

Use of Marble Dust in Concrete Production

Uso de marmolina en la elaboración de hormigón

Autores:

Mendoza-Parra, Jordy Anthony
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Portoviejo – Ecuador



jmendoza0845@utm.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0009-5279-6809>

Vega-Velásquez, Eudy Leonardo
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Portoviejo – Ecuador



evega5249@utm.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0005-1589-0645>

Ruiz-Párraga, Wilter Enrique
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Departamento de Construcciones Civiles y Arquitectura
Portoviejo – Ecuador



wilter.ruiz@utm.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-0045-9781>

Fechas de recepción: 25-AGOS-2024 aceptación: 17-OCT-2024 publicación: 15-DIC-2024



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

Este estudio investiga la viabilidad de sustituir parcialmente el cemento convencional por Carbonato de Calcio (CaCO_3) (marmolina) en la producción de hormigón, centrándose en su impacto en la resistencia a la compresión del material. La marmolina, un material calcáreo, se presenta como una alternativa atractiva por su origen como subproducto de la industria de la piedra. La investigación responde a la necesidad de reducir la huella de carbono de la construcción y explorar prácticas más sostenibles. El estudio sigue un enfoque científico, incluyendo ensayos de laboratorio y diseño de mezcla, para proporcionar datos sobre el comportamiento del 25%, 50% y 75% de sustitución de marmolina por cemento. Se emplea el método de dosificación propuesto por el ACI 211.1 y se adhiere a normativas ecuatorianas para garantizar la calidad de los resultados. Los hallazgos tienen relevancia práctica para la industria de la construcción y contribuyen al conocimiento científico en el campo de los materiales de construcción sostenibles. La introducción de alternativas al cemento convencional, como la marmolina, representa un avance significativo hacia prácticas constructivas más respetuosas con el medio ambiente, alineándose con las crecientes demandas de sostenibilidad en la sociedad actual.

En los ensayos que se realizaron con las diferentes proporciones de 25%, 50% y 75% de sustitución de marmolina, se pudo observar que con el 25%, la resistencia fue mayor, mientras que la sustitución con 50% se mantiene dentro de los límites de aceptación, y los testigos con 75% mostraron valores inferiores a 210 kg/cm^2 .

Palabras clave: Hormigón; marmolina; resistencia; compresión; diseño



Abstract

This study investigates the feasibility of partially replacing conventional cement with Calcium Carbonate (CaCO_3) (marble dust) in concrete production, focusing on its impact on the material's compressive strength. Marble dust, a calcareous material, is presented as an attractive alternative due to its origin as a byproduct of the stone industry. The research responds to the need to reduce the carbon footprint of construction and explore more sustainable practices. The study follows a scientific approach, including laboratory tests and mix design, to provide data on the performance of 25%, 50%, and 75% marble dust replacement for cement. The dosage method proposed by ACI 211.1 is employed, and Ecuadorian regulations are adhered to, ensuring the quality of the results. The findings have practical relevance for the construction industry and contribute to scientific knowledge in the field of sustainable building materials. The introduction of alternatives to conventional cement, such as marble dust, represents a significant step toward more environmentally friendly construction practices, aligning with the growing demands for sustainability in today's society.

In the tests conducted with different proportions of 25%, 50%, and 75% marble dust replacement, it was observed that with 25%, the compressive strength was higher, while the 50% replacement remained within acceptable limits, and the samples with 75% showed values below 210 kg/cm^2 .

Keywords: Concrete; marble dust; strength; compression; design



Introducción

La industria de la construcción, esencial para el desarrollo de infraestructuras y edificaciones, enfrenta actualmente desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad ambiental y la reducción de su huella de carbono. En este contexto, la investigación y aplicación de nuevas tecnologías y materiales juegan un papel crucial en la búsqueda de prácticas constructivas más amigables con el medio ambiente. Uno de los aspectos fundamentales en este ámbito es la exploración de alternativas al cemento convencional, cuya producción implica considerables emisiones de dióxido de carbono.

El cemento, componente esencial en la elaboración del hormigón, ha sido históricamente un protagonista indiscutible en la construcción. Sin embargo, su proceso de fabricación intensivo en energía y la liberación de CO₂ asociada a la descarbonatación de la piedra caliza utilizada en su producción han llevado a la industria a replantearse su uso y buscar opciones más sostenibles. La sustitución parcial o total del cemento por materiales alternativos se presenta como una vía prometedora para mitigar estos impactos negativos y avanzar hacia prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental.

En este contexto, la marmolina, un material de origen pétreo caracterizado por su composición calcárea, surge como una alternativa potencial al cemento en la elaboración de hormigón. La marmolina, al ser un subproducto de la industria de la piedra caliza, posee propiedades que la hacen sugerente para su aplicación como material cementante. Este estudio se enfoca en investigar la factibilidad de sustituir el cemento por marmolina en porcentajes del 25%, 50% y 75% en la producción de hormigón, evaluando cómo esta sustitución impacta en las propiedades mecánicas y la durabilidad del material resultante.

Para realizar los ensayos, se consideraron los establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE), los mismos que se detallan a continuación:

Ensayos de Granulometría (NTE INEN 696, 2011; NTE INEN 697, 2010); Pesos Unitarios Suelos (PUS) y Compactados (PUC) (NTE INEN 858, 2010); Gravedad específica de masa y Gravedad específica de superficie saturada seca S.S.S., Porcentaje de absorción (NTE INEN 857, 2010) y Porcentaje de humedad (NTE INEN 862, 2011) al igual que los que se exponen en la investigación de Cedeño et al., (2022).

El portal estadounidense Noah Chemicals, (2022) expresa que el Carbonato de Calcio (CaCO₃ – Marmolina, nombre comercial en el Ecuador) en la industria del hormigón y su reducción de la huella de Carbono suele ser desapercibida a pesar de ser un material con un bajo nivel de emisiones de su CO₂ durante la extracción y producción del mismo. Este a su vez menciona que el Carbonato de Calcio se encuentra en tres tipos principales de rocas: creta, caliza y dolomita, incluida la metamórfica conocida como mármol dolomítico. La piedra caliza y la cal son los principales derivados de Carbonato de Calcio utilizados en la industria del hormigón. El Carbonato de Calcio ayuda a acelerar la velocidad de curado del



hormigón y aumenta la velocidad de asentamiento del mismo, detallan Alarcón et al., 2022, p. (23)

La importancia de esta investigación radica en su contribución al avance de prácticas constructivas más sostenibles y en la búsqueda de alternativas viables que minimicen el impacto ambiental de la construcción. La sustitución de cemento por marmolina afecta las propiedades del hormigón y tiene implicaciones prácticas en términos de ingeniería y construcción, sostienen Goicochea & Inga, 2021, p. (23).

El análisis de los resultados obtenidos no solo aportará información para la comunidad científica y la industria de la construcción, sino que también servirá como base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los materiales de construcción de una línea amigable con el ambiente. La introducción de alternativas al cemento convencional representa un paso significativo hacia la adopción de prácticas más sostenibles en la construcción, alineándose con las crecientes demandas de una sociedad preocupada por el impacto ambiental de sus actividades.

Material y métodos

Material

Los materiales granulares tales como ripio y arena, utilizados para el desarrollo de esta investigación fueron extraídos de una de las canteras en los alrededores de la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí, ubicadas bajo las coordenadas Este: 534492,62; Norte: 9884425,92.

a) Marmolina.

El carbonato de calcio (CaCO_3) se encuentra en la piedra caliza, “un mineral altamente versátil y uno de los más abundantes en la Tierra, que representa aproximadamente el 4% de la corteza terrestre”(Urrego, 2021). Además de proporcionar una forma rentable de añadir calcio adicional a artículos de primera necesidad, como vitaminas para la ingesta de calcio y antiácidos para la digestión, se utiliza para neutralizar compuestos ácidos en diversos contextos. Asimismo, los derivados del carbonato cálcico se utilizan ampliamente en la industria de la construcción, la agricultura y el cemento. “El carbonato de calcio también proporciona una respuesta viable para reducir la huella de carbono de la tierra” Galván & Velázquez, (2011). Se destaca por su aspecto pulido y suave, aportando elegancia y luminosidad a cualquier entorno.

- Característica química.



La fórmula química de la marmolina como producto es CaCO_3 , con un coeficiente $\text{CaO} = 0,55$. Además, de componer mayoritariamente Carbonato de Calcio ($> 98,1 \%$), posee de manera parcial en valores mínimos, Carbonato de Magnesio ($\text{MgCO}_3 = 0,95\%$), Oxido de Silicio ($\text{SiO}_2 = < 0,1\%$), Oxido de Aluminio ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,14 \%$), Óxido de Hierro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,07 \%$), Oxido de Calcio ($\text{CaO} = 55,0 \%$), y Óxido de Magnesio ($\text{MgO} = 0,45 \%$).

b) Material Cementante.

Los elementos cementantes en el Ecuador cumplen en su totalidad con las normativas INEN, y especialmente el de mayor uso el Tipo GU de uso general, que posee una combinación de elementos no mayor al 5% en sulfatos cálcicos y piedras calizas; en cumplimiento de la norma NTE INEN 151, (2010)

La característica más relevante para la investigación es el peso específico del cemento que tal como lo regulan las normas NTE INEN 2380, (2011) y NTE INEN 156, (2009) su peso es de 3.15 g/cm^3 o 3150 kg/m^3 .

Como sustituto parcial del cemento, se plantea utilizar la marmolina en proporciones que van desde el 25, 50 y 75% del material cementante.

c) Agregado grueso.

El material empleado en su totalidad fue retenido por el tamiz N° 4" (NTE INEN 694, 2010, pp. 2-3). Entre las propiedades granulométricas determinadas para este material se encuentran:

- Módulo de finura (NTE INEN 694, 2010; NTE INEN 696, 2010): 2.3 TMN $\frac{3}{4}$ pulg.
- Humedad (NTE INEN 862, 2011, pp. 2-3): 0.30%
- Peso Unitario Suelto (PUS) (NTE INEN 858, 2010): 1474.52 kg/cm^3
- Peso Unitario Compactado (PUC) (NTE INEN 858, 2010): 1578.24 kg/cm^3
- Gravedad específica de masa (NTE INEN 856, 2010): 2598.11 kg/cm^3
- Absorción (NTE INEN 856, 2010): 1.97%.

- Módulo de finura.

Este agregado grueso cumple con la faja granulométrica que se indica en las normativas de construcción del Ecuador así como en el libro guía de diseño de hormigones para puentes del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, (2002) actualmente Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP).

d) Agregado fino.



Bajo la premisa de obtener un material cementante alternativo al que se tiene tradicionalmente, se utilizó un material que, desde la cantera, es diseñado y dosificado para obtener fácilmente resistencia de 210 kg/cm^2 . Dicho material es una arena procesada con otros agregados finos con la finalidad de ajustarse a las características indicadas en la NTE INEN 694 del 2010. El origen del agregado fino es el mismo de donde se obtuvo el material de mayor tamaño. Algunas de las propiedades que se obtuvieron de este material son:

- Módulo de finura (NTE INEN 694, 2010; NTE INEN 696, 2010): 2.3
- Peso Unitario Suelto (PUS) (NTE INEN 858, 2010): 1533.57 kg/cm^3
- Peso Unitario Compactado (PUC) (NTE INEN 858, 2010): 1584.41 kg/cm^3
- Gravedad específica de masa (NTE INEN 856, 2010): 2761.30 kg/cm^3
- Gravedad específica (NTE INEN 857, 2010): 2696.19 kg/cm^3
- Absorción (NTE INEN 857, 2010): 0.93%

- **Humedad.**

El agregado empleado se puede considerar que posee un grano mediano y con un adecuado ajuste a la faja granulométrica, donde considerando la norma NTE INEN 862, (2011) donde se determinó una humedad del 0.32%.

e) Agua.

El agua de amasado para las muestras se basa en el cumplimiento de la norma NTE INEN 2617, misma que se obtuvo de la red de agua potable.

- **Módulo de finura de la marmolina.**

El módulo de finura de la marmolina se realizó con 300 gr del mismo material dando un resultado de 1.52. Se utilizaron los tamices 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200 tal como se indica en la norma NTE INEN 696, (2010).

Métodos

Diseño de mezcla.

El diseño de esta mezcla fue realizado considerando el método de dosificación para diseño de hormigones que se plantea en el ACI 211.1. Aplicando esta metodología de cálculo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1. Dosificación para un metro cúbico de hormigón.
 Sustitución de Carbonato de Calcio
 (CaCO₃)

Materiales



	0%	25%	50%	75%
Cemento (kg)	386.54	289.91	193.27	96.64
Ripio (kg)	790.10	790.10	790.10	790.10
Arena (kg)	857.20	857.20	857.20	857.20
Agua (lt)	248.20	248.20	248.20	248.20
Marmolina (kg)	386.54	96.54	193.27	289.91

La relación empleada para el agua cemento se considera en base a las recomendaciones del ACI, siendo esta una relación a/c=0.53, según el diseño técnico de la dosificación.

a) Ensayos asentamiento

Este proceso se llevó a cabo utilizando un molde en forma de cono (cono de Abrams) para determinar la deformación vertical del concreto, según la norma NTE INEN 1578, (2010), el objetivo principal de esta prueba es determinar la capacidad del concreto para fluir y deformarse bajo su propio peso.

Figura 1. Revenimiento con 0% de marmolina (A), y revenimiento con 50% de sustitución de marmolina (B).

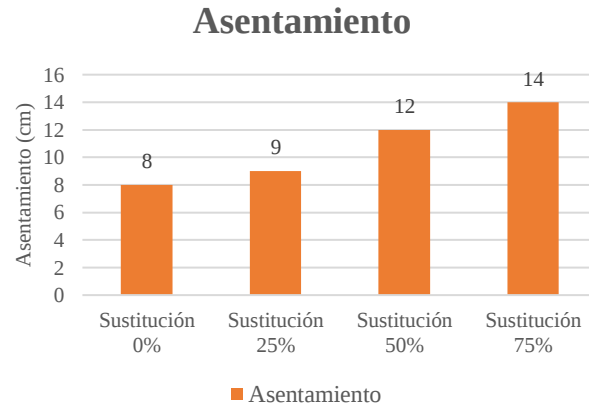


En el modelo teórico del diseño se consideró un revenimiento de 2 a 4 pulgadas para cada una de las sustituciones cementantes, en la siguiente tabla se exponen los resultados obtenidos en laboratorio; para realizar la mezcla se empleó un aditivo superplastificante reductor de agua con densidad de 1.20 kg/L.

Figura 2. Asentamientos de las mezclas frescas.

Tabla 2. Ensayos de asentamiento.

Sustitución (%)	Asentamiento (cm)
0	8
25	9
50	12
75	14



Una peculiaridad que se presentó en el amasado de las sustituciones es que la mezcla se volvía menos consistente cuanto más marmolina presentaba en su composición, sin embargo, este comportamiento no le imposibilitaba de conservar una consistencia que le permitía tener resistencia aceptable en los límites de diseño, pero en su fraguado esta misma consistencia incurrió que el proceso de secado sea mucho más lento en términos relativos, es decir, a mayor cantidad de marmolina, mayor era el tiempo de fraguado.

Esto causó que al momento de realizar el desencofrado de muestras superiores al 50% de marmolina como cementante, estas tuvieron que estar 6 horas más en el molde para ser desencofrada, por no tener una composición apta en su cara superior en comparación a la muestra patrón que en un transcurso de 24 horas ya podían ser colocados en la piscina.

Resultados

Para comprobar que el diseño y las dosificaciones han sido realizadas correctamente se evaluaron las resistencias a la compresión de acuerdo con lo que se menciona en la norma NTE INEN 1573, (2010), donde los días a considerar son a los 7, 14 y 28 días.

a) Ensayos a compresión muestras patrón.

La norma describe los tipos de moldes que se pueden emplear para realizar especímenes de hormigón y que estos se consideren ensayos adecuados de calidad; por tal motivo se han utilizado modelos de hormigón pequeños de una altura de 20 cm y 10 cm de diámetro.

El diseño de ejemplares de hormigones con resistencias de 210 kg/cm² son el punto de partida y diseño patrón para la comparativa de sustitución del material cementante con la marmolina. La norma NTE INEN 1573, (2010) especifica que se deben considerar como mínimo 3 especímenes de hormigón para poder obtener un promedio de resistencia por cada día de análisis que se recomienda.

Las resistencias a la compresión obtenidas durante los días de ensayos destructivos muestran que estos hormigones, por el método del ACI 211.1, han superado las resistencias esperadas, excepto el 75%.

Este parámetro fue determinado siguiendo las prescripciones estipuladas por la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1573 del año 2010. Los especímenes producidos fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión a intervalos de 7, 14 y 28 días, siendo este último el de mayor relevancia en virtud que en dicho periodo, se manifiesta una porción significativa de la resistencia máxima del concreto.

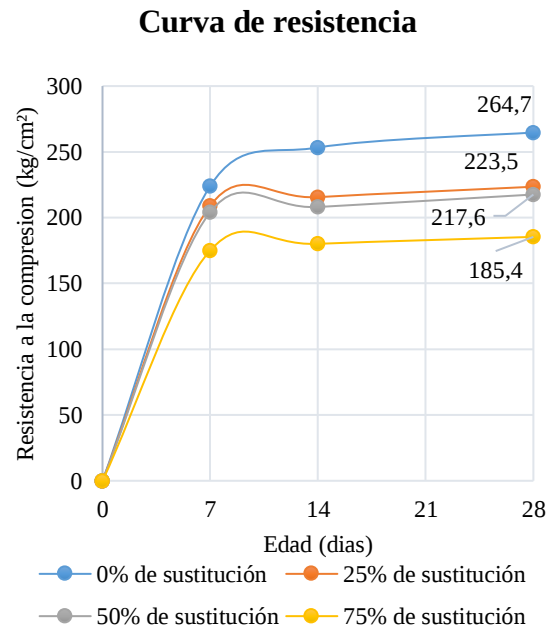
Esta última exhibe las magnitudes de resistencia a la compresión de las probetas ensayadas, mismas que varían su resistencia en relación al tiempo y en relación directa con el grado de sustitución del material cementante, en la tabla 3 se muestran las resistencias alcanzadas luego de ser ensayadas las 9 probetas por cada porcentaje.

Los resultados obtenidos proporcionan una visión discernible acerca de la progresión de la resistencia a lo largo del tiempo, contribuyendo así a una comprensión exhaustiva de las propiedades del hormigón en sus diversas etapas evolutivas.

Tabla 3. Resistencia del hormigón con diferentes porcentajes de sustitución.

Sustitución %	Tiempo (Días)	Resistencia de diseño Kg/cm ²
0	7	224.1
	14	253.3
	28	264.7
25	7	209.1
	14	215.6
	28	223.5
50	7	204.2
	14	208.1
	28	217.6
75	7	175.1
	14	180.1
	28	185.4

Figura 3. Resistencia a la compresión a edades de 7, 14 y 28 días de curado.



Los ensayos de resistencia para todos los casos se realizaron a los 7, 14 y 28 días de curado de las probetas, donde se reflejan las resistencias de todas las sustituciones realizadas de acuerdo a sus porcentajes.

En el caso de las sustituciones en porcentajes de 25% se observan resultados con un incremento gradual en la resistencia a la compresión con el tiempo. A los 7, 14 y 28 días, las resistencias son 209.1, 215.6 y 223.5 kg/cm², respectivamente. Este incremento sugiere una respuesta positiva a la sustitución parcial de cemento, indicando un fortalecimiento continuo de la mezcla.

En contraste, el porcentaje de sustitución del 50% muestra una disminución en la resistencia a la compresión a lo largo del tiempo. La resistencia medida a los 28 días es de 217.60 kg/cm². Esta tendencia puede sugerir posibles limitaciones en términos de resistencia al aumentar la sustitución del cemento.

Similar a la tendencia del 50%, el porcentaje de sustitución del 75% presenta una disminución de la resistencia a la compresión, alcanzando un máximo de 185.42 kg/cm² en 28 días. Este descenso plantea interrogantes sobre la viabilidad de niveles más altos de sustitución en términos de resistencia estructural.

La disminución en la resistencia a la compresión, especialmente para niveles más altos de sustitución (75%) de marmolina, sugiere una posible afectación en la calidad estructural del hormigón. Esta pérdida de resistencia puede deberse a la presencia de materiales sustitutos que podrían no contribuir de manera efectiva a las propiedades mecánicas deseadas.

La variación temporal en las resistencias destaca la influencia significativa del porcentaje de sustitución en las propiedades mecánicas del hormigón. La tendencia al alza para el 25% y la disminución para el 50% y 75% a lo largo del tiempo subraya la importancia de evaluar el impacto a largo plazo de la sustitución del cemento en la resistencia estructural.

Se observa cierta variabilidad, especialmente a los 14 días, lo que podría estar relacionado con factores como la distribución heterogénea de los materiales o las condiciones de curado. Este aspecto destaca la importancia de mantener condiciones controladas para obtener resultados más consistentes.

Análisis de los Resultados

La tendencia creciente en la resistencia a la compresión a lo largo del tiempo sugiere una mejora continua en las propiedades mecánicas del hormigón con un 25% de sustitución. Este incremento puede ser indicativo de una reacción positiva entre los materiales sustitutos y el cemento, promoviendo una matriz más resistente y duradera.

En contraste, la disminución en las resistencias para porcentajes de sustitución del 50% y 75% plantea interrogantes sobre la durabilidad a largo plazo. La reducción de la resistencia podría indicar una vulnerabilidad potencial a factores ambientales y de servicio que podrían comprometer la integridad estructural con el tiempo.



La durabilidad del hormigón no solo se mide por la resistencia a la compresión, sino también por su capacidad para resistir agresiones ambientales como la acción de agentes químicos, ciclos de congelación y deshielo, y la exposición a condiciones climáticas adversas. La disminución de la resistencia podría indicar una mayor vulnerabilidad a estos factores.

Es esencial evaluar la durabilidad a largo plazo al considerar la sustitución del cemento en el diseño de mezclas de hormigón. Los resultados actuales sugieren que el nivel de sustitución puede tener un impacto significativo en la resistencia y, por ende, en la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Las mezclas con un 25% de sustitución muestra un comportamiento favorable en términos de resistencia. Sin embargo, los niveles más altos de sustitución requieren una atención cuidadosa y posiblemente ajustes en las proporciones de la mezcla para mantener el desempeño estructural a lo largo del tiempo.

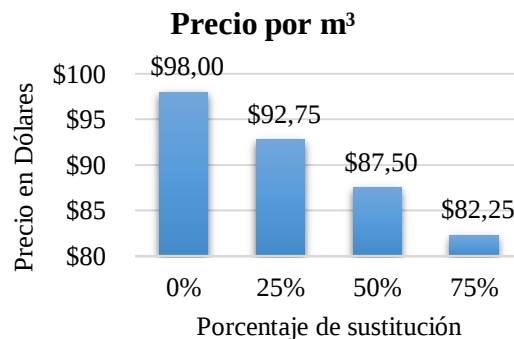
V. Relación costo – beneficio

En un análisis basado en volumen (m^3) como unidad de medida, se obtiene que, a mayor relación de sustitución de marmolina por cemento, el precio por metro cubico se reduce. Sin embargo, en una correlación entre el precio y el beneficio (en términos de resistencia ganada), no resulta beneficioso sustituir más de 50% de cemento por marmolina, ya que, en esta combinación, aún se mantiene por encima de los 210 kg/cm^2 a los 28 días en contraste a la sustitución del 75% del material cementante por carbonato de calcio.

Tabla 4. Precio por metro cúbico.

Material	Costo por m^3 en \$			
	0%	25%	50%	75%
Cemento	56,00	42,00	28,00	14,00
Marmolina	0,00	8,75	17,50	26,25
Arena	21,00	21,00	21,00	21,00
Piedra	21,00	21,00	21,00	21,00
Total	98,00	92,75	87,50	82,25
% ahorro	0	5,4	10,7	16,1
\$ ahorro	0	5,25	10,50	15,75

Figura 4. Precio aproximado de un metro cúbico de hormigón según su porcentaje de sustitución de cemento por marmolina.



Discusión

La marmolina a pesar de ser un material conglomerante, por su composición y comportamiento de acuerdo a sus aplicaciones generalizadas, requiere algún tipo de elemento que permita generar mayor adherencia, sea cal, cemento, resina, etc., esto podría



significativamente limitar sus aplicaciones, sin embargo, no exime que sea empleado dentro del ámbito de la construcción gracias a sus bondades en cuanto a resistencia y durabilidad, por ejemplo.

Dada la muy limitada información referente a investigaciones previas sobre el uso exclusivo de la marmolina como sustituto del cementante en la preparación de hormigones, es imperativo indicar que su comportamiento en ambiente controlado ha presentado resultados satisfactorios, pudiéndose ampliar sus aplicaciones en el uso de hormigones en obras menores.

Esta investigación sostiene que hasta en una sustitución del 50% del cemento por marmolina, esta alcanza una resistencia superior a los 210 kg/cm², ahorrando aproximadamente 10.7% del precio por metro cubico (sin considerar mano de obra).

Conclusiones

La sustitución parcial del cemento con marmolina en proporciones del 25%, 50% y 75% mostró resultados divergentes en la resistencia a la compresión. Mientras que las sustituciones del 25 y 50% presentaron un incremento gradual en la resistencia, la sustitución 75% mostro una disminución, indicando la necesidad de considerar cuidadosamente los porcentajes de sustitución.

La durabilidad del concreto con 25 y 50% de sustitución de cemento por marmolina sugiere un comportamiento más favorable en términos de resistencia. Sin embargo, la disminución de la resistencia a medida que aumenta el porcentaje de sustitución plantea dudas sobre la viabilidad estructural de niveles más altos de sustitución, subrayando la importancia de evaluar la durabilidad en conjunto con la resistencia a la compresión.

Referente a los áridos, se emplearon los criterios que dictan las normas NTE INEN, y con ello se concluyó que son aptos para la generación de hormigones con especificaciones de resistencias dadas.

El método de diseño de mezcla propuesto por el ACI 211.1 resultó efectivo para lograr resistencias a la compresión superiores a 210 kg/cm² en dos de los tres casos de sustitución (25% y 50%).

En cuanto al impacto ambiental relacionado con la huella de carbono que involucra la obtención de la marmolina, es sustancialmente menor al del cemento Portland, dada la inexistencia de hornos en la línea de producción. Sin embargo, la mayor fuente de marmolina se basa en los desechos del mármol (triturado) y el cemento por su parte, es la combinación



de una serie de elementos y compuestos que le dan las propiedades mecánicas, físicas y químicas típicas.

La investigación reveló que las mezclas con mayores porcentajes de sustitución de cemento experimentaron dificultades en términos de consistencia y fraguado. Se recomienda implementar un control riguroso en los procesos de mezcla y curado para mitigar los posibles desafíos asociados con la sustitución de cemento. Esto incluye la supervisión de la cantidad de agua, el tiempo de mezclado y las condiciones de curado.

Por otra parte, resulta económico emplear hormigón con marmolina para solicitudes menores o iguales a 210 kg/cm^2

Recomendaciones

Dada la variabilidad en los resultados observados con diferentes porcentajes de sustitución de cemento, se recomienda llevar a cabo estudios más detallados para determinar la proporción óptima de marmolina que garantice tanto la resistencia a la compresión como la durabilidad a largo plazo. Es crucial encontrar un equilibrio que mejore la sostenibilidad sin comprometer la integridad estructural.

Dado que la investigación se centró principalmente en resistencias a 7, 14 y 28 días, se sugiere realizar estudios adicionales para evaluar las propiedades a largo plazo del concreto con sustitución de cemento. Esto podría incluir análisis de resistencia a la compresión a intervalos extendidos, así como evaluaciones de la resistencia a factores ambientales y de servicio para obtener una comprensión completa de la durabilidad del material.

Referencias bibliográficas

- ACI 211.1. (2015). Diseño de Mezclas de Concreto [Norma].
- Alarcón, Z., Molina, N., & Valeria, G. (2022). Estudio petrográfico de la piedra caliza y potencial de carbonato de calcio en el sector Chiguaza en cantón Huamboya provincia de Morona Santiago. [Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17545>
- Cedeño, H., Chávez, J., Macías, L., & Ortiz, E. (2022). Combinación de mezclas de agregados gruesos y finos pertenecientes a la Cantera Uruzca para diferentes resistencias de hormigón. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación. ISSN: 2737-6249., 5(9 Ed. esp.), Article 9 Ed. esp. <https://doi.org/10.46296/ig.v5i9edesfeb.0055>



Galván, M., & Velázquez, R. R. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(1), 93-102. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2011.12n1.010>

Goicochea, K., & Inga, N. (2021). La marmolina y su influencia en las propiedades de concretos de alta resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ para la ciudad de Trujillo [Tesis, Universidad Privada Antenor Orrego]. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/8055>

Ministerio De Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes.

Noah Chemicals. (2022, marzo 8). Carbonato de calcio (CaCO_3) en la industria del hormigón y su reducción de la huella de carbono | Noah Chemicals. <https://espanol.noahchemicals.com/blog/carbonato-de-calcio-en-la-industria-del-hormigon-y-su-reduccion-de-la-huella-de-carbono/>

NTE INEN 151. (2010). Cemento Hidráulico. Definición de términos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 696. (2010). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 696. (2011). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos finos y gruesos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 697. (2010). Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz 200 por lavado. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 857. (2010). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 858. (2010). Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 862. (2011). Áridos para hormigón. Determinación de la humedad total. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 1573. (2010). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTE INEN 2380. (2011). Cemento Hidráulico: Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Urrego, D. (2021). Mecanismos de degradación de concreto mediados por la simbiosis entre *Leucaena leucocephala* y *Aspergillus niger* establecidos en estructuras urbanas. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.



Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

A todos quienes participaron en el proceso para la generación de esta investigación.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.

