



Universidad
Señor de Sipán

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Un enfoque innovador para la construcción sostenible utilizando polvo de vidrio en el concreto

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL

Autor(es)

Albitres Barrantes Violeta Rosalia <https://orcid.org/0000-0002-7112-2713>

Loyola Sánchez Ingrid Fiorella <https://orcid.org/0000-0003-0210-1182>

Asesor

Salinas Vásquez Nestor Raúl <https://orcid.org/0000-0001-5431-2737>

Línea de Investigación Tecnología e Innovación en el Desarrollo de la Construcción y la industria en un Contexto de Sostenibilidad

Sublínea de Investigación

**Innovación y Tecnificación en Ciencia de los Materiales, Diseño e
Infraestructura**

Pimentel – Perú

2024



Universidad
Señor de Sipán

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quien(es) suscribe(imos) la **DECLARACIÓN JURADA**, soy(somos) Elija un elemento del Programa de Estudios de Haga clic o pulse aquí para escribir texto de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaro (amos) bajo juramento que soy (somos) autor(es) del trabajo titulado:

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Albitres Barrantes Violeta Rosalia	DNI: 76546046	
Loyola Sánchez Ingrid Fiorella	DNI: 74086655	

Pimentel, 26 de agosto de 2024

PAPER NAME

AUTHOR

ALBITRES Y LOYOLA

-

WORD COUNT 4839

CHARACTER COUNT 25741

Words

Characters

PAGE COUNT 28

FILE SIZE

Pages

30.5KB

SUBMISSION DATE

REPORT DATE

Aug 27, 2024 2:43 AM GMT-5

Aug 27, 2024 2:44 AM GMT-5

● **14% Overall Similarity**

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 9% Internet database
- 0% Publications database
- 8% Submitted Works database

ÍNDICE

Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Resumen	8
Abstract	8
I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Realidad problemática	8
1.2. Formulación del problema	10
1.3. Hipótesis	10
1.4. Objetivos	10
1.5. Teorías relacionadas al tema	11
II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	12
III. RESULTADOS	14
IV. DISCUSIÓN	19
V. CONCLUSIONES	19
VI. BIBLIOGRAFÍA	21

ÍNDICE DE GRAFICO

Gráfico 1: Datos de la prueba de fluorescencia de rayos X en cemento tipo II y polvo de vidrio reciclado	14
Gráfico 2: Resistencia a la Compresión en MPa con Diferentes Porcentajes de Adición de Polvo de Vidrio	16
Gráfico 3: Impacto de la Adición de Polvo de Vidrio en la Resistencia a la Flexión del Hormigón (28 días)	18
Gráfico 4: Impacto de la Adición de Polvo de Vidrio en la Resistencia a la Tracción del Hormigón (28 días)	18

Dedicatoria

A nuestros padres, quienes nos han brindado su amor incondicional y apoyo constante en cada etapa de nuestras vidas. A nuestros maestros, por su sabiduría, paciencia y por inspirarnos a buscar la excelencia en cada proyecto. A nuestros amigos, por su compañía, sus risas y por compartir con nosotros los desafíos y alegrías de la universidad. A la vida, por las experiencias que nos han moldeado y por las oportunidades que nos ha presentado. Este trabajo es un reflejo de nuestra pasión por el conocimiento, la búsqueda constante de la innovación y la determinación de construir un futuro mejor, no solo en el ámbito de la ingeniería, sino en todos los aspectos de nuestras vidas. Que este esfuerzo conjunto sea un testimonio de nuestra colaboración, nuestra amistad y nuestra convicción de que juntos podemos lograr grandes cosas.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a quienes nos acompañaron en este proceso de aprendizaje y exploración. A nuestros padres, por su apoyo incondicional y por la confianza que depositaron en nosotras para seguir nuestra pasión por la ingeniería. A nuestros profesores, por su dedicación a la enseñanza y por inspirarnos a buscar soluciones innovadoras para los desafíos de la construcción. A nuestros amigos, por su compañía, sus consejos y por compartir con nosotras la pasión por el conocimiento. Esperamos que esta revisión contribuya al avance del conocimiento en el campo de la construcción sostenible y que inspire a otros a buscar soluciones más responsables para el futuro.

Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática sobre el uso de vidrio pulverizado en la producción de concreto ecológico de alta resistencia como material sustitutivo. El objetivo de esta revisión es analizar la viabilidad del uso de vidrio pulverizado como sustituto parcial del cemento Portland. Se empleó una metodología que incluyó una búsqueda exhaustiva de 54 artículos en bases de datos como Scopus, ScienceDirect y EBSCO. Los resultados indican que el vidrio pulverizado puede utilizarse como sustituto parcial del cemento Portland en la producción de concreto ecológico, contribuyendo así a la reducción de la huella de carbono y de los residuos generados por la industria del vidrio. Además, se comprobó que el uso de vidrio pulverizado puede mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción, con una dosificación óptima que no supere el 20% de sustitución del cemento, ya que al aumentar el porcentaje disminuyen sus propiedades mecánicas. En conclusión, la utilización de vidrio pulverizado en la producción de concreto ecológico es una alternativa sostenible y viable que puede contribuir a reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción.

Palabras clave: Polvo; concreto; vidrio; Sustentable.

Abstract

This article presents a systematic review on the use of pulverized glass in the production of high-strength eco-friendly concrete as a substitute material. The aim of this review is to analyze the feasibility of using pulverized glass as a partial replacement for Portland cement. A methodology was employed, which included an exhaustive search of 54 articles in databases such as Scopus, ScienceDirect, and EBSCO. The findings indicate that pulverized glass can be used as a partial substitute for Portland cement in the production of eco-friendly concrete, thus contributing to the reduction of carbon footprint and waste generated by the glass industry. Furthermore, it was found that the use of pulverized glass can enhance mechanical properties, such as compressive, flexural, and tensile strength, with an optimal dosage not exceeding 20% replacement of cement, as increasing the percentage diminishes its mechanical properties. In conclusion, the utilization of pulverized glass in eco-friendly concrete production is a sustainable and viable alternative that can contribute to reducing the environmental impact of the construction industry.

Keywords: powder; concrete; glass; coarse Sustainable.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

El concreto, a pesar de ser ampliamente producido por la humanidad, lamentablemente conlleva un impacto ambiental significativo que afecta tanto al entorno como a la vida en la Tierra, [1], Al ser el material más utilizado es también coherente mencionar que las tasas de producción mundial están experimentando un notable aumento para satisfacer la creciente necesidad de viviendas e infraestructuras en todo el mundo [2]. Es por ello que, en la actualidad, existe un creciente interés entre los investigadores en abordar los desafíos comunes en la industria de materiales de construcción, en este sentido se ha vuelto imperativo encontrar soluciones sostenibles y ecológicas parragooa el concreto, sin comprometer su calidad [3].

En cuanto al concreto se ha convertido en un material de construcción popular en todo el mundo debido a su versatilidad y asequibilidad, aunque también tiene efectos sobre el medio ambiente, ya que en investigaciones existentes tiene como referencia que para la producción de concreto se requiere una gran cantidad de recursos naturales, como arena, grava y agua como consecuencia se obtiene el agotamiento de estos; por lo que es de previsión mundial, especialmente porque los agregados naturales no son renovables [4]. Asimismo, La fabricación de cemento Portland, que es un componente clave del concreto, este material emite 0.9 toneladas de dióxido de carbono (CO₂), En otras palabras, según estudios ambientales, la producción de cemento es responsable del 7% y el 10% del total de emisiones globales de CO₂ [5] [6]. Este enfoque refleja la necesidad de avanzar hacia prácticas constructivas más responsables, incorporando materiales como el vidrio triturado que no solo promueven la sostenibilidad, sino que también elevan el estándar de rendimiento en la construcción.

Por otro lado, es conveniente señalar que las estadísticas de una encuesta de las Naciones Unidas, la cantidad de vidrio desechado representa el 7% del total de residuos sólidos, pero sólo una pequeña parte se recicla y la mayor parte se deposita en vertederos, a esto se le agrega que la gestión de residuos de vidrio, provenientes de consumos previos, representa un desafío significativo en entornos urbanos [7]. Estos desechos de vidrio han contribuido al aumento de vertederos, generando problemas ambientales considerables y, a su vez, limitando el progreso socioeconómico sostenible de las áreas urbanas. Esta situación plantea la necesidad de abordar de manera efectiva la gestión de residuos de vidrio para promover un entorno más sostenible [8].

En el Perú, el reciclaje de envases de vidrio carece de estadísticas oficiales. No obstante, es plausible que estas cifras reflejen el patrón observado en la gestión de residuos sólidos urbanos. En términos concretos, aproximadamente el 1% de los envases de vidrio son reciclados, mientras que el 52% son recuperados. En contraste, el 47% se dispone en rellenos sanitarios o en el ambiente. Además, en el año 2017, se fabricaron un total de 11,790 toneladas anuales de vidrio en el país, de las cuales se logró recuperar el 28% (equivalente a 3360 toneladas anuales), quedando el 72% restante para ser dispuesto en rellenos sanitarios y botaderos [9].

Debido a la creciente demanda de vidrio en nuestra vida diaria, la cantidad de residuos de vidrio (WG) está aumentando y su eliminación se convierte en una gran preocupación ya que este producto se emplea en un sin número de aplicaciones, un ejemplo claro es la fabricación de tubos de vacío, láminas de vidrio, botellas, cristalería, etc. [10]. Sin embargo, uno de los desafíos ambientales asociados con el vidrio es que no es biodegradable, lo que significa que no se descompone naturalmente en el medio ambiente [11]. En este contexto, se puede decir que el concepto de construcción sostenible se refiere a la planificación y cuidado consciente de un ambiente construido que promueve la salud y el bienestar, al mismo tiempo que se prioriza la utilización eficiente de recursos y en consideración con el impacto ecológico. Esta práctica destaca la importancia de equilibrar la funcionalidad de los espacios construidos con la responsabilidad hacia el entorno y las generaciones futuras [12]

A su vez, el uso de polvo de vidrio (GP), en el concreto presenta ventajas ecológicas y económicas esta alternativa no es algo nuevo que se pretende analizar a nivel mundial ya que existen investigación que refieren como dato que este material, fabricado a partir de vidrio reciclado, constituye una alternativa sostenible para proyectos de construcción [13]. Al integrar el polvo de vidrio en la mezcla, es posible disminuir la cantidad de cemento requerida, lo que, a su vez, puede resultar en ahorros significativos en los costos de construcción. Esta combinación de sostenibilidad y eficiencia económica lo convierte en una elección prometedora en la industria de la construcción.

[14] Las principales propiedades que trae consigo el sustituto del GP es el mejoramiento del aislamiento térmico, resistencia a la corrosión química en estructuras expuestas a ataques químicos y salinos, esto puede extender la vida útil de las infraestructuras y reducir los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo [15] [12]. Además, la resistencia a la compresión con este material, permite edificar proyectos fuertes y duraderos como es el caso de los puentes y edificios de gran envergadura [16].

Esta información proporcionada resalta la importancia de considerar los costos de sustitución parcial de materiales de construcción en la producción de concreto. En particular, se destaca que el GP es considerablemente más económico en comparación con el cemento. Este aspecto es relevante ya que el GP puede funcionar como un reemplazo parcial de los materiales cementantes convencionales, lo que puede tener un impacto positivo en los costos de producción [17]. Aunque no se menciona en las diferentes investigaciones la magnitud exacta de la disminución de los costos, se afirma que, aunque aparentemente no haya una disminución drástica, se puede considerar que mejora sustancialmente los costos de producción. En otras palabras, se considera que, incluso si la reducción de costos no es extremadamente significativa, el uso de GP como reemplazo parcial sigue siendo beneficioso desde una perspectiva económica [18].

Esta investigación se justifica: Académicamente, porque contribuye al conocimiento en desarrollo sobre el uso de fibra de vidrio en la construcción sostenible, ofreciendo nuevas perspectivas sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. La escasez de estudios específicos en este tema crea una oportunidad única para ampliar el cuerpo académico existente, promoviendo avances en técnicas constructivas más eficientes. Desde una perspectiva técnica, este estudio pretende optimizar el desempeño del concreto incorporando fibra de vidrio como sustituto parcial del cemento, lo que podría mejorar la resistencia y durabilidad del material, abordando desafíos críticos en la ingeniería civil. Metodológicamente, la investigación adopta un enfoque innovador mediante la implementación de nuevos materiales reciclados, lo que puede enriquecer las prácticas constructivas convencionales. Así, este trabajo no solo busca llenar un vacío académico, sino también ofrecer soluciones técnicas que impulsen la sostenibilidad y eficiencia en el campo de la construcción.

1.2. Formulación del problema

¿Es el polvo de vidrio en el concreto realmente un enfoque innovador para la construcción sostenible?

1.3. Hipótesis

Si adiciono polvo de vidrio en el concreto, es posible un enfoque innovador para la construcción sostenible.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el impacto del uso de polvo de vidrio como sustituto parcial del cemento en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, con el fin de proponer alternativas más sostenibles y eficientes para la industria de la construcción, basadas en la reutilización de materiales reciclados.

Objetivos específicos

- Analizar la influencia del polvo de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto, comparando su desempeño con mezclas convencionales.
- Determinar el efecto del polvo de vidrio en la durabilidad del concreto, considerando su comportamiento frente a la exposición a agentes corrosivos y ambientes agresivos.
- Evaluar la viabilidad económica y ambiental del uso de polvo de vidrio en la producción de concreto, considerando los costos de material y los beneficios en términos de reciclaje y sostenibilidad.

1.5. Teorías relacionadas al tema

- Polvo de vidrio

El polvo de vidrio residual (GP) se obtiene mediante la trituración de desechos de vidrio hasta lograr una granulometría fina, capaz de pasar a través de un tamiz de 75 μm . Este proceso se ejecuta utilizando un molino manual de tolva de la marca Corona, en el cual se procesan entre 200 y 300 gramos de vidrio triturado por ciclo. [19] El mecanismo del molino consiste en dos discos dentados que, al ser accionados manualmente por una palanca, reducen el vidrio a partículas finas, las cuales se descargan en un recipiente de recolección. Debido a su elevado contenido de sílice en fase amorfa, el polvo de vidrio tiene propiedades puzolánicas cuando se reduce a partículas ultrafinas, lo que presenta una oportunidad relevante para su aplicación en la industria del cemento, contribuyendo así a la optimización de las mezclas y a la sostenibilidad en la construcción [20].

- Concreto

La industria de la construcción desempeña un papel crucial en el desarrollo económico y social a nivel global, pero enfrenta el desafío de una huella de carbono significativa debido a su alto consumo de energía, que se extiende desde la producción de materias primas hasta la construcción de estructuras. En particular, se ha identificado que el concreto es uno de los elementos estructurales que más emiten dióxido de carbono (CO_2) durante su proceso de fabricación, ya que el cemento, que sirve como aglutinante convencional en la producción de concreto y mortero, juega un papel central en este proceso [21]

El cemento se obtiene al combinar cemento, árido fino y árido grueso en proporciones adecuadas con una relación agua-cemento óptima, similar a la del concreto tradicional. Dado que el concreto es un material compuesto heterogéneo, es esencial mantener la uniformidad y estabilidad de las mezclas de concreto en todas las etapas de producción, que incluyen la dosificación, mezcla, transporte, colocación y compactación en la forma deseada [22].

- Propiedades del Concreto

El concreto es un material que muestra un comportamiento cercano a la fragilidad, ya que puede experimentar fallas sin deformación plástica. A pesar de su notable resistencia a la compresión, el concreto es vulnerable a tensiones, lo que lo hace propenso a fisuras [23]. Para contrarrestar estos desequilibrios estructurales y mejorar su resistencia general y ductilidad, se incorporan diversos tipos de refuerzos en la sección donde se originan las fisuras; además, los componentes del concreto pueden sufrir daño o desgaste con el tiempo [24].

- Resistencia a la compresión

La evaluación de la RC es el resultado de la aplicación de una carga axial gradual sobre un testigo cilíndrico dispuesto verticalmente hasta que se produce la falla estructural. La unidad de medida, expresada en kg/cm^2 , se determina dividiendo la carga aplicada por el área de la sección transversal del cilindro. La norma NTP 339.034, establece el riguroso protocolo técnico para la ejecución de este ensayo, proporcionando directrices específicas en ingeniería que garantizan la precisión y consistencia en la medición de la RC del material evaluado. Este proceso es esencial para asegurar la integridad y el rendimiento del material en aplicaciones de ingeniería [25] - Resistencia a la tracción

La evaluación de la RT directa consiste en someter una probeta cilíndrica a compresión diametral aplicando una carga uniformemente a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta que se produce el fallo. Esta configuración de la carga da lugar a un esfuerzo de tracción relativamente uniforme a lo largo de todo el diámetro del plano de carga vertical, lo que finalmente conduce al fallo de la probeta a lo largo del plano diametral. Este método permite evaluar la capacidad de un material para soportar un esfuerzo de tracción indirecto y suele expresarse en kg/cm^2 , por ello es preciso señalar que se debe ir a la par con la NLT-346/90 (ensayo brasileño), quien estable los protocolos del método de ensayo normalizado para la determinación de la RT indirecta de concreto [26].

- Resistencia a la flexión

La evaluación de la RF, es el resultado de la aplicación implica la aplicación controlada de cargas en diversas direcciones sobre un testigo prismático tipo viga, con el objetivo de medir su capacidad para resistir la deformación frente a los momentos de flexión [27]. en otras palabras, representa la capacidad de una viga o losa de concreto no reforzada para resistir el colapso debido a momentos aplicados. En concordancia con los lineamientos de la Norma Técnica Peruana NTP 339.078, la presente norma establece el método preciso para llevar a cabo dicho ensayo.

II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se utilizaron 54 artículos para obtener información pertinente para el artículo. Las principales fuentes de datos fueron artículos científicos y diarios lógicos recibidos de bases de datos eminentes como Scopus, ScienceDirect y EBSCO. El período de publicación abarcó cuatro artículos del 2020, trece artículos en 2020, diez artículos del 2021, veintiséis artículos del 2022 y un artículo en 2024. Para realizar la búsqueda de artículos se emplearon palabras clave en inglés como "Concrete", "Glass Powder" y "Glass Recycling". Además, para obtener una visión general completa, consulte la Tabla 1, que presenta la bibliografía utilizada en el estudio categorizada por base de datos y año de publicación.

Hemos llevado a cabo un minucioso análisis de los artículos disponibles, evaluando su relevancia en relación con nuestro tema de investigación. De una amplia selección de fuentes, hemos identificado y referenciado cuidadosamente 54 artículos que mejor se alinean con nuestro tema de estudio. Estos artículos seleccionados han servido como el sólido fundamento en la elaboración de nuestro propio trabajo. Con el fin de facilitar una mejor comprensión de esta selección, hemos organizado la información en tablas informativas, como se ilustra en la (Tabla 1).

Tabla 1: Artículos organizados por año de publicación

Base de datos	Año de Publicación					Total
	2020	2021	2022	2023	2024	
ScienceDirect	0	3	2	7	0	12
Scopus	4	10	8	18	0	40
EBSCO	0	0	0	1	1	1
Total	4	13	10	26	0	54

Elaboración propia, 2024

La primera etapa de nuestro proceso consistió en llevar a cabo una búsqueda exhaustiva y meticulosa de fuentes pertinentes. Es esencial destacar que las fuentes revisadas desempeñaron un papel fundamental en la verificación y obtención de información precisa y adecuada, lo que resulta esencial en una revisión sistemática dedicada al uso de vidrio pulverizado en la formulación de concreto ecológico como material sustitutivo. Los resultados obtenidos se compilaron y registraron en una hoja de cálculo (Excel) diseñada para su organización sistemática. Esta fase de organización y clasificación de datos allanó el camino para la posterior etapa de redacción, donde se elaboró el contenido de manera coherente y estructurada.

En cuanto a las consideraciones éticas, los autores afirman su adhesión a las directrices y normativas éticas tanto nacionales como internacionales durante el transcurso de este estudio. Este compromiso incluye el respeto de los derechos de autor, la honestidad en la presentación de los resultados y la revelación de cualquier posible conflicto de intereses.

III. RESULTADOS

Los artículos seleccionados se refieren a diversas investigaciones que se centran en la incorporación de residuos de vidrio en el concreto.

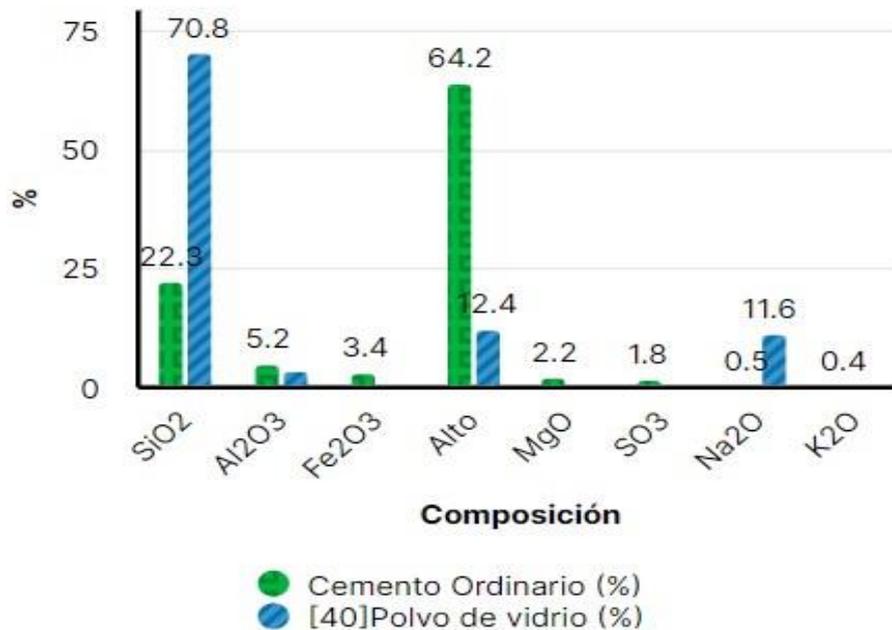
Polvo de Vidrio.

El vidrio se produce típicamente mediante la fusión de materias primas como dióxido de sodio, carbonato de sodio, piedra caliza y dolomita a temperaturas que rondan los 1600°C. Luego, se enfría sin atravesar una fase de cristalización. El polvo de vidrio (GP) se obtiene como subproducto de la fabricación de vidrio y del proceso de suavizado de bordes. También se deriva de la trituración de vidrio desechado, considerado residuo de las fábricas de vidrio [28]. Este subproducto es idóneo para utilizarlo como un material de construcción ya que exhibe propiedades puzolánicas cuando se tritura a una finura adecuada. Este producto puede utilizarse como un sustituto complementario del cemento en la mezcla de concreto [29]. Por consiguiente, se resalta que algunas investigaciones utilizan el GP de un diámetro <140 considerando que dicha medida del GP es óptima para utilizarlo como adición mineral en cemento y concreto al mismo tiempo afirmaron la existencia de una reacción puzolánica entre el polvo de vidrio y el cemento que permite mejorar el comportamiento de concretos y morteros [30].

Por otro lado, nos dice que este estudio establece un modelo cinético de hidratación para la mezcla de cemento en GP, es por ello que la incorporación de polvo de vidrio tiene un efecto de dilución en la hidratación del cemento y acelera su proceso, en este aspecto el tamaño de partícula del polvo de vidrio influye en su reactividad [31]. La reactividad del polvo de vidrio también disminuye a medida que aumenta su contenido, afectando la concentración de portlandita (CH) en la solución de poros. Cuando el contenido de polvo de vidrio supera el 45%, la cantidad de CH producida por la hidratación del cemento es menor que la consumida por la reacción puzolánica del polvo de vidrio [32]

A esto podemos decir que el polvo de vidrio seleccionado como sustituto parcial del cemento debe coincidir en finura con el cemento, pasando el nivel 200. A través de los resultados de la prueba de fluorescencia de rayos X en el cemento y el polvo de vidrio, se identificaron similitudes en los elementos presentes. Según el gráfico 1, tanto el polvo de vidrio como el cemento comparten elementos comunes, entre los que se incluyen MgO, SiO₂, K₂O, CaO y TiO₂ [33].

Gráfico 1: Datos de la prueba de fluorescencia de rayos X en cemento tipo II y polvo de vidrio reciclado



Elaboración propia, 2024

Propiedades físicas básicas

El concreto, una estructura bifásica compuesta por su fase pastosa de cemento y su fase sólida de áridos, experimenta una serie de propiedades que resultan de la interacción entre estas dos fases. La resistencia, elasticidad, permeabilidad, durabilidad y cambios de volumen en el concreto se ven fuertemente influenciados por la estructura y cualidades de su fase pastosa. Esta relación fundamental entre las dos fases establece las características esenciales de este material de construcción clave [34]

Propiedades mecánicas

El GP se ha utilizado como sustituto del cemento o del árido fino en la producción del concreto debido a sus características puzolánicas, lo que significa que puede reaccionar con el hidróxido de calcio liberado durante el proceso de hidratación del cemento Portland. Esta reacción forma compuestos adicionales en el concreto, lo que puede mejorar su durabilidad y resistencia a largo plazo [35]. La adhesión de vidrio pulverizado en el concreto puede aumentar tanto sus propiedades mecánicas, así como la RC del mismo modo sucede con la RT Y RF [36]. En la actualidad es un material utilizado en diversos ámbitos, en el caso de la construcción se emplea para mejorar sus cualidades, en donde este se incorpora en diferentes porcentajes de sustitución, como el 5%, 10%, 15%, 20% e incluso hasta el 40%. La elección de la proporción adecuada puede depender de las necesidades [37] [38]

Resistencia a la comprensión

La RC es un factor crítico en la capacidad de las estructuras de concreto para soportar cargas específicas. Desde una perspectiva estructural, esta propiedad es fundamental, ya que determina la

capacidad de una estructura para resistir cargas compresivas, asegurando su estabilidad y durabilidad en diversas aplicaciones de construcción [39].

La RC del concreto se examina mediante un ensayo que consiste en someterlo a una carga axial con una máquina de compresión. Este procedimiento permite determinar la carga máxima que puede soportar el concreto. Posteriormente, la carga máxima obtenida se divide por la sección transversal del concreto sometido a ensayo, lo que da como resultado la carga por unidad de superficie expresada en MPa [40] (Martina et al., 2022b) El empleo de polvo de vidrio como sustituto parcial del cemento es un factor clave para impulsar la RC del . Esto se debe a la mejora de la microestructura, resultado de su propiedad puzolánica. Los datos revelan un incremento notable de aproximadamente un 21% en la RC cuando se emplea una proporción del 20%. [41].

La siguiente tabla proporciona información esencial sobre la RC de muestras de hormigón sometidas a diversos porcentajes de adición. Estos porcentajes de adición varían desde un 0% (sin añadidura) hasta un 30%, lo que representa distintos niveles de incorporación de un componente específico en la mezcla de hormigón. La RC es un indicador crucial de la capacidad del hormigón para soportar fuerzas con la misma dirección y sentidos contrarios en aplicaciones de construcción [42]. Este estudio se centra en analizar cómo la variación en los porcentajes de adición afecta directamente a la RC, brindando una visión completa de la relación entre la dosificación y la calidad del hormigón. Los valores reflejados en la tabla se convierten en una herramienta valiosa para comprender cómo los distintos niveles de adición influyen en la capacidad del hormigón para resistir fuerzas por unidad de área.

Gráfico 2: Resistencia a la Compresión en MPa con Diferentes Porcentajes de Adición de Polvo de Vidrio

% Adicción	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
(Rajendran et al., 2021a)	36.82	38.5	40.95	43.1	41.82	--	--
(Jain et al., 2020)	27.5	29	31.5	34	38	26	--
(Balasubramanian et al., 2021)	26.56	26.86	27.7	27.54	28	--	--
(Baikerikar et al., 2023b)	50	52	47.5	45.5	44	39	--
(Sugito et al., 2022)	33.5	--	28.2	31.1	22.7	--	--
(Orouji et al., 2021)	36.82	38.5	40.95	43.1	41.82	--	--
(Najaf et al., 2022)	41	48.9	--	--	45	42	--
(Tahwia et al., 2022b)	25	36	--	--	--	--	29

(Muhedin & Ibrahim, 2023)	42	48	46	43	36	--	--
(Bahadur & Kumar Parashar, 2023a)	36.82	38.5	40.95	43.1	41.82	--	--
(Salah Al-kizwini, 2020)	36	37	40	42.5	39	--	--

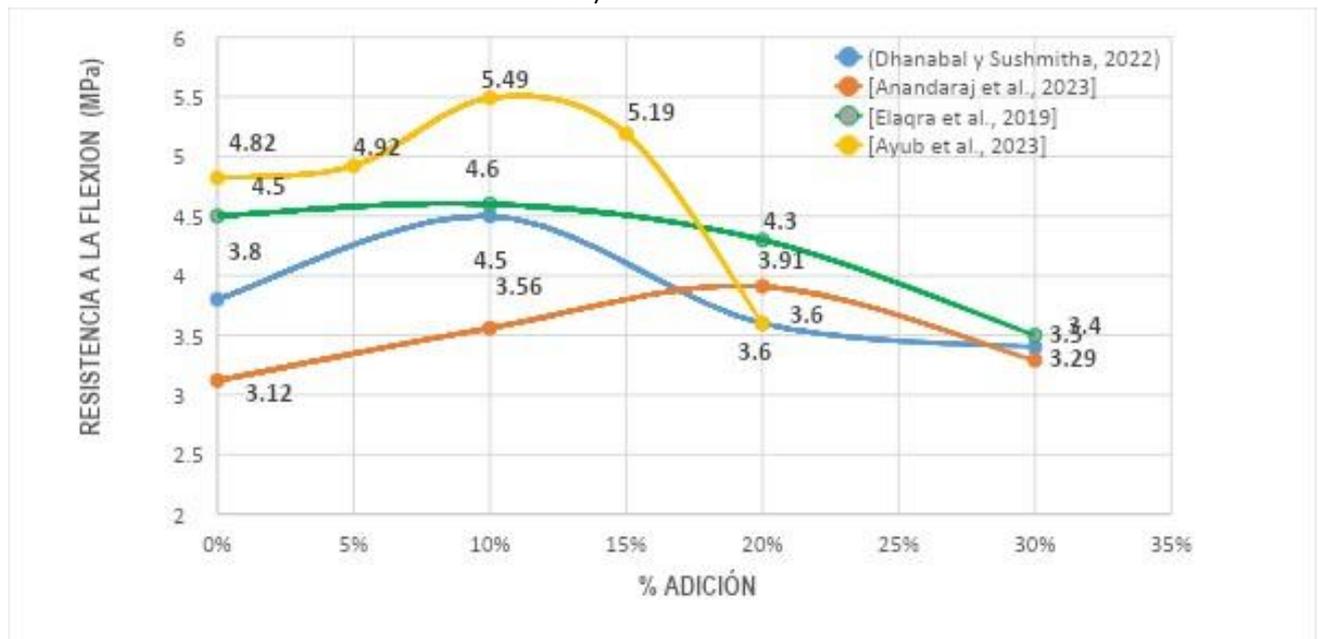
La tabla 2 muestra la RC en mega pascales (MPa) de muestras de hormigón con diferentes porcentajes de adición de polvo de vidrio. Los valores varían según el estudio y el porcentaje de adición. En general, se observa que la resistencia a la compresión tiende a aumentar a medida que se agrega más GP, pero la magnitud de este aumento puede variar. Es importante considerar estos datos al diseñar mezclas de hormigón con polvo de vidrio, ya que el porcentaje de adición puede influir en la resistencia final del material (Elaboración propia, 2024).

Resistencia a la flexión

En la búsqueda constante de optimizar las propiedades del hormigón en aplicaciones de construcción, la RF juega un papel fundamental. El gráfico que presentamos a continuación detalla los resultados de nuestra investigación, que se enfocó en analizar cómo diferentes porcentajes de adición impactan la RF de muestras de hormigón [43] [44] [45] [46].

A través de variaciones en los niveles de adición, desde un 0% hasta un 30%, hemos examinado en profundidad cómo estos cambios influyen en la capacidad del hormigón para soportar fuerzas de flexión. Estos resultados constituyen un avance importante en el entendimiento de cómo la cantidad de adición puede influir y puede ser un factor determinante en el rendimiento del hormigón en aplicaciones estructurales, ofreciendo valiosos conocimientos para la ingeniería y la construcción

Gráfico 3: Impacto de la Adición de Polvo de Vidrio en la Resistencia a la Flexión del Hormigón (28 días)

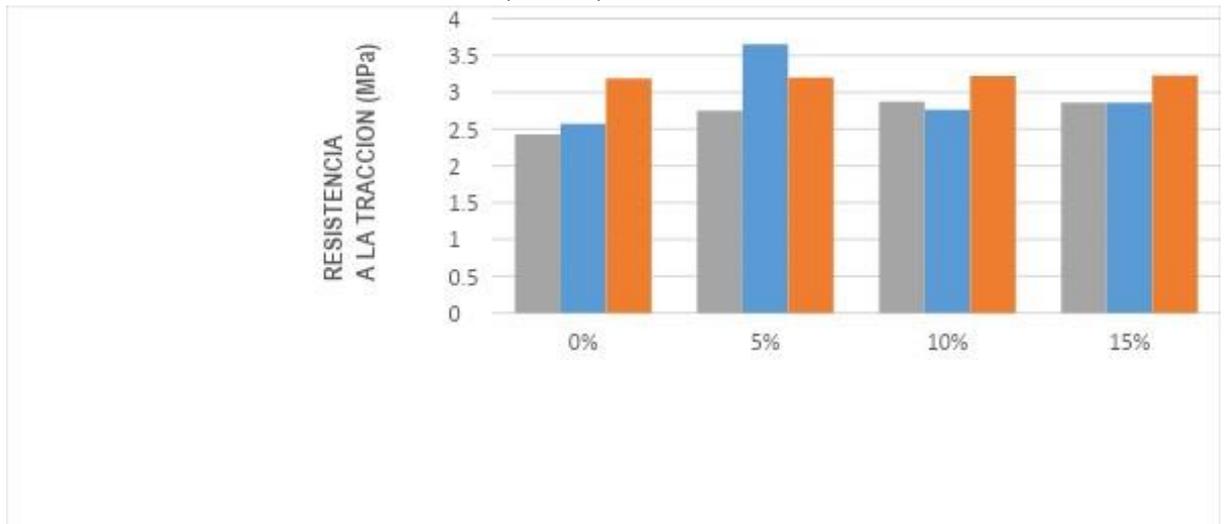


Elaboración propia, 2024.

Resistencia a la tracción

La RT tracción desempeña un papel crucial en la evaluación de la calidad y el rendimiento del hormigón. En este gráfico, mostramos los resultados de estudios recientes realizados por Ibrahim, destacando los resultados de RT a 28 días con distintos porcentajes de aditivos. [47] [48] [49] [50].

Gráfico 4: Impacto de la Adición de Polvo de Vidrio en la Resistencia a la Tracción del Hormigón (28 días)



En el gráfico 4, se presentan los resultados de RT de muestras de hormigón con diferentes porcentajes de adición de polvo de vidrio. Los datos ilustran cómo la dosificación influye en la capacidad del hormigón para resistir fuerzas de tracción (Elaboración propia, 2024).

Estos datos ofrecen una visión valiosa de cómo la adición de diversos materiales influye en la resistencia a la tracción del hormigón, lo que puede ser de gran relevancia para aplicaciones de construcción y diseño de mezclas. En este gráfico que se presenta a continuación, se detallan los resultados de nuestras pruebas, revelando cómo la dosificación del 15% ha incidido en la RT en comparación con otro porcentaje reafirmando de la misma forma [51]. En la mayoría de los estudios, se ha observado que es factible utilizar entre un 10% y un 20% de polvo de vidrio (GP) como sustituto del cemento [52]. Como dato curioso investigaciones previas han demostrado que la RC del hormigón aumenta significativamente al incluir un contenido de GP de hasta un 10% [53]. Estos hallazgos arrojan luz sobre la importancia de la dosificación en la formulación de mezclas de hormigón con el objetivo de lograr propiedades óptimas para aplicaciones específicas.

IV. DISCUSIÓN

- ✓ La revisión de la literatura ha demostrado que el uso de polvo de vidrio (GP) como sustituto parcial del cemento Portland en la producción de concreto ecológico es una estrategia viable para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y eficiencia en la construcción civil. En relación con el primer objetivo específico, varios autores como [5] [6] evidencian que la adición de GP hasta un 20% en la mezcla de concreto mejora la resistencia a la compresión, lo cual concuerda con los hallazgos de [15], quienes destacan una mayor densidad y cohesión microestructural en las muestras con GP. Sin embargo, estudios como los de [18] señalan que incrementos superiores al 20% de GP pueden provocar una disminución en las propiedades mecánicas, debido a una menor hidratación del cemento y una distribución desigual de las partículas, lo cual subraya la importancia de optimizar la dosificación para mantener la integridad estructural del concreto.
- ✓ En cuanto a la durabilidad del concreto, investigaciones de [12] [16] muestran que la incorporación de GP mejora significativamente la resistencia a la corrosión química y a ambientes agresivos, lo que extiende la vida útil de las estructuras de concreto. Esta mejora se atribuye a la naturaleza puzolánica del GP, que contribuye a una hidratación más completa del cemento y a una matriz más densa que reduce la permeabilidad del material. No obstante, algunos estudios han señalado variaciones en los resultados dependiendo de las condiciones ambientales específicas y la calidad del GP utilizado, sugiriendo que la durabilidad puede estar influenciada por factores externos que deben ser considerados en futuros desarrollos tecnológicos y metodológicos [2] [3].
- ✓ Respecto a la viabilidad económica y ambiental, la mayoría de los autores, incluyendo a [14] [17] y Hama (2023), coinciden en que el uso de GP resulta en una reducción de los costos de producción del concreto debido al menor precio del vidrio reciclado en comparación con el cemento Portland. Además, la reutilización de residuos de vidrio contribuye a la disminución de la huella de carbono de la industria de la construcción y al manejo sostenible de los residuos sólidos urbanos, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por organismos internacionales [7] [8].
- ✓ Finalmente, en relación con el tamaño de partícula y la reactividad del GP, estudios de [19] [20] indican que una granulometría fina es crucial para maximizar la actividad puzolánica del GP, lo cual optimiza la hidratación del cemento y mejora las propiedades mecánicas del concreto. La optimización de la proporción de GP según el tamaño de partícula, como sugieren [22] [24], permite una mejor distribución en la mezcla y una reacción más eficiente con los componentes del cemento, resultando en una mayor resistencia y durabilidad del concreto. No obstante, la variabilidad en los métodos de molienda y control de calidad del GP presenta desafíos que deben ser abordados para asegurar la consistencia y eficacia del material en aplicaciones prácticas [25].

V. CONCLUSIONES

- ✓ En el presente artículo se investigó el uso del polvo de vidrio como reemplazo parcial del cemento en concretos, presenta una perspectiva prometedora en la industria de la construcción. La incorporación de polvo de vidrio en el conglomerante no solo conduce a mejoras sustanciales en la resistencia a la compresión, tracción y flexión del hormigón,

sino que también se alinea con los principios de la economía circular, una tendencia creciente en la ingeniería civil contemporánea.

- ✓ Al analizar los resultados, emerge un rango de dosificación que brilla con un potencial extraordinario. Los porcentajes del 10% al 20% de adición de polvo de vidrio demuestran una resistencia a la compresión excepcional, con un aumento porcentual asombroso en comparación con la mezcla de control, lo que indica que esta adición puede mejorar la capacidad del hormigón para soportar cargas de compresión.
- ✓ En cuanto a la resistencia a la tracción, los datos muestran variabilidad, pero en general, la adición de polvo de vidrio no tiene un impacto negativo en esta propiedad. Esto sugiere que el polvo de vidrio puede mantener o incluso mejorar la capacidad del hormigón para resistir tensiones.
- ✓ En conclusión, el uso de polvo de vidrio como sustituto parcial del cemento en la fabricación de concreto ecológico no solo responde a los objetivos de sostenibilidad y eficiencia económica, sino que también mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del material, siempre que se mantenga una dosificación adecuada. Estos hallazgos apoyan la hipótesis de que la incorporación de GP en el concreto representa un enfoque innovador para la construcción sostenible, ofreciendo una solución eficaz para la reducción de la huella ambiental de la industria de la construcción y promoviendo la reutilización de residuos industriales.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Khan, M. M. H., Sobuz, M. H. R., Meraz, M. M., Tam, V. W. Y., Hasan, N. M. S., & Shaurdho, N. M. N., «Effect of various powder content on the properties of sustainable self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*,» p. 19, 2023.
- [2] Tran, T. M., Trinh, H. T. M. K., Nguyen, D., Tao, Q., Mali, S., & Pham, T. M., «Development of sustainable ultra-high-performance concrete containing ground granulated blast furnace slag and glass powder: Mix design investigation.,» p. 397, 2023a.
- [3] Sikora, P., Afsar, L., Rathnarajan, S., Nikravan, M., Chung, S. Y., Stephan, D., & Abd Elrahman, M., «Seawater-Mixed Lightweight Aggregate Concretes with Dune Sand, Waste Glass and Nanosilica: Experimental and Life Cycle Analysis. *International Journal of Concrete Structures and Materials*,» vol. 1, p. 17, 2023.
- [4] Zhao, H., Li, W., Gan, Y., Wang, K., & Luo, Z., «Nano/microcharacterization and image analysis on bonding behaviour of ITZs in recycled concrete enhanced with waste glass powder. *Construction and Building Materials*,» p. 392, 2023.
- [5] Mustafa, T. S., Mahmoud, A. A., Mories, E. M., & El Beshlawy, S. A., «Flexural behavior of reinforced concrete slabs containing recycled glass powder and steel fibers. *Structures*,» n° 1491–1508, p. 54, 2023.
- [6] Wang, Y., Wang, J., Wu, Y., Li, Y., He, X., Su, Y., & Strnadell, B., «Preparation of sustainable ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-fine glass powder as multi-dimensional substitute material. *Construction and Building Materials*,» p. 401, 2023.
- [7] Li, S., Jiao, C., & Gan, Y., «Study on Mechanical Properties of Waste Glass Powder Concrete. *Gongcheng Kexue Yu Jishu/Advanced Engineering Science*,» vol. 5, n° 199–205, p. 51, 2024.
- [8] Yin, W., Li, X., Chen, Y., Wang, Y., Xu, M., & Pei, C., «Mechanical and rheological properties of High-Performance concrete (HPC) incorporating waste glass as cementitious material and fine aggregate. *Construction and Building Materials*,» vol. 131656, p. 387, 2023.
- [9] Díaz, R., Velarde, G., & Lino, G., «Glass Packaging Material Flow Analysis for Production, Consumption, and Trade in Peru during 2018. *South Sustainability*,» vol. 1, n° e026–e026, p. 2, 2020.
- [10] Tahwia, A. M., Essam, A., Tayeh, B. A., & Elrahman, M. A., «Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*,» p. 17, 2022a.
- [11] Serelis, E., & Vaitkevicius, V., «Effect of waste glass powder and liquid glass on the Physico-Chemistry of Aluminum-Based Ultra-Lightweight concrete. *Construction and Building Materials*,» p. 390, 2023.
- [12] Benfrid, A., Benbakhti, A., Harrat, Z. R., Chatbi, M., Krour, B., & Bouiadjra, M. B., «Thermomechanical Analysis of Glass Powder Based Eco-concrete Panels: Limitations and Performance Evaluation. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*,» vol. 4, n° 1284–1297, p. 67, 2023.
- [13] Mariaková, D., Mocová, K. A., Fořtová, K., Pavlů, T., & Hájek, P., «Waste glass powder reusability in high-performance concrete: Leaching behavior and ecotoxicity. *Materials*,» vol. 16, p. 14, 2021.
- [14] Kuoribo, E., Shokry, H., Hassanin, A. H., Asawa, T., & Mahmoud, H., «Optimizing concrete performance: An investigation into the impact of supplementary cementitious materials and sand particle sizes. *Materials Letters*,» vol. 134593, p. 347, 2023.

- [15] Ali Hussain, Z., & Aljalawi, N., «Effect of Sustainable Glass Powder on the Properties of Reactive Powder Concrete with Polypropylene Fibers. Engineering, Technology & Applied Science Research,» vol. 2, nº 8388–8392, p. 12, 2022.
- [16] Deng, Q., Zou, S., Xi, Y., & Singh, A., «Development and Characteristic of 3D-Printable Mortar with Waste Glass Powder,» vol. 13, nº 6, p. 1476, 2023.
- [17] Mohammed, T. K., & Hama, S. M., «Effect of combination of waste glass powder and plastic aggregate on structural behavior of reinforced concrete beams. Structures,» nº 83–103, p. 52, 2023.
- [18] Abellan-Garcia, J., Iqbal Khan, M., Abbas, Y. M., Martínez-Lirón, V., & Carvajal-Muñoz, J. S., «The drying shrinkage response of recycled-waste-glass-powder-and calcium-carbonate-based ultrahigh-performance concrete. Construction and Building Materials,» p. 379, 2023.
- [19] B. Rahmzadeh, K. Rahmani y S. Piroti, «Experimental study of the effect of water-cement ratio on compressive strength, abrasion resistance, porosity and permeability of Nano silica concrete,» *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 2, nº 44, pp. 16-24.
- [20] O. Arbeláez, V. Senior, A. Rúa y J. Carvajal, «Influencia del polvo de vidrio en el comportamiento ambiental, térmico y mecánico del hormigón que contiene ceniza de cascarilla de arroz,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2024.
- [21] F. Aghziel, M. Ben, M. Zaher, A. Hafidi and Y. Burtschell, "New test for the determination of static segregation of self-compacting concrete: Three-circles test," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, no. 6, pp. 4161-4167, 2022.
- [22] Y. Zhuge, W. Duan and Y. Liu, "Utilization of wood waste ash in green concrete production," *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources*, pp. 419-450, 2022.
- [23] A. Azevedo, D. Cecchin, D. Carmo, F. Silva, C. Campos, T. Shtrucka, M. Marvila and S. Monteiro, "Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW)," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 5942-5952, 2020.
- [24] M. Segawa, A. Aili and I. Maruyama, "Comparison of shrinkage and mass change of hardened cement paste under gradual drying and rapid drying," *CEMENT*, vol. 10, p. 100047, 2022.
- [25] R. Jaya, "Porous concrete pavement containing nanosilica from black rice husk ash," *New Materials in Civil Engineering*, pp. 493-527, 2020.
- [26] Q. Xiao, G. Ju, F. Ye, Y. Wang, L. Jin and W. Fu, "An innovative approach for assessing the tensile strength of concrete: Experimental and numerical investigations," *Construction and Building Materials*, vol. 417, p. 135249, 2024.
- [27] A. Noor, R. Ilyas, S. Sapuan, R. Ibrahim, M. Atikah, M. Asrofi and A. Atiqah, "Characterization studies of biopolymeric matrix and cellulose fibres based composites related to functionalized fibre-matrix interface," *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites*, pp. 29-93, 2020.
- [28] Más-López, M. I., García Del Toro, E. M., García-Salgado, S., Alcalá-González, D., & Pindado, S., «Application of concretes made with glass powder binder at high replacement rates. Materials,» vol. 14, p. 14, 2021a.
- [29] Naran, J. M., Gonzalez, R. E. G., del Rey Castillo, E., Toma, C. L., Almesfer, N., van Vreden, P., & Saggi, O., «Incorporating waste to develop environmentally-friendly concrete mixes. Construction and Building Materials,» vol. 125599, p. 314, 2022.
- [30] Djomo, S. A., Kouakou, C. H., Kouadio, K. C., Boffoue, M. O., Emeruwa, E., Djomo, S. A., Kouakou, C. H., Kouadio, K. C., Boffoue, M. O., & Emeruwa, E., «Effect of Sand Partial Substitution for Glass Powder on the Behaviour of Sand-Cement Mortar. Materials Sciences and Applications,» vol. 12, nº 756–767, p. 10, 2024.

- [31] Magni Darwich Higuchi, A., Gorett dos Santos Marques, M., Farias Ribas, L., & Pereira de Vasconcelos, R., «Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*,» vol. 124640, p. 304, 2021.
- [32] Ming, Y., Li, L., Ren, H., Chen, P., & Chen, X., «Study on the Binary Hydraulic Kinetics Model of Glass Powder-Cement: Numerical Simulation,» vol. 16, nº 5, p. 1957, 2023.
- [33] Serelis, E., Vaitkevicius, V., Hilbig, H., Irbe, L., & Rudzionis, Z., «Effect of ultra-sonic dispersion time on hydration process and microstructure development of ultra-high performance glass powder concrete. *Construction and Building Materials*,» p. 298, 2021.
- [34] Shetty, P. P., Rao, A. U., Pai, B. H. V., & Kamath, M. V., «Performance of High-Strength Concrete with the Effects of Seashell Powder as Binder Replacement and Waste Glass Powder as Fine Aggregate,» *Journal of Composites Science*, vol. 7, nº 3, p. 92, 2023.
- [35] M. R. S. M. M. M. M. H. & R. F. Bameri, «Evaluation of Mechanical and Durability Properties of Eco-Friendly Concrete Containing Silica Fume, Waste Glass Powder, and Ground Granulated Blast Furnace Slag,» *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- [36] Chandra Sekhar, M., Kumar, M. H., Lova Raju, S., & Saikrishnamacharyulu, I., «Influence of Metakaolin and glass powder on mechanical behaviour of concrete,» *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [37] Arbeláez Pérez, Ó. F., Senior-Arrieta, V., Rúa Suárez, A. F., Carvajal Jaramillo, J., & Lasso Cerón, C. A., «Influence of glass powder on environmental, thermal and mechanical performance of concrete containing rice husk ash,» *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2023.
- [38] A. M. S. & R. V. V. Baikerikar, «Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete,» *Construction and Building Materials*, p. 377, 2023a.
- [39] Martina, N., Kinanti, M. D., Hasan, M. F. R., Agung, P. A. M., & Setiawan, Y., «THE USE OF GLASS POWDER WASTE AS A PARTIAL SUBSTITUTE FOR CEMENT ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE,» *GEOMATE Journal*, vol. 98, nº 197–204, p. 23, 2022a.
- [40] Martina, N., Kinanti, M. D., Hasan, M. F. R., Agung, P. A. M., & Setiawan, Y., «THE USE OF GLASS POWDER WASTE AS A PARTIAL SUBSTITUTE FOR CEMENT ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE,» *International Journal of GEOMATE*, vol. 98, nº 197–204, p. 23, 2022b.
- [41] Paul, D., Bindhu, K. R., Matos, A. M., & Delgado, J., «Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution,» *Construction and Building Materials*, p. 355, 2022.
- [42] Selvakumar, M., Geetha, S., Kasturi Rangan, S., Sithrubi, T., & Sathyashriya, K., «Effect of glass powder as partial fine aggregate replacement on properties of basalt fibre reinforced concrete,» *Materials Today: Proceedings*, nº 1460–1464, p. 43, 2021.
- [43] Ayub, A., Ayub, T., Jamil, T., & Khan, A. ur R., «Mechanical and Durability Properties of High-Strength Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete Containing Waste Glass Powder,» *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 5, nº 2911–2930, p. 47, 2023.
- [44] Dhanabal, P., & Sushmitha, K. S., «Effect of iron ore tailing and glass powder on concrete properties,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 1, nº 47–57, p. 37, 2022.
- [45] Anandaraj, S., Raja, K., Mohamad Abbas, M., Madan Kumar, T., Varatharajan, K., & Nivashini, N., «Experimental study on luffa fiber reinforced concrete using glass powder as cement replacement,» *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [46] Elaqla, H. A., Haloub, M. A. A., & Rustom, R. N., «Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 75, nº 82, p. 203, 2020.

- [47] Rajendran, R., Sathishkumar, A., Perumal, K., Pannirselvam, N., Lingeshwaran, N., & Babu Madavarapu, S., «An experiment on concrete replacing binding material as waste glass powder,» *Materials Today: Proceedings*, nº 5447–5450, p. 47, 2021a.
- [48] Bahadur, R., & Kumar Parashar, A., «An investigation of waste glass powder with the substitution of sand on concrete mix,» *Materials Today: Proceedings*, 2023a.
- [49] Bahadur, R., & Kumar Parashar, A., «An investigation of waste glass powder with the substitution of sand on concrete mix,» *Materials Today: Proceedings*, (2023b).
- [50] Rajendran, R., Sathishkumar, A., Perumal, K., Pannirselvam, N., Lingeshwaran, N., & Babu Madavarapu, S., «An experiment on concrete replacing binding material as waste glass powder,» *Materials Today: Proceeding*, nº 5447–5450, p. 47, 2021b.
- [51] Chand, G., Happy, S. K., & Ram, S., «Assessment of the properties of sustainable concrete produced from quaternary blend of portland cement, glass powder, metakaolin and silica fume,» *Cleaner Engineering and Technology*, p. 4, 2021.
- [52] M. I. G. D. T. E. M. G.-S. S. A.-G. D. & P. S. Más-López, «Application of concretes made with glass powder binder at high replacement rates. Materials,» p. 14, 2021b.
- [53] Moura, J. M. B. M. de, Pinheiro, I. G., Aguado, A., & Rohden, A. B., «Sustainable pervious concrete containing glass powder waste: Performance and modeling,» *Journal of Cleaner Production*, p. 316, 2021.