

## Investigación experimental sobre polvo de mármol y metacaolín como reemplazo parcial del cemento en mortero autocompactante

**Samatha Bairi<sup>1</sup>, Rakesh Kuchana<sup>2</sup>, Canales Cárdenas Cristian Alexis<sup>3\*</sup>, Krishna Prakash Arunachalam<sup>4</sup>, Siva Avudaiappan<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Guntur Engineering College, Opp. Katuri Medical College, Yanamadala, Andhra Pradesh, 522019, India.  
[rakeshinfra509@gmail.com](mailto:rakeshinfra509@gmail.com), [bairisamatha795@gmail.com](mailto:bairisamatha795@gmail.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. [criscanales@udec.cl](mailto:criscanales@udec.cl)

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Ciencias de la Construcción Ordenamiento Territorial, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile. [k.prakash@utem.cl](mailto:k.prakash@utem.cl), [s.avudaiappan@utem.cl](mailto:s.avudaiappan@utem.cl)

### Resumen

En los últimos años, ha habido un aumento significativo en la producción mundial de cemento, lo que lo convierte en el tercer mayor contribuyente a las emisiones de dióxido de carbono. El uso de un nuevo aditivo con cementos binarios y ternarios minimiza las emisiones de CO<sub>2</sub>. En este estudio, se prueban el polvo de mármol (MP) y el metacaolín (MK) como cemento parcial y agregado fino. Como alternativa al cemento, este estudio utilizó polvo de mármol y metacaolín para hacer una variedad de mezclas de mortero autocompactante (SCM). La relación metacaolín a cemento es del 10% y los agregados finos se reemplazan con un 5% a 25% de polvo de mármol en comparación con el hormigón de la muestra de control. Se evalúa la trabajabilidad y la densidad del hormigón recién preparado para determinar su calidad. Examinamos las propiedades mecánicas de la muestra y realizamos pruebas mecánicas, así como pruebas de absorción de agua y sorptividad de acuerdo con las normas ASTM para evaluar las propiedades del hormigón. Al sustituir el cemento por metacaolín y polvo de mármol en las mezclas de hormigón, se descubrió que la densidad fresca aumentó mientras que la trabajabilidad disminuyó. Las propiedades mecánicas del hormigón se mejoran sustituyendo el cemento y las partículas finas por polvo de mármol y metacaolín. La sustitución del cemento por metacaolín y de los áridos finos por polvo de mármol dio lugar a una disminución de la sorptividad y de la absorción de agua. Las cualidades mecánicas y de durabilidad se mejoraron en la mezcla ideal que se realizó sustituyendo el 10% del metacaolín en lugar del cemento y el 20% del polvo de mármol por áridos finos. Estos resultados sugieren que el uso de MK y MP junto con el cemento como sustituto parcial podría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la industria del cemento.

**Palabras clave:** Polvo de mármol, metacaolín, hormigón, resistencia mecánica.

### Abstract

In recent years, there has been a significant surge in global cement output making it the third largest contributor to carbon dioxide emissions. Using a new additive with binary and ternary cements minimises CO<sub>2</sub> emissions. In this study marble powder (MP) and metakaolin (MK) are tested as partial cement and fine aggregate. As an alternative to cement this study used marble powder and metakaolin to make a variety of self-compacting mortar (SCM) mixtures. Metakaolin to cement ratio is 10% and fine aggregates are replaced with 5% to 25% marble dust compared to the control specimen concrete. Workability and density of the freshly prepared concrete is assessed to determine its quality. We examined the specimen's mechanical properties and conducted mechanical tests, as well as water absorption and sorptivity tests in accordance with ASTM standards to assess the concrete's properties. By substituting metakaolin and marble powder for cement in the concrete mixes it is found that the fresh density increased while the workability decreased. The mechanical properties of concrete are enhanced by substituting cement and fine particles with marble powder and metakaolin. Replacing cement with metakaolin and fine aggregates with marble powder resulted in a decrease in sorptivity and water absorption. The mechanical and durability qualities were improved in the ideal mixture that was made by replacing 10% of the metakaolin instead

of cement and 20% of the marble powder with fine aggregates. These results suggest that using MK and MP together with cement as a partial substitute could reduce CO<sub>2</sub> emissions generated by the cement industry.

**Keywords:** Marble Powder, Metakaolin, Concrete, Mechanical Strength.

## 1. Introducción

En la empresa de construcción, el hormigón autocompactante, también conocido como SCC, se utiliza con frecuencia debido a su propensión a fluir fácilmente debido a su propio peso, más allá del requisito de vibraciones externas. El hormigón autocompactante (SCC) ocupa eficazmente los estrechos huecos entre las barras de refuerzo y la cubierta de hormigón. Se necesita una cantidad suficiente de mortero para distribuir la humedad y transferir partículas de agregado para lograr esto. Se utilizan mayores cantidades de superplastificante (SP), aditivos modificadores de la viscosidad (VMA) y materiales en polvo en las mezclas de SCC para garantizar que la mezcla sea suficientemente cohesiva y estable. Esto aumenta la probabilidad de reducir las hemorragias, los asentamientos y la segregación. El SCC mejora la uniformidad del hormigón, mejorando en consecuencia la calidad de la superficie y evitando la formación de huecos [1–3]. El enfoque inicial de diseño de mezcla para la creación de hormigón autocompactante (SCC) fue sugerido por Okamura, Ozawa y Maekawa en 1995 [4–6]. Posteriormente, Ouchi et al. En 1988, se realizaron más mejoras a este método[7]. Se atribuye a la Universidad de Tokio el desarrollo de este enfoque, que a veces se conoce como la técnica racional o japonesa. Al incluir aditivos de minerales en el SCC, se mejoran la segregación y la trabajabilidad del hormigón. Varios estudios indican la utilización de aditivos de minerales en el SCC como un medio para acelerar la durabilidad, las propiedades mecánicas y la autocompatibilidad. Las cenizas volantes (FA), el humo de sílice (SF), el metacaolín (MK), el polvo de mármol residual, el polvo de piedra caliza, etc. son algunos de los aditivos minerales que se utilizan comúnmente en la producción de SCC. Además de mejorar el rendimiento del hormigón, los beneficios ambientales del MK lo convierten en un reemplazo parcial deseable del cemento, según los investigadores. Disminuye la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuye el consumo de cemento Portland regular [7-9]. Un aditivo mineral que entra en la categoría de N puzolana constituye el MK, que tiene un tamaño molecular que varía de 1,5 a 2,5  $\mu\text{m}$  [10]. Debido a su alta reactividad y composición de (50-55% SiO<sub>2</sub> y 40-45% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), reacciona con Ca(OH)<sub>2</sub> para formar gel CaH<sub>2</sub>O<sub>4</sub>Si (C-S-H), que mejora la estructura de los poros y, a su vez, aumenta la durabilidad y resistencia del hormigón[11,12]. El gel C-S-H tiene una mayor relación Ca:SI en MK en comparación con la escoria de alto horno y las cenizas

volantes, etc., debido a mayores cantidades de alúmina y sílice en MK [13-15]. El metacaolín existía antes de 1960, pero se hizo conocido por su aplicación como SCM o material puzolánico en hormigón después de 1980 [16, 17]. Durante casi 20 años, el metacaolín (MK) se ha considerado significativo para la producción de hormigón normalmente vibrado (NVC) [18-22]. Al utilizar MK, la estructura porosa del hormigón se ha reducido en gran medida y la cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> en la pasta de cemento se ha reducido. Esto ocurre como resultado del profundo efecto de la alta reactividad puzolánica de MK y el nivel de pureza en el proceso de hidratación del cemento. Cuando se combina con Ca(OH)<sub>2</sub>, MK genera más gel C-S-H que mejora la microestructura del hormigón, lo que a su vez aumenta las propiedades mecánicas y de durabilidad del material [23,24]. Investigaciones anteriores también han investigado los efectos de MK en las propiedades frescas, mecánicas y de durabilidad del SCC [25-28]. Muchas variedades de piedra, incluyendo granito, piedra caliza, pizarra, mármol y muchas más se utilizan en la industria de la construcción. La utilización de tecnologías modernas en el procesamiento de piedra, como la extracción, el aserrado y el corte, aumenta continuamente la tasa de utilización de piedras naturales. Cuando la piedra se corta en las formas requeridas utilizando una sierra, lo que da como resultado la producción de lodos de mármol y polvo de mármol de desecho. Al no ser biodegradables, los residuos de piedra así generados suponen una amenaza para la civilización humana y generan importantes dificultades medioambientales. La eliminación de desechos de piedra en arroyos y vías fluviales conduce a la contaminación del agua. Existe una amplia variedad de soluciones para la eliminación de los restos de piedra. Tiene múltiples usos potenciales, como relleno para áreas específicas como ingrediente en una amplia gama de compuestos de cemento. Con sus ventajas prácticas y ecológicas, la utilización en compuestos de cemento podría ser una excelente manera de deshacerse de los restos de piedra [29-32]. La producción de SCC puede hacer uso de algunos desechos de piedra, como baldosas, mármol o ladrillos, como material de relleno para llenar los espacios entre los granos de arena [33-36]. La mayor densidad de empaquetamiento de los desechos de piedra aumenta su resistencia, durabilidad, resistencia a la abrasión, coeficiente de penetración y microestructura de espesor, así como su resistencia a la compresión, tracción y fractura [36-39]. El impacto de los materiales de relleno en las propiedades del SCC ha sido objeto de varias investigaciones. Descubrimos que

la trabajabilidad mejora cuando se utilizan materiales de relleno [40-42]. La estructura cristalina se destruye y el agua químicamente ligada se expulsa por el calor de hidratación. La investigación ha demostrado que la finura del WMP puede mejorar la cohesión del mortero de hormigón. La adición de WMP a mezclas de hormigón que también contienen SF o MK hace que la mezcla sea más cohesiva. Debido a su capacidad de relleno, el WMP tiene un efecto beneficioso incluso a edades tempranas [43]. Es posible utilizar aditivos minerales como potenciadores de la viscosidad en el SCC de tipo polvo. Además, estos aditivos minerales mejoran la trabajabilidad del SCC [44-47]. Se ha descubierto que la inclusión de aditivos minerales reduce la proporción de SP en el SCC [48-50]. Varios estudios han explorado el uso de WMP en lugar de cemento, en hormigón y morteros como aditivo mineral, y en el estudio de la relación entre las propiedades frescas y endurecidas del SCC. Para crear hormigón autocompactante, los científicos han mezclado WMP con mortero de cemento. El WMP se molió en una variedad de proporciones con clínker de PC, que significa cemento Portland. Se descubrió que la resistencia del hormigón aumentó significativamente en comparación con una mezcla de control cuando se agregó un 5% de polvo de desechos de mármol y un 10% de diatomita en peso de cemento. Según el último estudio, el WMP puede mejorar las cualidades mecánicas y físicas del hormigón cuando se usa en lugar de cemento o arena [51]. En comparación con el reemplazo del cemento, descubrieron que reemplazar el WMP con agregado fino mejoró significativamente las cualidades mecánicas del hormigón. Las cenizas de alto horno, las cenizas volantes, el polvo de piedra y el humo de sílice son algunos de los subproductos industriales más típicos utilizados como materiales de relleno en el SCC. Es posible reducir el daño ambiental y ahorrar dinero al usar estos materiales de relleno. Investigaciones anteriores han realizado investigaciones exhaustivas sobre las características de resistencia y durabilidad del polvo de mármol como un posible reemplazo de arena o cemento. Sin embargo, sustituir la arena con polvo de mármol produjo resultados superiores como resultado de la característica de relleno del polvo de mármol. Sin embargo, cuando se reemplazó el cemento, no se lograron resultados significativos. Las propiedades puzolánicas del hormigón, incluido el polvo de mármol, aún no se han estudiado. Esto se debe a que el polvo de mármol contiene una cantidad relativamente pequeña de puzolana, que actúa como un ingrediente inerte y no participa activamente en el proceso de hidratación del hormigón. En este estudio, se descubrió que la adición de puzolana al polvo de mármol mejora las capacidades de cementación del hormigón. Para lograr este propósito, se puede implementar la inclusión de metacaolín como material cementante complementario. El metacaolín servirá como

microrellenos, lo que dará lugar a atributos de resistencia y durabilidad mejorados. Este estudio sugiere maximizar el uso del polvo de mármol reemplazando parcialmente la arena con un ingrediente cementante adicional.

## 2. Materiales y parámetros

La eliminación de desechos de piedra en arroyos y vías fluviales conduce a la contaminación del agua. Existe una amplia variedad de soluciones para la eliminación de los restos de piedra. Tiene múltiples usos potenciales, como relleno para áreas específicas como ingrediente en una amplia gama de compuestos de cemento. Con sus ventajas prácticas y ecológicas, la utilización en compuestos de cemento podría ser una excelente manera de deshacerse de los restos de piedra [29-32]. La producción de SCC puede hacer uso de algunos desechos de piedra, como baldosas, mármol o ladrillos, como material de relleno para llenar los espacios entre los granos de arena [33-36]. La mayor densidad de empaquetamiento de los desechos de piedra aumenta su resistencia, durabilidad, resistencia a la abrasión, coeficiente de penetración y microestructura de espesor, así como su resistencia a la compresión, tracción y fractura [36-39]. El impacto de los materiales de relleno en las propiedades del SCC ha sido objeto de varias investigaciones. Descubrimos que la trabajabilidad mejora cuando se utilizan materiales de relleno [40-42]. La estructura cristalina se destruye y el agua químicamente ligada se expulsa por el calor de hidratación. La investigación ha demostrado que la finura del WMP puede mejorar la cohesión del mortero de hormigón. La adición de WMP a mezclas de hormigón que también contienen SF o MK hace que la mezcla sea más cohesiva. Debido a su capacidad de relleno, el WMP tiene un efecto beneficioso incluso a edades tempranas [43]. Es posible utilizar aditivos minerales como potenciadores de la viscosidad en el SCC de tipo polvo. Además, estos aditivos minerales mejoran la trabajabilidad del SCC [44-47]. Se ha descubierto que la inclusión de aditivos minerales reduce la proporción de SP en el SCC [48-50]. Varios estudios han explorado el uso de WMP en lugar de cemento, en hormigón y morteros como aditivo mineral, y en el estudio de la relación entre las propiedades frescas y endurecidas del SCC. Para crear hormigón autocompactante, los científicos han mezclado WMP con mortero de cemento. El WMP se molió en una variedad de proporciones con clínker de PC, que significa cemento Portland. Se descubrió que la resistencia del hormigón aumentó significativamente en comparación con una mezcla de control cuando se agregó un 5% de polvo de desechos de mármol y un 10% de diatomita en peso de cemento. Según el último estudio, el WMP puede mejorar las cualidades mecánicas y físicas del hormigón cuando se usa en lugar de cemento o arena [51]. En comparación con el

reemplazo del cemento, descubrieron que reemplazar el WMP con agregado fino mejoró significativamente las cualidades mecánicas del hormigón. Las cenizas de alto horno, las cenizas volantes, el polvo de piedra y el humo de sílice son algunos de los subproductos industriales más típicos utilizados como materiales de relleno en el SCC. Es posible reducir el daño ambiental y ahorrar dinero al usar estos materiales de relleno.

En este estudio, se utilizó metacaolín como reemplazo del cemento a un nivel constante en cinco mezclas de hormigón diferentes, manteniendo una proporción del 10%. Se utilizó polvo de mármol como reemplazo del agregado fino en tres proporciones diferentes: 10%, 15% y 20%. Las mezclas de hormigón se etiquetaron como CS, MP05, MP10, MP15, MP20 y MP25. Aquí, CS representa la muestra de control; MP05 representa la mezcla de cemento que tiene 10% de metacaolín y 5% de polvo de mármol reemplazados con agregados finos. La Tabla 1 proporciona características químicas en cemento de grado 43, polvo de mármol, metacaolín y OPC de acuerdo con IS 8112: 2013. Los parámetros físicos del material se presentan en la Tabla 2. Los agregados finos naturales caen dentro de la zona II según los estándares IS 383 2016 y la distribución del tamaño de partícula de los agregados finos se determinó según IS 383 2016, asegurando que los agregados se adhirieran a estos estándares a través de un tamizado meticuloso. Se utilizó agua corriente normal tanto en la fabricación como en el curado del hormigón. Se emplearon varios porcentajes de polvo de mármol para reemplazar parcialmente los agregados finos en diferentes mezclas de hormigón. El polvo de mármol se obtuvo de un proveedor local en Chennai. En todas las mezclas de hormigón, el cemento se reemplaza parcialmente con metacaolín en un 10 por ciento. Para lograr la trabajabilidad deseada se utilizó un superplastificante a base de éter de policarboxilato, denominado Sika. En la Tabla 3 se muestran las proporciones de la mezcla y el porcentaje de reemplazos en el estudio.

Tabla 1. Propiedades químicas del cemento, metacaolín y polvo de mármol

Composición química	Cemento	Metacaolín	Polvo de mármol
SiO <sub>2</sub>	20.4	56	4.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.55	31	0.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56	6.3	0.21
CaO	64	2.4	56.1
MgO	1.75	0.12	0.1
K <sub>2</sub> O	0.54	0.6	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.25	0.23	0
LOI	2.23	2.43	38.8

Tabla 2. Propiedades del agregado fino y grueso

Properties	FA	CA
Densidad aparente (compactada) (g/cm <sup>3</sup> )	1.63	1.84
Densidad aparente (suelta)/g/cm <sup>3</sup>	1.52	1.79
Índice de elongación (%)	-	10.24
Módulo de finura (%)	2.53	6.76
Peso específico	2.58	2.76
Índice de descamación (%)	-	11.83
Absorción de agua (%)	0.99	0.51

Tabla 3. Proporciones de la mezcla del hormigón

Mix	CS	MP 5	MP1 0	MP1 5	MP2 0	MP2 5
Agua	165	165	165	165	165	165
Cemento	364	328	328	328	328	328
Metacaolín	0	36	36	36	36	36
Polvo de mármol	0	41	82	123	164	205
Agregado fino	820	779	738	697	656	615
Agregado grueso	112 6	112 6	1126	1126	1126	1126

### 3. Resultados experimentales

#### 3.1. Trabajabilidad

Como método de evaluación de la trabajabilidad de las mezclas de hormigón, se utilizó el cono de asentamiento para medir la consistencia de las mezclas cuando los agregados finos y el metacaolín se sustituyen parcialmente por polvo de mármol. Los valores de asentamiento con las diversas mezclas se compararon con la mezcla de control para determinar el impacto de los reemplazos en la consistencia del hormigón. La Figura 1 muestra una disminución del 37% en la trabajabilidad para la mezcla MP25 en comparación con la mezcla de control. Reducción en la trabajabilidad del 6%, 23%, 27% y 31% para las mezclas MP5 a MP20 en comparación con la mezcla de control. La disminución en la trabajabilidad se observa en el rango medio debido a tamaños de partículas más pequeños de polvo de mármol y metacaolín, que poseen un área superficial específica mejor que el cemento y los agregados finos. Esta mayor área superficial demanda más agua para lograr la trabajabilidad deseada en el hormigón. Se observó que las muestras incorporadas a la mezcla MP exhibieron un aumento en la densidad fresca en comparación con la muestra CS. Este aumento de la densidad húmeda se debe probablemente a la finura de las partículas de metacaolín y polvo de mármol, que contribuyen a una mezcla más densa. La incorporación de metacaolín y polvo de mármol afecta la trabajabilidad y la densidad del hormigón, ya que las partículas más finas necesitan

más agua para lograr consistencia y, al mismo tiempo, mejoran la densidad del hormigón fresco.

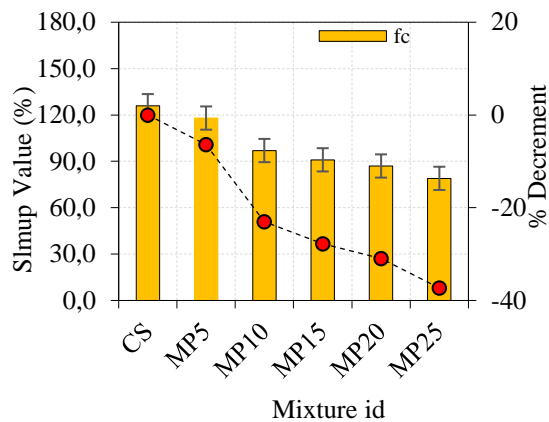


Figura 1. Valor de asentamiento del hormigón de polvo de mármol

### 3.2. Resistencia a la compresión

Las muestras de hormigón se probaron utilizando una máquina de prueba universal, siguiendo los procedimientos descritos en la norma india 516:1959. El resultado de la prueba se presenta en la Figura 2. Se observó que la mezcla MM20 exhibió la resistencia más alta, que es 38,32 % mayor que la muestra CS. La mezcla MM20 muestra un aumento de la resistencia del 32 % en comparación con la muestra CS. Este aumento de la resistencia se atribuye al efecto puzolana del metacaolín. La mayor proporción de polvo de mármol mejora la resistencia del hormigón debido a su efecto de relleno. El metacaolín en una concentración del 10 % y el polvo de mármol al 20 % mejoraron significativamente la resistencia del hormigón, fortaleciendo aún más su microestructura [23]. Los resultados se asemejan a los hallazgos de Ganesh, quien informó una mejora del 29 % en la resistencia a la compresión al reemplazar el 20 % del agregado de finos por polvo de mármol. Esta consistencia refuerza el impacto beneficioso del polvo de mármol y el metacaolín en la resistencia y durabilidad del hormigón.

### 3.3. Ensayo de resistencia a la tracción por rotura

El proceso de prueba de resistencia a la tracción dividida (STS) se determina según ASTM496-11. El equipo de prueba y las muestras se muestran en la Figura 3a, con valores en la Tabla 6. La STS se determinó después de 28 días, revelando aumentos de 3%, 9%, 17%, 26% y 27% para las mezclas MP5, MP10, MP15, MP20 y MP25 en comparación con la mezcla de control (CM). Después de 7 días, la resistencia del hormigón mejoró debido a la tasa de hidratación acelerada causada por la adición de metacaolín [4]. La resistencia a la tracción dividida mejoró aún más mediante el uso de polvo de mármol

[9], así como escoria de horno y arena de río. Además, la presencia de metacaolín contribuyó a una disminución de la densidad seca cuando se utilizaron agregados reciclados [29]. Los resultados se representan visualmente en la Figura 3.

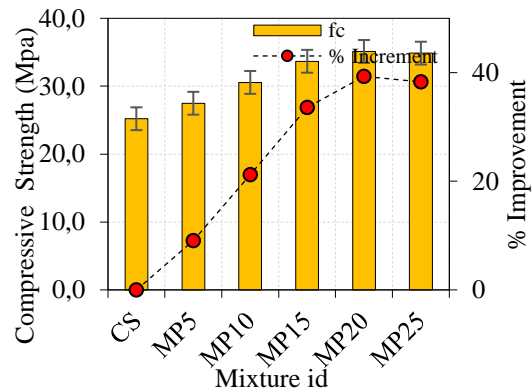


Figura 2. Resistencia a la compresión del hormigón de polvo de mármol

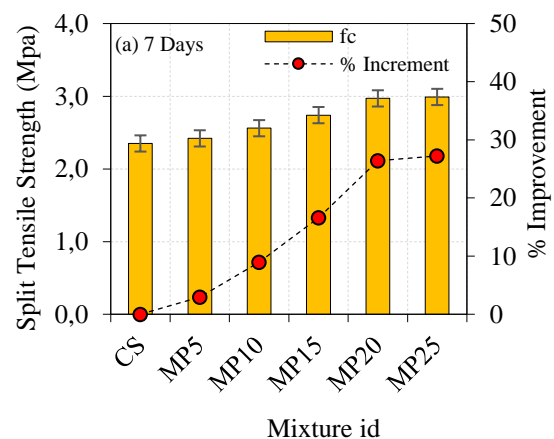


Figura 3. Resistencia a la tracción por rotura del hormigón en polvo de mármol

### 3.4. Resistencia a la flexión

Siguiendo los requisitos de la norma IS 516-1959, la viga prismática se sometió a una prueba de carga de dos puntos. Esta configuración de prueba se ilustra en la Figura 4. Los resultados indicaron aumentos en la resistencia a la flexión del 5 %, 10 %, 14 %, 19 % y 16 % para las mezclas MP5, MP10, MP15, MP20 y MP25, respectivamente, en comparación con la mezcla de control. Este aumento en la resistencia a la flexión se puede atribuir a la naturaleza fina del polvo de mármol. La resistencia a la flexión exhibió un aumento progresivo de hasta el 10 % a medida que aumentaba la proporción de mármol de desecho.

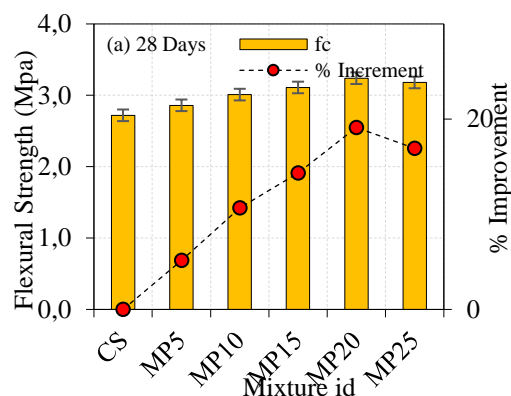


Figura 4. Resistencia a la tracción por rotura del hormigón en polvo de mármol

### 3.5. Absorción de agua

Las pruebas de absorción de agua se llevan a cabo de acuerdo con ASTM C642 [42] después del período de curado de 28 días de las muestras de hormigón. Se preparó una muestra de prueba de 100 mm x 100 mm según las especificaciones. Tabla 4. Los resultados muestran que la absorción de agua disminuyó menos a medida que se agregó polvo de mármol a las mezclas de hormigón. Similar a la mezcla de hormigón (CM), MM25 demostró una disminución significativa en la absorción de agua, esta disminución en la absorción de agua puede deberse a la acción puzolánica del metacaolín. La reducción podría deberse al refuerzo de poros que ocurre en las mezclas cuando se usan polvos de mármol, ya que son muy finos. Se encontró que el SCC causó una mayor permeabilidad y se descubrió el mismo resultado con diferentes mezclas de polvo de mármol residual y hormigón.

Tabla 4. Absorción de agua y peso del hormigón de polvo de mármol

Mix	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Absorción de agua
CS	4.53	4.31	4.97
MP5	4.61	4.41	4.43
MP10	4.76	4.59	3.63
MP15	4.84	4.68	3.36
MP20	4.97	4.88	2.24
MP25	5.21	5.19	2.13

### 3.6. Sortividad

Las pruebas de sorción se realizan según la norma ASTM C 1585-13, que estima la cantidad de agua que se absorbe en una mezcla de hormigón a través de la acción capilar. Esta prueba se lleva a cabo después de que la muestra de hormigón se haya curado durante 28 días. La figura 6 ilustra la reducción de la tasa de sorción del hormigón de polvo de mármol en

comparación con las muestras de CS. La disminución de la tasa de absorción de agua [5] aumenta la actividad puzolánica del metacaolín. La incorporación de polvo de mármol, una sustancia muy fina, contribuye a la reducción de la absorción de agua al minimizar la estructura de los poros de la mezcla. La incorporación de polvo de mármol residual en un 10 % a 25 % de metacaolín altera significativamente las arquitecturas de los poros del hormigón, mejorando su resistencia a la absorción de agua [29].

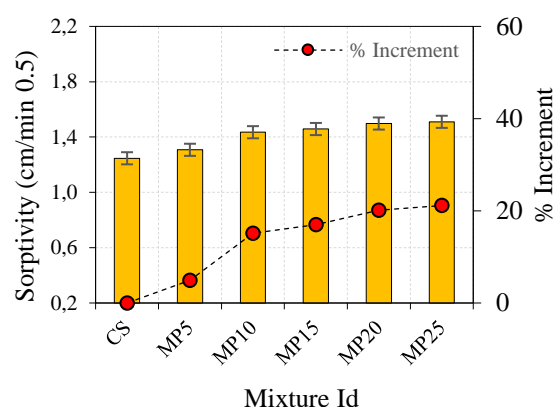


Figura 5. Sorción del hormigón en polvo de mármol

## 4. Conclusiones

Con base en los presentes estudios se formulan las siguientes observaciones y conclusiones:

1. La densidad húmeda aumentó cuando los agregados finos se reemplazaron con polvo de mármol y el cemento se reemplazó por metacaolín.
2. La trabajabilidad disminuyó debido a la mayor área superficial del metacaolín, lo que requirió una mayor cantidad de superplastificante.
3. La resistencia a la compresión aumentó cuando se reemplazó una mayor cantidad de agregados finos por polvo de mármol. En particular, una combinación de polvo de mármol al 20 % y metacaolín al 10 % resultó en un aumento significativo de la resistencia a la compresión. La resistencia a la tracción por rotura también mostró mejoras significativas en estas condiciones, y los resultados óptimos se lograron con un reemplazo del 20 % de polvo de mármol.
4. Se agregaron metacaolín y polvo de mármol al cemento para aumentar la resistencia a la flexión; la cantidad ideal de reemplazo para el agregado fino es del 20%.
5. El aumento de los reemplazos con metacaolín y polvo de mármol resultó en una disminución de la



absorción de agua y la sorción, lo que indica una mayor durabilidad de la mezcla de concreto.

## 5. Referencias

- [1] O.R. Khaleel, S.A. Al-Mishhadani, H.A. Razak, The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC), *Procedia Eng.* 14 (2011) 805–813.
- [2] M. Ouchi, S. Nakamura, T. Osterberg, S. Hallberg, M. Lwin, Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States, *Kochi Univ. Technol. Kochi, Japan.* (2003).
- [3] W. Zhu, J.C. Gibbs, Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1457–1462.
- [4] P. Domone, Mix design, self-compacting concrete: state-of-the-art report of RILEM technical committee 174-SCC, (2000).
- [5] H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Struct. Concr.* 1 (2000) 3–17. <https://doi.org/10.1680/stco.2000.1.1.3>.
- [6] T. Nawa, State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete, in: *Proc. Int. Work. Self-Compacting Concr.*, 1999: pp. 160–190.
- [7] M. Ouchi, M. Hibino, K. Ozawa, H. Okamura, A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete, *Struct. Eng. Constr. Tradit. Present Futur.* 2 (1998) 1307–1312.
- [8] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, K. Mermerdaş, Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin, *Mater. Struct.* 41 (2008) 937–949.
- [9] F. Cassagnabère, M. Mouret, G. Escadeillas, P. Broilliard, A. Bertrand, Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1109–1118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.032>.
- [10] B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cem. Concr. Compos.* 23 (2001) 441–454. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).
- [11] J.G. Jawahar, C. Sashidhar, I.V.R. Reddy, J.A. Peter, Micro and macrolevel properties of fly ash blended self compacting concrete, *Mater. Des.* 46 (2013) 696–705.
- [12] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 858–865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001>.
- [13] R. Lakhani, R. Kumar, P. Tomar, Utilization of Stone Waste in the Development of Value Added Products: A State of the Art Review., *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 7 (2014).
- [14] C.-S. Poon, L. Lam, S.C. Kou, Y.-L. Wong, R. Wong, Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1301–1306. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00581-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00581-6).
- [15] H. Zibara, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas, K. Stanish, Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 422–426.
- [16] R. Siddique, J. Klaus, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Appl. Clay Sci.* 43 (2009) 392–400.
- [17] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M.E. Kocabağ, V. Bayram, K. Mermerdaş, Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 160–170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092>.
- [18] J.-T.D. and Z. Li, Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete, *ACI Mater. J.* 99 (n.d.). <https://doi.org/10.14359/12222>.
- [19] Z. Li, Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 579–584. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01025-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01025-6).
- [20] X. Qian, Z. Li, The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1607–1611. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00612-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00612-3).
- [21] E. Badogiannis, S. Tsivilis, Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 128–133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.11.001>.
- [22] A.A. Ramezaniapour, H. Bahrami Jovein, Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 470–479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>.
- [23] E. Badogiannis, G. Kakali, S. Tsivilis, Metakaolin as supplementary cementitious material, *J. Therm. Anal. Calorim.* 81 (2005) 457–462. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0806-3>.
- [24] E. Badogiannis, V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, S. Tsivilis, Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1035–1041. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.014>.

- [25] A.A.A. Hassan, M. Lachemi, K.M.A. Hossain, Effect of metakaolin on the rheology of self-consolidating concrete, in: Des. Prod. Place. Self-Consolidating Concr. Proc. SCC2010, Montr. Canada, Sept. 26-29, 2010, Springer, 2010: pp. 103–112.
- [26] R. Madandoust, S.Y. Mousavi, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 752–760.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>.
- [27] I.P. Sfikas, A. Kanellopoulos, K.G. Trezos, M.F. Petrou, Durability of similar self-compacting concrete batches produced in two different EU laboratories, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 207–216.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.100>.
- [28] K. Behfarnia, O. Farshadfar, The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 64–71.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.035>.
- [29] M.S. Rekha, S.R. Sumathy, K.P. Arunachalam, S. Avudaiappan, M. Abbas, D.B. Fernande, Effects of alkaline concentration on workability and strength properties of ambient cured green geopolymer concrete, *Asian J. Civ. Eng.* (2024).  
<https://doi.org/10.1007/s42107-024-01087-9>.
- [30] P.A. Shirule, A. Rahman, R.D. Gupta, Partial replacement of cement with marble dust powder, *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.* 1 (2012) 2249.
- [31] M. Hacini, A.S. Benosman, N. Kazi Tani, M. Mouli, Y. Senhadji, A. Badache, N. Latroch, Utilization and assessment of recycled polyethylene terephthalate strapping bands as lightweight aggregates in Eco-efficient composite mortars, *Constr. Build. Mater.* 270 (2021) 121427.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121427>.
- [32] K.P. Arunachalam, S. Avudaiappan, M.V.G. Senepa, C.A.C. Cardenas, P.I.C. Moreno, T. Marziales, S.M. Ahmed, Exploring the Potential of Pumice Stone as Coarse Aggregate: An Experimental Approach to Reduce Concrete Self-Weight, in: E.I. Saavedra Flores, R. Astroza, R. Das (Eds.), *Recent Adv. Mech. Behav. Mater.*, Springer Nature Switzerland, Cham, 2024: pp. 305–314.
- [33] A. Patil, V. Jayale, K.P. Arunachalam, K. Ansari, S. Avudaiappan, D. Agrawal, A.M. Kuthe, Y.R. Alharbi, M. Amir Khan, Á. Roco-Videla, Performance Analysis of Self-Compacting Concrete with Use of Artificial Aggregate and Partial Replacement of Cement by Fly Ash, *Buildings* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/buildings14010143>.
- [34] B. Samatha, C.A.C. Cardenas, S.M. Ahmed, S. Avudaiappan, L.P.D. Badilla, T. Marziales, K.P. Arunachalam, Experimental Study of Nanosilica Based Concrete with Nano Silica Gel BT-Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials, in: E.I. Saavedra Flores, R. Astroza, R. Das (Eds.), *Springer Nature Switzerland, Cham*, 2024: pp. 315–330.
- [35] S.A. Kavitha, R.K. Priya, K.P. Arunachalam, S. Avudaiappan, E.I. Saavedra Flores, D. Blanco, Experimental investigation on strengthening of Zea mays root fibres for biodegradable composite materials using potassium permanganate treatment, *Sci. Rep.* 14 (2024) 12754. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58913-y>.
- [36] K.P. Arunachalam, S. Avudaiappan, M.V.G. Senepa, C.A.C. Cardenas, P.I.C. Moreno, T. Marziales, S.M. Ahmed, Exploring the Potential of Pumice Stone as Coarse Aggregate: An Experimental Approach to Reduce Concrete Self-Weight BT - Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials, in: E.I. Saavedra Flores, R. Astroza, R. Das (Eds.), *Springer Nature Switzerland, Cham*, 2024: pp. 305–314.
- [37] S. Avudaiappan, P.I. Cuello Moreno, L.F. Montoya R, M. Chávez-Delgado, K.P. Arunachalam, P. Guindos, T. Marziales B, P. Fernando Parra, E.I. Saavedra Flores, J.I. Flores Arrey, Experimental investigation on the physical, microstructural, and mechanical properties of hemp limecrete, *Sci. Rep.* 13 (2023) 22650. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48144-y>.
- [38] K.R.J. Sheeba, R.K. Priya, K.P. Arunachalam, S. Shobana, S. Avudaiappan, E.S. Flores, Examining the physico-chemical, structural and thermo-mechanical properties of naturally occurring *Acacia pennata* fibres treated with KMnO<sub>4</sub>, *Sci. Rep.* 13 (2023) 20643. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46989-x>.
- [39] A. Mohan, R.K. Priya, K.P. Arunachalam, S. Avudaiappan, N. Maureira-Carsalade, A. Roco-Videla, Investigating the Mechanical, Thermal, and Crystalline Properties of Raw and Potassium Hydroxide Treated *Butea Parviflora* Fibers for Green Polymer Composites, *Polymers (Basel)* 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/polym15173522>.
- [40] K.R.J. Sheeba, R.K. Priya, K.P. Arunachalam, S. Avudaiappan, E.S. Flores, P. Kozlov, Enhancing structural, thermal, and mechanical properties of *Acacia pennata* natural fibers through benzoyl chloride treatment for construction applications, *Case Stud. Constr. Mater.* 19 (2023) e02443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02443>.
- [41] P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, McGraw-Hill Publishing, 2006.
- [42] A.N. Patel, J. Pitroda, Stone waste: Effective replacement of cement for establishing green concrete, *Inter. J. Innov. Tech. Explor. Eng.* 2 (2013) 24–27.



- [43] S. Farhana, P. Bhumika, P. Jayesh, J. Pitroda, A study on utilization aspects of stone chips as an aggregate replacement in concrete in Indian context, *Int. J. Eng. Trends Technol.* 4 (2013) 3500–3505.
- [44] N. Almeida, F. Branco, J.R. Santos, Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures, *Build. Environ.* 42 (2007) 810–819. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.018>.
- [45] H. Hebhoub, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, E. Ghorbel, Use of waste marble aggregates in concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1167–1171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>.
- [46] H. Binici, H. Kaplan, S. Yilmaz, Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete, *Sci. Res. Essay.* 2 (2007) 372–379.
- [47] B. Demirel, The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete, *Int. J. Phys. Sci.* 5 (2010) 1372–1380.
- [48] R. Baboo, H.N. Khan, A. Kr, S.T. Rushad, S.K. Duggal, Influence of Marble powder/granules in Concrete mix, *Int. J. Civ. Struct. Eng.* 1 (2011) 827–834.
- [49] M. Gürü, S. Tekeli, E. Akin, Manufacturing of polymer matrix composite material using marble dust and fly ash, *Key Eng. Mater.* 336 (2007) 1353–1356.
- [50] S. Terzi, M. Karashin, Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete, *J. Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 616–620.
- [51] A.-M. Poppe, G. De Schutter, Cement hydration in the presence of high filler contents, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 2290–2299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.008>.
- [52] R.E. Grim, *Applied clay mineralogy*, Geol. Föreningen i Stock. Förhandlingar. 84 (1962) 533.
- [53] G. Ye, X. Liu, G. De Schutter, A.-M. Poppe, L. Taerwe, Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 94–102.
- [54] V. Corinaldesi, G. Moriconi, T.R. Naik, Characterization of a Marble Powder for its Use in Mortar and Concrete, in: *Sustain. Dev. Cem. Concr. Concr. Struct.* Toronto, Canada, American Concrete Institute, 2005: pp. 313–336.
- [55] A.A. Aliabdo, M. Abd Elmoaty, E.M. Auda, Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 28–41.