indica que las mezclas con mayor contenido de roca volcánica son más propensas a absorber agua y presentan una estructura más porosa o menos compacta. Estos cambios en la absorción y porosidad pueden tener implicaciones negativas en términos de durabilidad del hormigón, ya que las estructuras más porosas son más susceptibles a procesos de deterioro como ciclos de congelación/descongelación y ataque químico.

#### 3.2. Ensayos pruebas mecánicas

##### 3.2.1. Flexión

La Figura 6 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por flexión, se muestra el promedio de tres valores para los ensayos a las edades de 7 y 28 días para los tres diferentes porcentajes de reemplazos de cemento, así como también la muestra patrón.

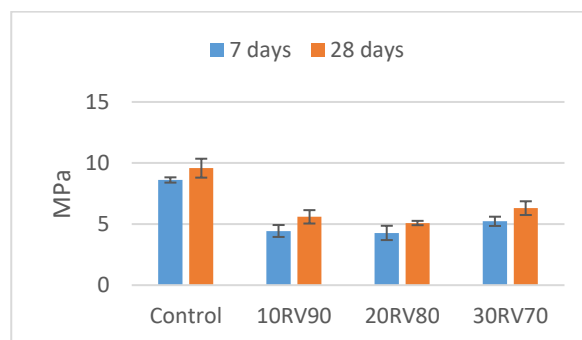


Figura 6. Resistencia a la flexión.

El análisis de los resultados de flexión revela una tendencia clara en la disminución de la resistencia del hormigón al reemplazar parcialmente el cemento por roca volcánica calcinada y pulverizada. En las muestras de control, sin ningún reemplazo, se observa una resistencia a la flexión de aproximadamente 8 MPa a los 7 días, que aumenta a alrededor de 10 MPa a los 28 días. Este comportamiento es esperado, ya que la hidratación del cemento continúa aumentando la resistencia del hormigón con el tiempo.

En contraste, las muestras con 10% de roca volcánica (10RV90) muestran una resistencia significativamente



menor, alcanzando aproximadamente 4.5 MPa a los 7 días y cerca de 6 MPa a los 28 días. De manera similar, las muestras con 20% de reemplazo (20RV80) presentan una resistencia de alrededor de 5 MPa a los 7 días y aproximadamente 6.5 MPa a los 28 días. Estos resultados indican que el reemplazo parcial de cemento por roca volcánica reduce la resistencia a la flexión inicial del hormigón. Sin embargo, las muestras con el 30% de reemplazo (30RV70) muestran una menor disminución en la resistencia comparada con las otras mezclas de reemplazo. A los 7 días, estas muestras alcanzan alrededor de 5 MPa, y aproximadamente 6.5 MPa a los 28 días. Aunque estas resistencias son todavía inferiores a las del control, la menor reducción sugiere que la roca volcánica calcinada podría estar proporcionando ciertos beneficios pozzolánicos o de relleno que mejoran la resistencia a medida que se incrementa su porcentaje.

Este comportamiento sugiere que hay un potencial para optimizar el porcentaje de reemplazo de cemento por roca volcánica calcinada para maximizar la resistencia del hormigón. Los resultados del 30% de reemplazo indican la posibilidad de que porcentajes más altos de reemplazo podrían ofrecer una mejor resistencia a largo plazo.

### 3.2.2. Compresión

La máxima resistencia que una sustancia soporta bajo una fuerza compresiva o de aplastamiento antes de romperse o fracturarse se llama resistencia a la compresión. La Figura 7 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por compresión.

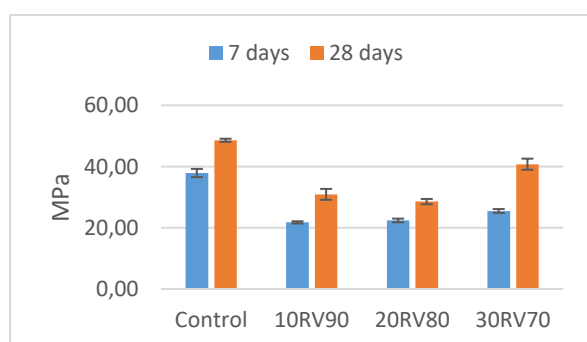


Figura 7. Resistencia a la compresión.

El análisis de los resultados de compresión revela que la incorporación de polvo de roca volcánica calcinada como reemplazo parcial del cemento afecta significativamente la resistencia del concreto. Las muestras de control, que no contienen roca volcánica, muestran una resistencia a la compresión de aproximadamente 38 MPa a los 7 días, aumentando a cerca de 50 MPa a los 28 días.

En comparación, las muestras con un 10% de reemplazo de cemento por roca volcánica presentan una resistencia a la compresión notablemente menor, con aproximadamente 21 MPa a los 7 días y alrededor de 30 MPa a los 28 días. Las muestras con un 20% de reemplazo también muestran una disminución significativa, con resistencias de aproximadamente 23 MPa a los 7 días y 29 MPa a los 28 días. Estos resultados indican que la sustitución parcial de cemento por roca volcánica reduce la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, las muestras con un 30% de reemplazo muestran una disminución menor en la resistencia en comparación con los otros porcentajes de reemplazo. A los 7 días, estas muestras tienen una resistencia de aproximadamente 27 MPa y alcanzan cerca de 41 MPa a los 28 días. Aunque estas resistencias siguen siendo inferiores a las del control, la menor reducción observada sugiere que la roca volcánica calcinada podría proporcionar beneficios que mejoran la resistencia a medida que aumenta su porcentaje.

Estos hallazgos sugieren que, aunque el reemplazo de cemento por polvo de roca volcánica calcinada generalmente disminuye la resistencia a la compresión, un reemplazo del 30% parece ser más viable en términos de mantener propiedades mecánicas aceptables. Esto indica la posibilidad de que investigar porcentajes de reemplazo superiores al 30% pueda optimizar la resistencia a la compresión.

### 3.2.3. Conductividad térmica

La Figura 8 muestra los resultados de conductividad térmica obtenidos por el equipo TLS-50 a una corriente de 250 mA y un intervalo de medición de 60 segundos en muestras de 28 días de curado.

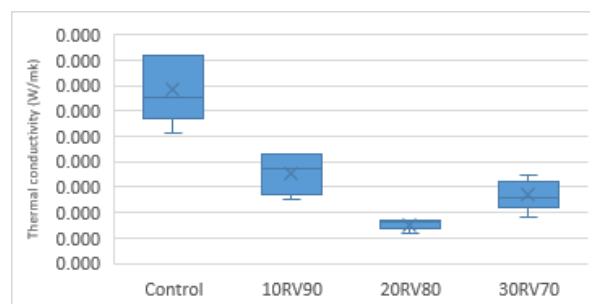


Figura 8. Conductividad térmica a los 28 días.

Los resultados revelan que la incorporación de roca volcánica calcinada como reemplazo parcial del cemento producen una disminución en los valores de conductividad térmica en las muestras de hormigón. Esta disminución se observa hasta un reemplazo de 30% donde aumenta levemente. La disminución en los valores de conductividad está acorde a la

disminución de la densidad de las muestras, por otro lado, para el caso de un mayor reemplazo (30%) puede suponerse que, por un aumento en la cantidad de estructuras moleculares más ordenadas, esto debido a la naturaleza cristalina de la roca volcánica [28], las vibraciones de las moléculas pueden transmitirse más eficientemente a través del material permitiendo una mejor transferencia de la energía térmica [29].

Para verificar el impacto del uso de roca volcánica se realizó un análisis de variancia Anova el cual arrojó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los niveles de reemplazo con una significancia del 95%.

#### 4. Conclusiones

Este estudio analizó la influencia del polvo de roca volcánica calcinada en las propiedades de resistencia mecánica mediante un reemplazo parcial de cemento para producir concreto ecológico. A continuación, se presentan los resultados más relevantes:

La densidad del concreto fue afectada negativamente a mayores remplazos de cemento, produciendo de esta forma un concreto más ligero. En contra parte, los valores de absorción de agua y porosidad aumentaron. Aunque existe una reducción en las resistencias a la flexión y compresión, se observó un incremento en los valores de ambas propiedades mecánicas con el mayor porcentaje de remplazo de cemento (30%), siendo recomendado un estudio a mayores remplazos. A bajos niveles la incorporación de roca volcánica puede disminuir la conductividad térmica del material. A partir de un 30% se percibe un aumento lo que puede suponerse a la estructura molecular más ordenada del material.

La investigación demostró la viabilidad del uso de roca volcánica calcinada como material sostenible en la construcción. Sin embargo, este estudio recomienda realizar estudios adicionales para determinar el efecto de la roca volcánica originado en diferentes fuentes sobre otras propiedades del hormigón, así como también la viabilidad en mayores valores de reemplazo.

#### 5. Referencias

[1] A. Adesina, "Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions," *Environmental Challenges*, vol. 1, 2020, doi: 10.1016/j.envc.2020.100004.

[2] L. N. Assi, A. Alsalman, R. S. Kareem, K. Carter, P. Ziehl, and Y. Alhamadani, "Why sustainable concrete cannot penetrate concrete markets," *Journal of Building Engineering*, vol. 91, p.

109487, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109487>.

[3] S. A. Miller, A. Horvath, and P. J. M. Monteiro, "Readily implementable techniques can cut annual CO<sub>2</sub> emissions from the production of concrete by over 20%," *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 7, 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074029.

[4] R. S. Kareem, L. N. Assi, A. Alsalman, and A. Al-Manea, "Effect of supplementary cementitious materials on RC concrete piles," in *AIP Conference Proceedings*, 2021, doi: 10.1063/5.0070671.

[5] D. Huang, Y. Feng, Q. Xia, J. Tian, and X. Li, "Research on mechanical properties and durability of early frozen concrete: A review," *Constr Build Mater*, vol. 425, p. 135988, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135988>.

[6] H. Zhang, J. Yang, H. Wu, P. Fu, Y. Liu, and W. Yang, "Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel foamed concrete for building energy efficiency," *Solar Energy*, vol. 204, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.092.

[7] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, and G. D. Corder, "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement," *J Clean Prod*, vol. 19, no. 9–10, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.

[8] M. A. Jungclauss, S. L. Williams, J. H. Arehart, and W. V. Srubar, "Whole-life carbon emissions of concrete mixtures considering maximum CO<sub>2</sub> sequestration via carbonation," *Resour Conserv Recycl*, vol. 206, p. 107605, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107605>.

[9] D. Sinkhonde and T. Bezabih, "On the computational evaluation of carbon dioxide emissions of concrete mixes incorporating waste materials: A strength-based approach," *Cleaner Waste Systems*, vol. 8, p. 100149, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100149>.

[10] M. A. Mosaberpanah and S. A. Umar, "Utilizing Rice Husk Ash as Supplement to Cementitious Materials on Performance of Ultra High Performance Concrete: – A review," *Materials Today Sustainability*, vol. 7–8, 2020, doi: 10.1016/j.mtsust.2019.100030.

[11] J. Y. Richard Liew, M.-X. Xiong, and B.-L. Lai, "Chapter 07 - Special considerations for high strength materials," in *Design of Steel-Concrete Composite Structures Using High-Strength Materials*, J. Y. Richard Liew, M.-X. Xiong, and B.-L. Lai, Eds., in *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, Woodhead Publishing, 2021, pp. 125–142. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823396-2.00011-3>.

[12] Y. Tan, C. Wu, H. Yu, Y. Li, and J. Wen, "Review of reactive magnesia-based cementitious materials: Current developments and potential

applicability,” *Journal of Building Engineering*, vol. 40. 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102342.

[13] H. Zhou, H. Basarir, T. Poulet, W. Li, R. A. Kleiv, and A. Karrech, “Life cycle assessment of recycling copper slags as cement replacement material in mine backfill,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 205, p. 107591, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107591>.

[14] E. Khankhaje, T. Kim, H. Jang, C.-S. Kim, J. Kim, and M. Rafieizonooz, “A review of utilization of industrial waste materials as cement replacement in pervious concrete: An alternative approach to sustainable pervious concrete production,” *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e26188, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26188>.

[15] P. K. Gunasekaran and S. C. Chin, “Performance of bamboo biochar as partial cement replacement in mortar,” *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.322.

[16] PG. Neeraja, S. Unnikrishnan, and A. Varghese, “A comprehensive review of partial replacement of cement in concrete,” *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.070.

[17] D. Dahiru, M. Ibrahim, and A. A. Gado, “Evaluation of the Effect of Volcanic Ash on the Properties of Concrete 1 2 3,” 2019.

[18] S. Gambo, U. M. Sanda, A. G. Ibrahim, J. Usman, and U. H. Mohammad, “Strength properties of ordinary Portland cement concrete containing high volume recycled coarse aggregate and volcanic ash,” in *Materials Today: Proceedings*, 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.186.

[19] C. Zou et al., “Chapter 2 - Formation and Distribution of Volcanic Rock,” in *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*, C. Zou, G. Zhang, R. Zhu, X. Yuan, X. Zhao, L. Hou, B. Wen, and X. Wu, Eds., Boston: Elsevier, 2013, pp. 11–29. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397163-0.00002-6>.

[20] Wolfy Pablo. “Chile: laboratorio natural para estudios de volcanes.”

[21] J. Yoon, K. Jafari, R. Tokpatayeva, S. Peethamparan, J. Olek, and F. Rajabipour, “Characterization and quantification of the pozzolanic reactivity of natural and non-conventional pozzolans,” *Cem Concr Compos*, vol. 133, 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104708.

[22] INN, “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. NCh148.Of68,” 1968.

[23] ASTM, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM C192,” 2020, doi: 10.1520/C0192\_C0192M-19.

[24] ASTM, “Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ASTM C230,” 2023, doi: 10.1520/C0230\_C0230M-23.

[25] ASTM, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Astm C78/C78M -22,” American Society for Testing and Materials, 2022.

[26] ASTM, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). Astm C349 -18,” American Society for Testing and Materials, 2018.

[27] ASTM, “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C496,” 2017, doi: 10.1520/C0496\_C0496M-17.

[28] N. A. Scudder, B. H. N. Horgan, E. B. Rampe, R. J. Smith, and A. M. Rutledge, “The effects of magmatic evolution, crystallinity, and microtexture on the visible/near-infrared and thermal-infrared spectra of volcanic rocks,” *Icarus*, vol. 359, 2021, doi: 10.1016/j.icarus.2021.114344.

[29] Z. Liu and P. W. Chung, “Unusual thermal transport in molecular crystals,” *Materials Today Physics*, vol. 36, 2023, doi: 10.1016/j.mtphys.2023.101163.