

# Experimental investigation of an ecological concrete developed with calcareous silica brick and basalt fibers for the reduction of CDW

Efraín Escobar Jorge<sup>1</sup>, Yaquelin Ketty Meza Gala<sup>2</sup>, Carlos Augusto Eyzaguirre Acosta, Ingeniero<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201920445@upc.edu.pe, u201924657@upc.edu.pe, pcciceyz@upc.edu.pe

*Abstract-- Lime silica bricks are one of the most predominant elements in construction and demolition waste, contributing significantly to the total solid waste produced worldwide. In Peru, the direct disposal of this waste in landfills prevails due to the lack of management alternatives and the lack of knowledge about sustainable options to use these materials. Simultaneously, the high CO<sub>2</sub> emissions produced by the cement industries contribute substantially to global greenhouse gas emissions, giving rise to climate changes, melting of the Arctic ice, alterations in the biodiversity of animals and plants, droughts and others. phenomena. Recently, much research has been conducted on the use of supplementary cementitious materials to decrease cement production. This study focuses on evaluating a sustainable concrete by incorporating crushed calcareous silica brick waste and basalt fibers. To do this, consultation was carried out in different bibliographic sources on the properties of the materials and the optimal addition percentages. Following this, the dosage was carried out for a concrete of 34.34 MPa (350 kg/cm<sup>2</sup>). Four concrete mixtures with percentages of 5% and 10% of crushed calcareous silica brick reinforced with 0.5% basalt fibers were investigated. In addition, properties such as compressive strength and diametral tensile strength were analyzed at the ages of 7, 14 and 28 days. The results, in terms of mechanical performance, show a slight improvement of 2.1% compared to conventional concrete. In addition, control tests, including temperature, unit weight, air content and concrete slump, support the viability of the proposed concrete. Regarding the CO<sub>2</sub> emissions reduction rates for sustainable concrete, a reduction of 56.33 kg of CO<sub>2</sub> was obtained for each cubic meter of concrete.*

*Keywords-- Lime silica brick waste, basalt fiber, compressive strength, sustainable concrete, CO<sub>2</sub> emissions*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Investigación experimental de un concreto ecológico desarrollado con ladrillo de sílice calcáreo y fibras de basalto para la reducción de RCD

Efraín Escobar Jorge<sup>1</sup>, Yaquelin Ketty Meza Gala<sup>2</sup>, Carlos Augusto Eyzaguirre Acosta, Ingeniero<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201920445@upc.edu.pe, u201924657@upc.edu.pe, pcciceyz@upc.edu.pe

**Resumen**– Los ladrillos de sílice calcáreos son uno de los elementos más predominantes en los residuos de construcción y demolición, contribuyendo significativamente al total de desechos sólidos producidos a nivel mundial. En el Perú, la eliminación directa de estos residuos en vertederos prevalece debido a la falta de alternativas de gestión y la falta de conocimiento sobre opciones sostenibles para aprovechar estos materiales. Simultáneamente, las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por las industrias cementeras contribuyen de manera sustancial a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, dando lugar a cambios climáticos, derretimiento del hielo Ártico, alteraciones en la biodiversidad de los animales y plantas, sequías y otros fenómenos. Recientemente, se han realizado muchas investigaciones sobre el uso de materiales cementicios suplementarios para disminuir la producción del cemento. Este estudio se centra en evaluar un concreto sostenible mediante la incorporación de residuos de ladrillo de sílice calcáreo triturado y fibras de basalto. Para ello, se realizó la consulta en diferentes fuentes bibliográficas sobre las propiedades de los materiales y los porcentajes óptimos de adición. Seguido a ello, se realizó la dosificación para un concreto de 34.34 MPa (350 kg/cm<sup>2</sup>). Se investigaron cuatro mezclas de concreto con porcentajes de 5% y 10% de ladrillo sílice calcáreo triturado reforzado con 0.5% de fibras de basalto. Además, se analizaron propiedades como la resistencia a compresión y tracción diametral a las edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados, en términos de rendimientos mecánicos, muestran una ligera mejora del 2.1% en comparación con el concreto convencional. Además, los ensayos de control, incluyendo temperatura, peso unitario, contenido de aire y asentamiento del concreto, respaldan la viabilidad del concreto propuesto. En cuanto a los índices de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para el concreto sostenible, se obtuvo una reducción 56.33 Kg de CO<sub>2</sub> por cada metro cúbico de concreto.

**Palabras claves**-- Residuos de ladrillo sílice calcáreo, fibra de basalto, resistencia a la compresión, concreto sostenible, emisiones de CO<sub>2</sub>

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento significativo de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel mundial representa un desafío significativo para la industria de la construcción. De acuerdo con Arenas [1], el sector de la construcción desempeña un papel fundamental al ser responsable de la generación del 50% de los residuos a nivel mundial y del 50% de los recursos naturales empleados. A nivel global se genera aproximadamente 6.5 mil millones de toneladas de RCD por cada año [2]. En el caso de Perú, se estima que anualmente se

generan 9 millones de metros cúbicos de RCD, equivalente a 5.7 millones de toneladas, de los cuales el 70% se arrojan a lagunas, a ríos y al mar [3]. Esto resalta la ausencia de un plan de gestión, manejo y disposición adecuada de los residuos de construcción. Según Bazán [4], existen 20 botaderos en situación crítica, entre ellos el botadero Chaperito, ubicado en el margen izquierdo del Río Chillón, y el botadero el Milagro, ubicado en el departamento de Trujillo. En este último se acumula diariamente 720 toneladas/día de residuos sólidos sin ningún tipo de tratamiento o control. Además, la investigación sobre la caracterización de los residuos de construcción revela que entre los materiales más predominantes en la generación de residuos en el edificio Clement y en el Terminal Muelle Norte del Callao se destacan los escombros con un 88% y 97% respectivamente [4]. Estos escombros estaban compuestos principalmente por residuos de demolición, concreto, ladrillos y losetas.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es otro problema que enfrenta la humanidad en los últimos años. El efecto invernadero es un proceso que evita el frío extremo en la Tierra; sin embargo, cuando la liberación de los gases contaminantes supera el equilibrio se genera un aumento de temperatura en el planeta [5]. La liberación excesiva de los GEI genera cambios climáticos, derretimiento del hielo Ártico, cambios en la biodiversidad de los animales y plantas, sequías y otros [6]. El gas de mayor cantidad presente es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Dicho gas constituye aproximadamente el 76% de los GEI [7]. La utilización de combustibles fósiles, fábricas de cemento, centrales eléctricas y otras industrias contribuyen a la acumulación del CO<sub>2</sub> en la atmósfera. En particular las plantas cementeras son la segunda industria de mayor contribución de CO<sub>2</sub> que representa aproximadamente entre el 5% y 8% de las emisiones globales de los GEI y puede incrementarse a un 27% para el año 2050 [8]. En la actualidad, el concreto ocupa el segundo lugar entre los compuestos más ampliamente empleados en todo el mundo, siendo superado únicamente por el agua. [9]. Se produce aproximadamente 10 mil millones de toneladas métricas de concreto por año, en la cual la cantidad de cemento representa entre el 18% y el 30% [10]. Ello, debido a la disponibilidad de las materias primas y su durabilidad que es la principal propiedad que determina la vida útil de una estructura. La desventaja radica en que por cada tonelada de cemento producido se emite una tonelada de CO<sub>2</sub> al medio ambiente [11]. Entonces, la huella de carbono del concreto depende del cemento en un aproximado del 88% [12]. Por tanto, es fundamental reducir la cantidad de cemento en el concreto para disminuir su huella de carbono. Uno de los métodos más confiables y

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

documentados es reemplazar parcialmente el cemento por un material cementoso suplementario adecuado.

Los investigadores afirman que la sustitución parcial del cemento con materiales de altos contenidos silicio y calcio es idónea, ya que potencia la reacción puzolánica y se genera silicato de calcio adicional (C-S-H) [13]. Raju *et al.* [14] notaron que el vidrio contenía 61.88% de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en su composición química por lo que estudiaron la influencia del polvo de vidrio residual. Los ensayos le permitieron verificar que el porcentaje de adición óptima es 5%, ya que dicha muestra mejoró la resistencia a compresión en 28% a los 28 días. Los autores Likes *et al.* [15], evaluaron el comportamiento del polvo de concreto reciclado (RCP) y polvo de ladrillo reciclado (RBP), materiales ricos en sílice y aluminio, como suplemento del cemento. En sus resultados argumentan que el concreto óptimo es el que contiene 20% de cemento con RBP y RCP. Asimismo, es importante definir el tamaño de las partículas del material suplementario del cemento. Li *et al.* [16] en su investigación mencionan que la resistencia compresión que contenía polvo de ladrillo reciclado de 6  $\mu\text{m}$  presentó un 31.90% mayor que la del mortero de 42  $\mu\text{m}$ . También, es importante tomar en cuenta el estudio de Ahmad *et al.* [17] que sustituye parcialmente de cemento por polvo de piedra triturada, con 62.48% de dióxido de sílice en su composición, genera un incremento de resistencia a flexión y compresión en 14.42%. Otro material de alto contenido de sílice es el feldespato. Según Yahyaee *et al.* [18], este material contiene aproximadamente el 66.54% de  $\text{SiO}_2$ . El autor descubrió que la mezcla con un 10% de feldespato y un 30% de escoria de alto horno, con una relación a/c de 0.35, tuvo resultados positivos respecto con las demás mezclas. En síntesis, los materiales con alto contenido de sílice mejoran el comportamiento físico-mecánico del concreto. La tasa de reemplazo idónea varía entre, 5% a 15% y el concreto será más ventajoso si el tamaño de la partícula del material es inferior a 45 $\mu\text{m}$ .

Adicionalmente, el uso de fibras en el concreto es cada vez más usado en el campo de la Ingeniería Civil, un ejemplo de ello es la fibra de basalto (FB). La FB se produce a partir de rocas basálticas y se caracteriza por un proceso de fabricación sostenible con una baja emisión de  $\text{CO}_2$  [19]. Investigaciones previas han demostrado que las FB exhiben notables propiedades, como una alta resistencia a la tracción, mayor durabilidad, buena resistencia a la corrosión y bajo costo de fabricación. En particular, un estudio llevado a cabo por Punurai *et al.* [20] revela que el concreto reforzado con FB incide en el tiempo de fraguado. A su vez, indican que las FB pueden afectar la trabajabilidad del concreto, ya que estas fibras absorben más agua en comparación con los agregados. Finalmente, Li *et al.* [21] identificaron efectos significativos de estas fibras en la cohesión y adhesión del material.

Los ladrillos sílice calcáreos (LSC) son uno de los principales materiales que componen los RCD. Sin embargo, no existen investigaciones que empleen este material como material suplementario del cemento. Asimismo, se desconoce la reacción o vínculo con fibras de basalto en el concreto. El LSC contiene aproximadamente más del 75% de dióxido de sílice en su composición, la cual puede beneficiar al concreto de manera considerable. Por lo tanto, la presente investigación tiene como

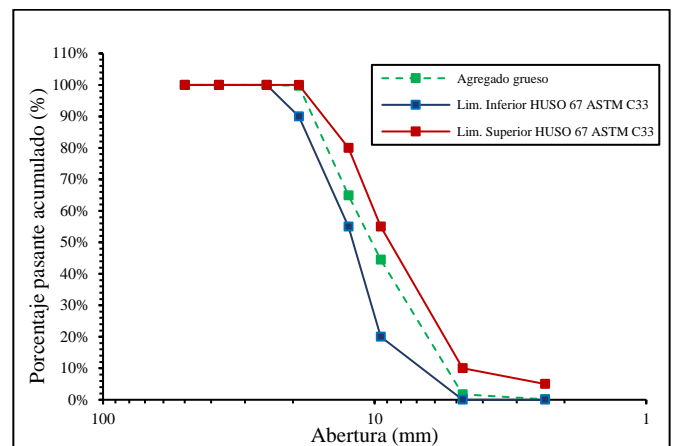
objetivo evaluar el desempeño del concreto al incorporar LSC en 0%, 5% y 10% y FB en 0.5% en proporción constante del peso de cemento. Se realizó ensayos en estado fresco como, temperatura, peso unitario, contenido de aire y revenimiento del concreto. Además, se llevó a cabo la evaluación de la resistencia a compresión y tracción diametral a los 7, 14 y 28 días en probetas de 4x8 pulgadas.

El aporte del presente artículo de investigación es la evaluación de la viabilidad y el potencial del ladrillo sílice calcáreo triturado reciclado como material suplementario en la elaboración del concreto reforzado con FB. Esta investigación presenta un enfoque particular en su aplicación en elementos estructurales verticales, por el cual se evaluó principalmente la resistencia a la compresión y tracción diametral. Esta nueva propuesta busca contribuir a la gestión sostenible de los residuos de construcción y demolición. Asimismo, reducir la huella de carbono asociada a la producción a gran escala del cemento Portland. El uso del LSC y las FB puede tener un impacto significativo en la eficiencia, sostenibilidad y economía en la ingeniería civil y construcción.

## II. MATERIALES

**Cemento tipo I:** Se empleó cemento Portland Tipo I, el cual cumple con las especificaciones de la Norma Técnica Americana ASTM C-150. Presentó como peso específico 3130  $\text{kg/m}^3$  y 7% de contenido de aire.

**Agregado grueso:** Este material tenía TMN 1/2" y HUSO 67, contenido de humedad 0.40% y peso específico de 2672  $\text{kg/m}^3$  y 0.99% de absorción. En la Fig. 1 se muestra en análisis de granulométrica del agregado grueso.



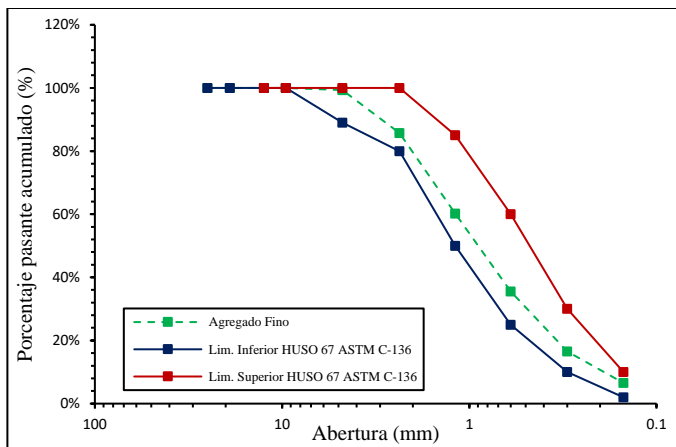


Fig. 2 Curva granulométrica del agregado fino.

Ladrillo de sílice calcáreo triturado reciclado: El LSC fue obtenido de ladrillos reciclados de desmontes de residuos de construcción y demolición. Este fue triturado manualmente y molido hasta obtener partículas finas pasantes la malla N°200 empleando un molino de bolas planetario. Cabe mencionar que, el molino de bolas empleado es un tipo de equipo de ahorro de energía y consume una cantidad mínima de energía eléctrica durante su funcionamiento.



Fig. 3 Ladrillo de sílice calcáreo triturado (LSC).

Fibras de basalto: Fueron obtenidas de cintas térmicas reciclables. El tamaño de cada segmento fue aproximadamente 6 mm con una variación de  $\pm 2$  mm. Es importante señalar que, este material abunda en los desechos y vertedero debido a que es un accesorio esencial que utilizan gran parte de los vehículos y motos.



Fig. 4 Fibras de basalto.

Agua: Se empleó agua potable para la elaboración y curado del concreto.

Plastificante: Se empleó un plastificante de alta calidad de la marca SikaCem para alcanzar la trabajabilidad deseada. Este aditivo está basado en lignosulfonatos y polímeros orgánicos, el cual cumple con los requisitos del plastificante tipo A y tipo D según la ASTM C494. En la presente investigación, el aditivo plastificante fue utilizado según su ficha técnica en un porcentaje de 1.5% del peso del cemento.

## II. HERRAMIENTAS Y EQUIPOS

El desarrollo de la parte experimental de la investigación ha requerido la utilización de diversos equipos y herramientas que facilitaron la ejecución de los ensayos y el análisis de las muestras empleadas.

Primero, en la etapa de caracterización de los materiales se utilizó balanzas, estufa, horno, molino de bolas, juego de tamices normalizados para el análisis del agregado grueso las cuales son, 1" hasta el tamiz N°100. Asimismo, para el agregado fino fue necesario lo tamices de 3/8" hasta el N°200.

Segundo, en la determinación de los ensayos en estado fresco del concreto se empleó, termómetro blindado, cono de Abrams, varilla compactadora, plancha metálica, Olla Washington, flexómetro y moldes de concreto de 4x8 pulgadas.

Tercero, para los ensayos de concreto en estado endurecido se utilizó vernier calibrado y una máquina de compresión y tracción diametral modelo FORNEY DR 2001.

Finalmente, en la etapa del análisis de los resultados obtenidos en los ensayos se empleó hojas de cálculo para manipular, organizar y representar gráficos de análisis.

## IV. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se desarrolló a un nivel teórico experimental, debido a que se consultó diferentes fuentes bibliográficas para encontrar la mejor solución al problema planteado. Asimismo, se hizo uso del laboratorio de Tecnología de Concreto para realizar los ensayos de caracterización de los materiales, la elaboración del concreto y los ensayos en estado fresco y endurecido. Por lo tanto, esta investigación pasó por diferentes fases, las cuales se detallan a continuación:

### Fase I: Búsqueda de Información y Análisis Teórico de los Materiales

El agregado fino y grueso fue caracterizado conforme a la Norma ASTM C-33. El ladrillo sílice calcáreo triturado utilizado fue tamizado por la malla N° 200, es decir partículas menores de 75  $\mu$ m. Según las investigaciones realizadas dicho material presenta alto contenido de sílice y contribuye a la mejora de las características del concreto hasta un máximo de 10% del peso del cemento. Por otro lado, la fibra de basalto empleada fue en 0.5% del peso del cemento y cortada manualmente con una longitud promedio de 6mm.

Asimismo, es importante analizar la composición química de los materiales. La tabla 1 muestra un cuadro comparativo de la composición química entre el cemento portland tipo I, el LSC

y la FB, la cual permite inferir que, tanto el LSC como la FB pueden contribuir a la optimización de las propiedades del concreto. Se observa que el LSC y la FB superan en cantidad de dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) al cemento portland ordinario; sin embargo, presentan menor cantidad de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ).

TABLA I  
RANGO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CEMENTO, LADRILLO SÍLICE CALCÁREO TRITURADO Y FIBRA DE BASALTO

Composición química (%)	Cemento Portland	Ladrillo sílice calcáreo	Fibra de basalto
$\text{SiO}_2$	18.62 – 20.57	89.76 – 92.01	42 - 58
$\text{CaO}$	61.24 – 63.14	1.88 – 2.57	5 – 12
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.4 – 4.72	3.83 – 4.97	11 - 18
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.98 – 3.17	1.81 – 2.21	4 - 12

Nota. Composición química del cemento portland fue obtenida de Hakeem et al. [22], Hemstad et al. [23] y Ruviano et al. [24]; del ladrillo sílice usado Zhang et al. [25]; y fibra de basalto Adesina [26] y Li et al. [27].

### Fase II: Elaboración de la Mezcla de Concreto

Los artículos revisados señalan que la dosificación mediante el método ACI 211.1 presentó mayor similitud respecto a la resistencia objetivo o planificada, la cual se utilizó en la presente investigación. En este diseño se utilizó los resultados de ensayos de los agregados finos y gruesos. En la tabla N°2 se muestra la dosificación de la mezcla concreto patrón y propuestos. Posteriormente, se preparó las muestras de concreto de acuerdo con la dosificación indicada, tal como se muestra en la figura 5.

TABLA II  
DOSIFICACIÓN DE MATERIALES SEGÚN LA METODOLOGÍA ACI 211.1

ID de mezclas	Agua ( $\text{kg/m}^3$ )	Cemento ( $\text{kg/m}^3$ )	Agregado fino ( $\text{kg/m}^3$ )	Agregado grueso ( $\text{kg/m}^3$ )	Aditivo plastificante (%)	Ladrillo sílice calcáreo triturado ( $\text{kg/m}^3$ )	Fibra de basalto ( $\text{kg/m}^3$ )
0%LSC 0.0%FB	231.26	563.29	689.51	843.06	1.50	0.00	0.00
0%LSC 0.5%FB	231.26	563.29	689.51	843.06	1.50	0.00	2.82
5%LSC 0.5%FB	231.26	535.13	689.51	843.06	1.50	28.16	2.82
10%LSC 0.5%FB	231.26	506.96	689.51	843.06	1.50	56.33	2.82



Fig. 5 Preparación de la mezcla de concreto.

### Fase III: Ensayos del Concreto

#### a) Ensayos en estado fresco

##### Temperatura

La determinación de la temperatura fue con base a la norma ASTM C-1064. El control de la temperatura se realizó en el

22<sup>nd</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0. Hybrid Event, San Jose – COSTA RICA, July 17 - 19, 2024.

mismo instante que se obtuvo la mezcla de concreto con la finalidad de evaluar que el concreto no presente temperaturas altas que puedan ocasionar agrietamiento térmico.

#### Revenimiento o slump

La determinación de la consistencia del concreto fresco fue mediante el cono de Abrams según lo establecido en la norma ASTM C-143. Este ensayo se llevó a cabo en el mismo momento en que el concreto finalizó su proceso de mezclado. El propósito de este ensayo es evaluar la trabajabilidad, calidad y durabilidad del concreto en su estado fresco. En la figura 6 se muestra la medición del slump del concreto.



Fig. 6 Ensayo de revenimiento de concreto fresco.

#### Peso unitario

Se calculó el peso unitario del concreto en su estado fresco siguiendo las pautas de la norma ASTM C-138 / NTP 339.049, con el objetivo de determinar su densidad. Durante este ensayo, se llenó el molde metálico en tres capas, realizando 25 varillados y 15 golpes con el mazo de goma en cada capa. Luego, la muestra fue pesada en una balanza y registrada para estimar el peso unitario.

#### Contenido de aire

El contenido de aire en el concreto se determinó mediante el método de presión, conforme a las especificaciones de la norma ASTM C-231 / NTP 339.083. Para este propósito, se utilizó la muestra obtenida en la medición del peso unitario, la cual fue posteriormente sellada y ajustada con la tapa de la olla de Washington. Finalmente, se registró el porcentaje de contenido de aire.

#### b) Ensayos en estado endurecido

##### Resistencia a la compresión

Este ensayo fue realizado mediante la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Un total de 12 probetas cilíndricas de dimensiones 4x8 pulgadas fueron ensayadas para cada diseño de mezcla. Los ensayos se realizaron a edades de 7, 14 y 28 días, con tres probetas destinadas a cada período de tiempo.



Fig. 7 Ensayo de resistencia a compresión de concreto

### Ensayo a la tracción por compresión diametral

Este ensayo se llevó a cabo conforme a la norma ASTM C496 / NTP 339.084. Un total de 12 probetas cilíndricas con dimensiones de 4x8 pulgadas fueron sometidas a ensayo para cada diseño de mezcla. Las pruebas se realizaron a las edades de 7, 14 y 28 días, con tres probetas asignadas a cada período de tiempo.

## V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### a) Temperatura

De acuerdo con las normativas peruanas NTP 339.184 y ASTM C94, se establece que la temperatura del concreto en estado fresco no debe exceder los 32 °C (90 °F) para evitar problemas como la pérdida de asentamiento o la incorporación de aire. Los resultados de las temperaturas de las muestras de los diferentes diseños de mezcla se presentan en la Fig. 8. Se observa que las temperaturas registradas de 24.6 °C, 24.9 °C, 25.8 °C y 25.9 °C para todos los diseños, no superan la temperatura máxima permitida. Estos valores exhiben una variación máxima del 5%, indicando que la sustitución parcial de cemento con LSC aumenta la temperatura a medida que aumenta el reemplazo, evidenciando así un incremento en el calor de hidratación del concreto.

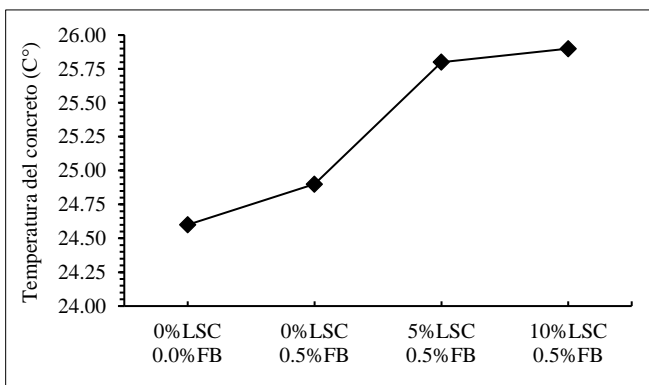


Fig. 8 Resultados de la temperatura del concreto.

### b) Revenimiento o slump

Los resultados del ensayo de asentamiento de los diseños de mezclas propuestos se presentan en la Fig. 9, donde se

observa que los valores de slump obtenidos, en el rango de 15 a 26 cm, se acercan al slump de diseño de 8" (20 cm). Sin embargo, se evidencia que la inclusión de LSC afecta la trabajabilidad del concreto, ya que los resultados indican una disminución del slump a medida que aumenta el reemplazo, con una variación máxima del 27% en la combinación 10%LSC 0.5%FB. Este comportamiento está estrechamente vinculado con el alto porcentaje de absorción de las fibras de basalto y el incremento en la porosidad del concreto, considerando que los LSC es más poroso que el cemento.

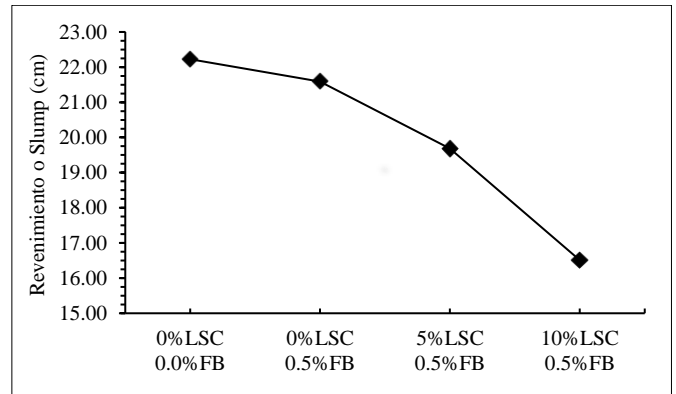


Fig. 9 Resultados del ensayo de revenimiento o slump.

### c) Contenido de aire

Los valores de contenido de aire obtenidos, que varían entre 2.20%, 2.10%, 2.00%, y 1.80% según se muestra en la Fig. 10, están cercanos al valor de diseño establecido por el método ACI 211.1, que especifica un 2% de contenido de aire para el concreto diseñado. Los resultados revelan una relación directa entre el contenido de aire y el asentamiento, ya que un aumento en la cantidad de aire se refleja en una mayor trabajabilidad. La combinación que presentó el menor contenido de aire fue 10%LSC 0.5%FB. Esto sugiere una correlación directa con la resistencia a la compresión, ya que un mayor contenido de aire tiene un impacto negativo en la resistencia a la compresión.

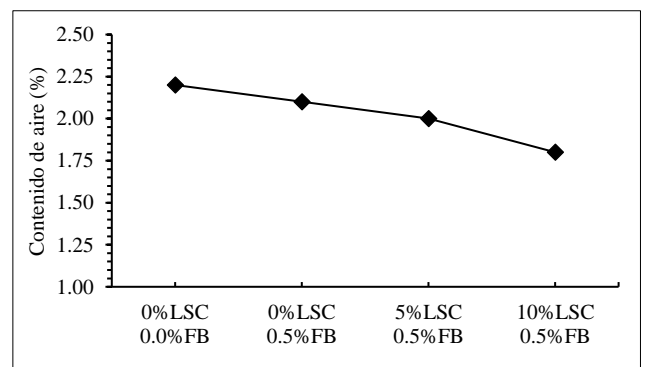


Fig. 10 Resultados del ensayo de contenido de aire.

### d) Resistencia a compresión

Las resistencias a compresión incorporando LSC y FB se muestra en figura 11. La resistencia del concreto patrón alcanzó a 42.54 MPa, 47.75 MPa y 50.23 MPa a los 7, 14 y 28 días respectivamente. La mezcla que contiene únicamente 0.5% de

## VI. VALIDACIÓN Y CONCLUSIONES

### a) Validación

Las investigaciones señalan que la resistencia a la compresión promedio del concreto, al incorporar fibras de basalto, varía en función de la longitud y tamaño de la fibra adicionada. En particular, las fibras de basalto cortas de 6 mm incorporados en 0.5 % del peso del cemento muestran una resistencia a la compresión que oscila entre 43.3 MPa a 83.6 MPa [28], [29], [30], [31]. En la presente investigación se logra una resistencia a compresión de 54.92 MPa a los 28 días, la cual se encuentra dentro del rango alcanzado por dichos investigadores.

En relación con la resistencia a tracción diametral, los estudios realizados por Algin *et al.* [28], Rousan *et al.* [29], Sun *et al.* [30], Wang *et al.* [31] indicaron que la FB de 6 mm posibilita alcanzar valores de resistencia a tracción comprendidos entre 4.84 MPa y 12.65 MPa. Las resistencias a tracción diametral obtenidas en el presente ensayo varían entre 9.76 MPa y 10.26 MPa, ubicándose dentro del rango identificado en las investigaciones en mención. Cabe mencionar que, la incorporación de LSC, un material que los autores Algin *et al.* [28], Rousan *et al.* [29], Sun *et al.* [30], Wang *et al.* [31] no consideraron en su investigación, también influyó en la variación de la resistencia a compresión y tracción del concreto propuesto.

Kannan *et al.* [32] en su investigación de reemplazo parcial del cemento con RCD, en especial, el uso de materiales cerámicos, obtuvieron una reducción del 15% de la resistencia a compresión al usar 10% de reemplazo del cemento. A diferencia de los resultados en esta investigación, ya que, debido al uso de las fibras de basalto, se obtuvo una reducción del 5% del concreto con 10% de LSC con respecto al concreto patrón. Además, las resistencias resultantes concuerdan con los resultados obtenidos por dichos autores, ya que la resistencia a la compresión disminuye a mayor sustitución del cemento.

Da Silva y Oliveira [33] en su investigación sobre el efecto sinérgico del RCD y ceniza volante en las propiedades mecánicas del concreto encontraron que estos materiales reducen la resistencia a compresión a edades tempranas y pueden aumentar a mayor tiempo. Con el uso del 25% de agregados de RCD encontraron que la resistencia disminuyó en 4% a los 28 días con respecto al concreto patrón. Mientras que, en la presente investigación se encontró una mejora del 2.1% como reemplazo del cemento Portland. Ello se atribuye al alto contenido de sílice del LSC y a las propiedades mecánicas de las FB.

De acuerdo con la investigación realizada por Shi *et al.* [34], se observó una reducción en el asentamiento de aproximadamente 12 mm en una mezcla de concreto que contenía 0.1% de FB. Contrariamente a los hallazgos de este estudio, ya que se obtuvo una disminución de 6 mm en el concreto que incorporaba 0.5% de fibras de basalto. Esta diferencia se atribuye principalmente al uso de plastificante en una dosificación del 1.5% respecto al peso del cemento en la mezcla del concreto.

fibras de basalto alcanzó el valor máximo, superando en un 9.34% al concreto patrón a los 28 días. Asimismo, es notorio que la evolución de la resistencia del concreto con LSC y FB se desarrolla de manera lenta a los 7, 14 y 28 días. Asimismo, la mezcla 5%LSC y 0.5%FB supera en 2.1% aproximadamente a la resistencia alcanzada por el concreto patrón a los 28 días.

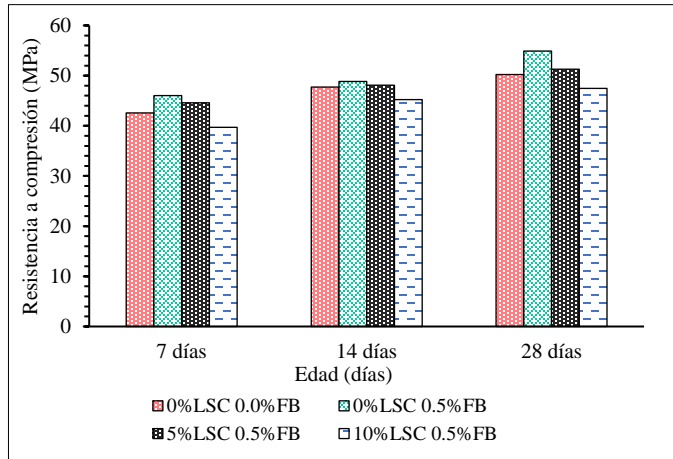


Fig. 11 Resistencia a la compresión de mezclas de concreto a los 7, 14 y 28 días.

### c) Resistencia a tracción diametral

El efecto de la FB y combinados con LSC a los 7, 14 y 28 días se muestra en la figura 12. En la resistencia a tracción el efecto de la fibra de basalto es positivo. Se observa un incremento de 6.65% de resistencia a tracción respecto al patrón a los 28 días. A diferencia a la resistencia a la compresión, la mezcla de 10% de LSC y 0.5% de fibra de basalto presenta un mejor comportamiento en resistencia a tracción diametral respecto al concreto patrón. La resistencia a tracción diametral del concreto con un 10% de LSC y un 0.5% de FB supera en 0.14 MPa, el cual representa una mejora del 1.4% en la resistencia a tracción del concreto patrón a los 28 días.

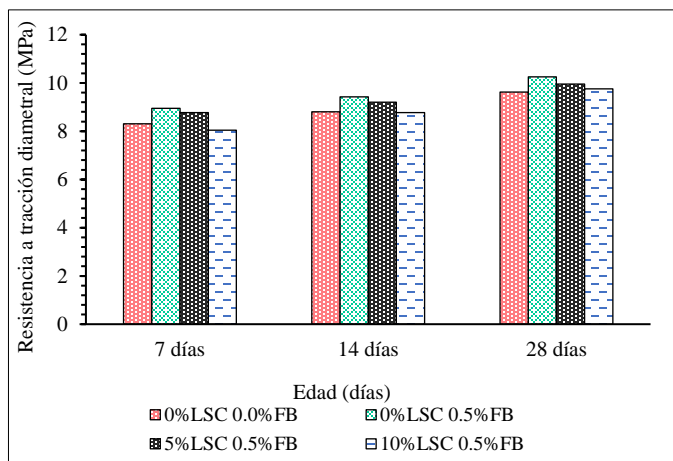


Fig. 12 Resistencia a tracción diametral de mezclas de concreto a los 7, 14 y 28 días.

## b) Conclusión

Los valores de asentamiento inicial encontrados se muestran que la mezcla de control alcanzó un valor de slump de 22 cm. A medida que aumentó el nivel de reemplazo de LSC, el valor de asentamiento inicial disminuyó en 2%; 11% y 25% para los porcentajes de reemplazo de 0.5%FB; 5%LSC 0.5%FB y 10%LSC 0.5%FB, respectivamente. Esto podría atribuirse a la elevada superficie específica y porcentaje de absorción y saturación del LSC en comparación con la del cemento, que es aproximadamente más de 1,4 veces mayor que la del cemento.

Los ensayos de resistencia a compresión y a tracción permitieron determinar que el porcentaje de reemplazo óptimo es la mezcla que contiene 5% de LSC y 0.5% de FB. Dicha mezcla supera al concreto patrón en resistencia a compresión y a tracción en 1.06 MPa y en 0.33 MPa, los cuales representan el 2.1% y 3.4%, respectivamente a los 28 días. Asimismo, la incorporación de los LSC en el concreto tiene un impacto positivo, ya que con la adición del 5% de LSC, la resistencia a compresión y a tracción no presenta una reducción considerable.

Las FB exhiben una influencia beneficiosa tanto en la resistencia a la compresión como en la resistencia a la tracción diametral. Este fenómeno se atribuye a la capacidad de este material para facilitar la formación de un empaquetamiento denso, dicha mejora se evidencia principalmente cuando se emplea la dosis óptima y el tamaño adecuado de la FB.

En cuanto al consumo del cemento, el concreto que presentó mayor reducción de cemento fue la mezcla de 10% de LSC y 0.5% de FB. Dicha mezcla reemplaza 56.33 kg de cemento en un metro cúbico, la cual representa una disminución de 35.26 kg de CO<sub>2</sub> generado por cada metro cúbico de concreto producido y se obtiene un ahorro de 7.74% aproximadamente del costo de un metro cúbico de concreto de 34.34 MPa (350 kg/cm<sup>2</sup>) empleando los LSC. También, la propuesta 5%LSC 0.5%FB es viable económicamente, ya que los materiales e insumos a utilizar son accesibles y la cantidad de cemento es reducido en un 5% de su peso. Con 5% de LSC el costo de un metro cúbico del concreto se reduce en un 3.96 % respecto a un concreto tradicional de 34.34 MPa.

Adicionalmente, el reemplazo parcial de cemento al 5% por LSC con 0.5% de FB es el indicado para mejorar las cualidades mecánicas del concreto y a la vez brinda una forma alternativa amigable con el medio ambiente para reducir el consumo excesivo de cemento y reducir la emisión de CO<sub>2</sub> por las industrias cementeras.

Con base en los ensayos de control del concreto fresco y en los ensayos en estado endurecido, donde se evaluaron parámetros críticos como temperatura, contenido de aire, revenimiento, la resistencia a la compresión y tracción diametral. Los resultados evidencian que la implementación conjunta del LSC y las FB no conllevan inconvenientes en la hidratación del concreto y el desarrollo de la resistencia. Este hallazgo resalta la viabilidad económica, sostenible y técnica del diseño propuesto para diversas aplicaciones estructurales. En futuras investigaciones podría explorarse más a fondo la aplicación específica en escenarios particulares o la evaluación

de la interacción de las micro propiedades del concreto incorporado con LSC y FB.

## REFERENCIAS

- [1] F. J. Arenas Cabello, "El impacto ambiental en la edificación :criterios para una construcción sostenible," p. 248, 2007, Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <http://www.dykinson.com/libros/el-impacto-ambiental-en-la-edificacion-criterios-para-una-construccion-sostenible/9788496261365/>
- [2] S. S. Suárez-Silgado, C. Betancourt Quiroga, J. Molina Benavides, and L. Mahecha Vanegas, "La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión," *Entramado*, vol. 15, no. 1, pp. 224–244, Jan. 2019, doi: 10.18041/1900-3803/ENTRAMADO.1.5408.
- [3] Avalo Renzo, "Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición," *Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO)*, Aug. 2017, Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3423941/Presentacio%CC%81n%20Residuos%20Construccion%CC%81n%20-%20Renzo%20Avalo/MVCS.pdf>
- [4] I. Óscar and B. Garay, "Caracterización de residuos de construcción de Lima y Callao (estudio de caso)," 2018, Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10189>
- [5] S. I. Seneviratne, M. G. Donat, A. J. Pitman, R. Knutti, and R. L. Wilby, "Allowable CO<sub>2</sub> emissions based on regional and impact-related climate targets," *Nature* 2016 529:7587, vol. 529, no. 7587, pp. 477–483, Jan. 2016, doi: 10.1038/nature16542.
- [6] Y. Kang, S. Khan, and X. Ma, "Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 12, pp. 1665–1674, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.PNSC.2009.08.001.
- [7] W. Sakashita *et al.*, "The physical science basis," (*No Title*), vol. 455, pp. 1–7, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.QUANT.2017.06.020.
- [8] M. B. Ali, R. Saidur, and M. S. Hossain, "A review on emission analysis in cement industries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2252–2261, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2011.02.014.
- [9] R. Ahmad Khan, J. Nisar Akhtar, R. Ahmad Khan, and M. Nadeem Akhtar, "Experimental study on fine-crushed stone dust a solid waste as a partial replacement of cement," *Mater Today Proc*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.03.222.
- [10] A. Kanojia and S. K. Jain, "Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete," *Constr Build Mater*, vol. 140, pp. 150–156, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.02.066.
- [11] Y. Ouldkaoua, B. Benabed, R. Abousnina, E. H. Kadri, and J. Khatib, "Effect of using metakaolin as supplementary cementitious material and recycled CRT funnel glass as fine aggregate on the durability of green self-compacting concrete," *Constr Build Mater*, vol. 235, p. 117802, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117802.
- [12] T. Akhtar *et al.*, "Experimental investigation of eco-friendly high strength fiber-reinforced concrete developed with combined incorporation of tyre-steel fiber and fly ash," *Constr Build Mater*, vol. 314, p. 125626, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125626.
- [13] A. S. Raju, K. B. Anand, and P. Rakesh, "Partial replacement of Ordinary Portland cement by LCD glass powder in concrete," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 5131–5137, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.10.661.
- [14] A. S. Raju, K. B. Anand, and P. Rakesh, "Partial replacement of Ordinary Portland cement by LCD glass powder in concrete," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 5131–5137, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.10.661.
- [15] L. Likes, A. Markandeya, M. M. Haider, D. Bollinger, J. S. McCloy, and S. Nassiri, "Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete," *J Clean Prod*, vol. 364, p. 132651, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132651.
- [16] S. Li, G. Chen, Z. Xu, X. Luo, and J. Gao, "Particle-size effect of recycled clay brick powder on the pore structure of blended cement paste," *Constr Build Mater*, vol. 344, p. 128288, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128288.
- [17] J. Ahmad *et al.*, "Effects of steel fibers (Sf) and ground granulated blast furnace slag (ggbs) on recycled aggregate concrete," *Materials*, vol. 14, no. 24, Dec. 2021, doi: 10.3390/MA14247497.



- [18] T. Yahyaee Nojoukambari, A. Sadrmomtazi, and R. Kohani Khoshkbijari, "Influence of Feldspar and Ground Granulated Blast-furnace slag as a partial cement replacement on mechanical properties and thermal durability and environmental impacts of cement mortars," *J Clean Prod*, vol. 398, p. 136074, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.CLEPRO.2023.136074.
- [19] V. Lopresto, C. Leone, and I. De Iorio, "Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic," *Compos B Eng*, vol. 42, no. 4, pp. 717–723, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2011.01.030.
- [20] W. Punurai, W. Kroehong, A. Saptamongkol, and P. Chindaprasirt, "Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste," *Constr Build Mater*, vol. 186, pp. 62–70, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.115.
- [21] L. G. Li, K. L. Zeng, Y. Ouyang, and A. K. H. Kwan, "Basalt fibre-reinforced mortar: Rheology modelling based on water film thickness and fibre content," *Constr Build Mater*, vol. 229, p. 116857, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116857.
- [22] I. Y. Hakeem, M. Amin, I. S. Agwa, M. S. Rizk, and M. F. Abdelmagied, "Effect of using sugarcane leaf ash and granite dust as partial replacements for cement on characteristics of ultra-high performance concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02266, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CSCM.2023.E02266.
- [23] P. Hemstad, B. Lothenbach, K. O. Kjellsen, and K. De Weerd, "The effect of varying cement replacement level on alkali metal distribution in cement pastes," *Cem Concr Compos*, p. 105344, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105344.
- [24] A. S. Ruviano *et al.*, "Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment," *Constr Build Mater*, vol. 363, p. 129762, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129762.
- [25] X. hua Zhang *et al.*, "Corrosion mechanism of silica bricks containing high amorphous for hot stoves," *Ceram Int*, vol. 49, no. 24, pp. 40746–40753, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2023.10.058.
- [26] A. Adesina, "Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres – An overview," *Constr Build Mater*, vol. 266, p. 120970, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120970.
- [27] M. Li, F. Gong, and Z. Wu, "Study on mechanical properties of alkali-resistant basalt fiber reinforced concrete," *Constr Build Mater*, vol. 245, p. 118424, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118424.
- [28] Z. Algin and M. Ozen, "The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete," *Constr Build Mater*, vol. 186, pp. 678–685, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.089.
- [29] E. T. Al-Rousan, H. R. Khalid, and M. K. Rahman, "Fresh, mechanical, and durability properties of basalt fiber-reinforced concrete (BFRC): A review," *Developments in the Built Environment*, vol. 14, p. 100155, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.DIBE.2023.100155.
- [30] X. Sun, Z. Gao, P. Cao, and C. Zhou, "Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete," *Constr Build Mater*, vol. 202, pp. 58–72, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.018.
- [31] Y. Wang, S. Hu, and Z. He, "Mechanical and fracture properties of geopolymer concrete with basalt fiber using digital image correlation," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 112, p. 102909, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.TAFMEC.2021.102909.
- [32] D. M. Kannan, S. H. Aboubakr, A. S. EL-Dieb, and M. M. Reda Taha, "High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement," *Constr Build Mater*, vol. 144, pp. 35–41, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.115.
- [33] S. R. da Silva and J. J. de Oliveira Andrade, "Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash," *Constr Build Mater*, vol. 153, pp. 704–715, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.143.
- [34] F. Shi, T. M. Pham, H. Hao, and Y. Hao, "Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths," *Constr Build Mater*, vol. 262, p. 120108, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120108.