

Proyecto Final de Carrera previo a la obtención del título de Arquitecto/a.

ARQ.  
Carlos Contreras Lojano

DIRECTOR:

Ana Paula Espinoza  
Angel David Paredez

AUTORES:

Escuela de Arquitectura

Experimentación de elementos  
de construcción, a partir del aprovechamiento  
de residuos industriales cerámicos



2025  
Cuenca, Ecuador





# DEDICATORIA

---

A mis padres y hermana, Iván, María Caridad y Ariana, por su apoyo incondicional, por todo su cariño y generosidad, y por estar en el punto de partida y de regreso en cada etapa de mi vida.

A mi familia, por su amor, apoyo y compañía en este camino, y a mis abuelos, cuya sabiduría, y cariño han sido una fuente constante de inspiración.

Ana Paula Espinoza

A mis abuelos Ángel & Jorge, mis modelos a seguir y mi mayor fuente de inspiración; mis abuelas Nancy & Martha, por su amor y sabiduría.

A mis padres Clever y Angelica, mis hermanos Klever, Paula y Anais, cuyo apoyo incondicional y cariño han sido mi mayor inspiración y fortaleza a lo largo de este camino.

Angel David Paredez

## AGRADECIMIENTO

---

A nuestro director Carlos Contreras, por su motivación, interés y acompañamiento en este proceso.

A la Empresa Predelca, por su tiempo y apoyo para poder hacer de este proyecto realidad.

A nuestro tribunal, Pablo Ochoa y Pedro Samaniego por su contribución a siempre mejorar.

Ana Paula & Angel David

A mis padres, por acompañarme en cada desafío y ser mi fuente de admiración, dándome el ejemplo para alcanzar cada una de mis metas.

A Angel, por compartir conmigo esta experiencia con compromiso, paciencia y dedicación. Gracias por transmitirme tus conocimientos, mantener el ánimo a lo largo de todo este proceso y dar siempre lo mejor de ti en nuestro trabajo.

Ana Paula Espinoza

A Ana Paula por confiar en mí y darme la mano cuando más lo necesite, por tu acompañamiento en todo el camino, el estrés y los momentos de agobio; así como por tu amistad incondicional.

Angel David Paredez

# ÍNDICE

---

	<b>Marco Teórico &amp; Estado del Arte</b>	<b>Metodología</b>	
Problemática & Justificación.....	12		
Pregunta de Investigación.....	16		
Hipótesis.....	16		
Objetivo General.....	17		
Objetivos Específicos.....	17		
	1.1 Reutilización de Residuos Industriales en la Construcción.....	20	
	1.2 Residuos y su Tratamiento: Empresa Rialto.....	24	
	1.3 Análisis de Referente: Elementos a base de residuos cerámicos.....	28	
	1.4 Tratado del Hormigón: Empresa Predelca.....	34	
	1.5 Casos de Estudio.....	40	
		2.1 Campaña experimental.....	48
		2.2 Variables.....	49
		2.3 Herramientas Metodológicas.....	50

---

## Experimentación de los Elementos Constructivos

3.1 Pruebas de Laboratorio de los Residuos Cerámicos.....	54
3.2 Ensayos de incorporación del residuo cerámico en el hormigón.....	66
3.3 Diseño y construcción del elemento constructivo.....	84
3.4 Pruebas según la Normativa para elementos prefabricados de Hormigón.....	88

## Discusión & Conclusiones

4.1 Costos de producción.....	96
4.2 Resultados.....	102
4.3 Conclusiones.....	106

## Bibliografía & Anexos

5.1 Bibliografía.....	112
5.2 Imágenes.....	114
5.3 Tablas.....	115

---

## Resumen

Esta investigación abordó la problemática del aprovechamiento de residuos cerámicos como sustituto parcial del agregado grueso en hormigón. El objetivo fue validar su viabilidad técnica, económica y operativa mediante una metodología experimental en cuatro fases. Tras optimizar la mezcla con aditivos y tratamientos previos, se fabricó un panel prefabricado a escala real, evaluando su comportamiento en compresión y flexión. Los resultados demostraron que, con ajustes específicos, es posible obtener un material resistente y estable, adecuado para elementos constructivos sin alterar los procesos convencionales.

## Palabras Clave

Áridos Gruesos, Sostenibilidad, Ensayos de Laboratorio, Hormigón Arquitectónico, Dosificación.

---

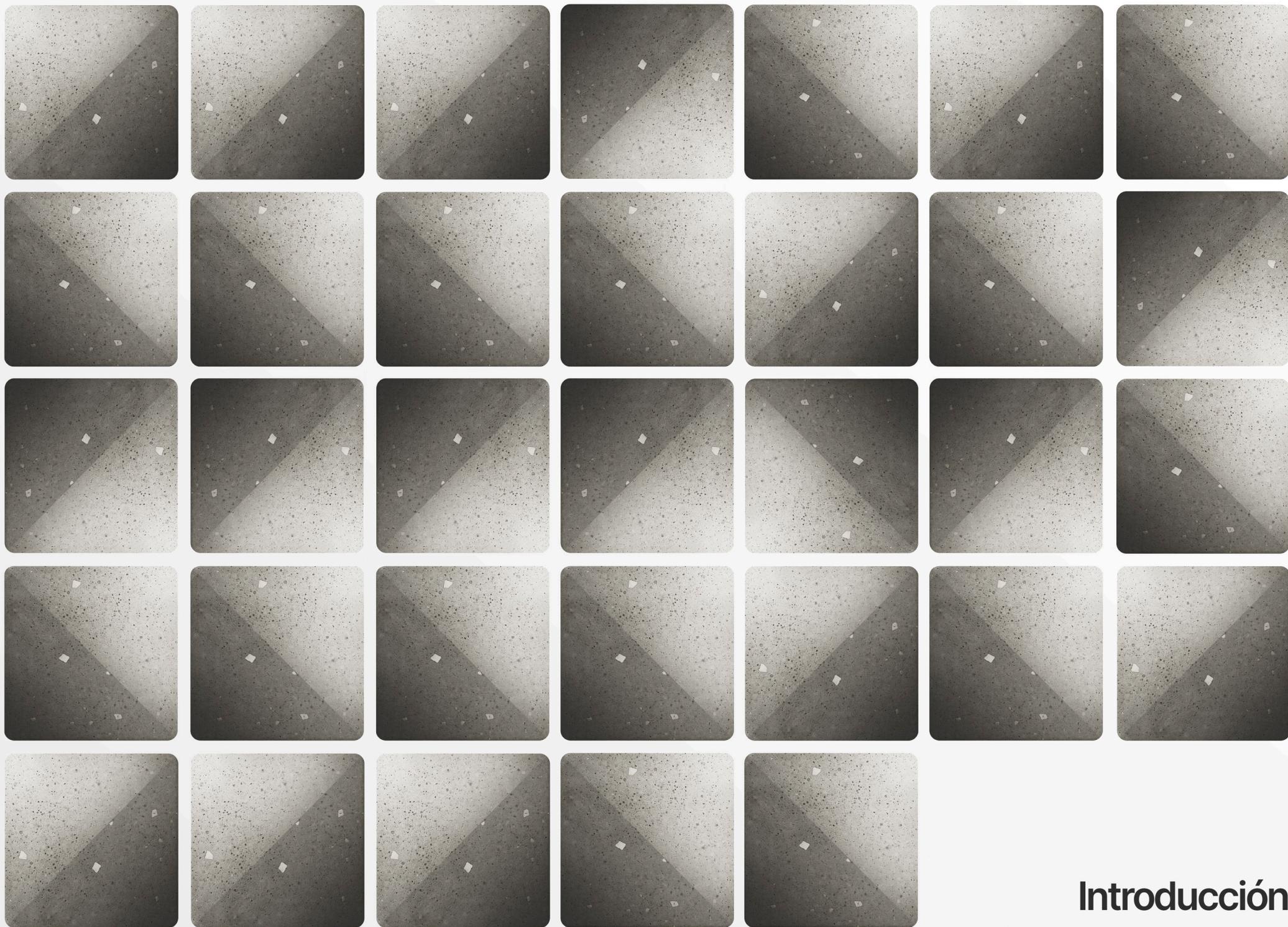
## Abstract

This research addressed the issue of utilizing ceramic waste as a partial replacement for coarse aggregate in concrete. The objective was to validate its technical, economic, and operational feasibility through a four-phase experimental methodology. After optimizing the mixture with additives and pre-treatment, a full-scale prefabricated panel was manufactured and evaluated for its compressive and flexural performance. The results demonstrated that, with specific adjustments, it is possible to obtain a strong and stable material suitable for construction elements without altering conventional processes.

## Keywords

Coarse aggregates, Sustainability, Laboratory tests, Architectural concrete, Mix design.





**Introducción**

## PROBLEMÁTICA & JUSTIFICACIÓN

---

La industria de la construcción es actualmente uno de los principales responsables de generar impactos ambientales negativos, especialmente a través de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)(Kabirifar, et al., 2020). Estos residuos, en muchos casos, son arrojados en sitios no autorizados, lo que provoca una acumulación descontrolada en ríos, mares y terrenos baldíos. A esta problemática se suma la creciente demanda de materiales de construcción a nivel global y local, que ha intensificado la explotación excesiva de recursos naturales como la arena, la grava y la piedra (Torres et al., 2017).

Se puede afirmar con certeza, que el sector de la construcción contribuye significativamente a la contaminación global, siendo responsable del 23% de las emisiones atmosféricas y del 40% de la contaminación del agua, según cifras publicadas en la revista científica *Environmental Studies Journal* (Olapejo, et al., 2020). En este contexto, se subraya la importancia de gestionar adecuadamente los residuos y, en la medida de lo posible, buscar alternativas para su reutilización.

En respuesta a esta problemática, la propuesta de nuevos materiales elaborados a partir de residuos re-

ciclados se presenta como una solución innovadora y necesaria para la industria. Al reutilizar desechos que tradicionalmente se descartan, estas iniciativas no solo ofrecen alternativas viables para reducir la huella de carbono, sino que también fomentan prácticas más sostenibles. Al convertir los residuos en recursos valiosos, se amplía el repertorio de materiales disponibles para la construcción, lo que reduce la dependencia de materias primas contaminantes.

Este enfoque no sólo aspira a mitigar el impacto ambiental, sino que también abre nuevas oportunidades para el uso creativo y eficiente de los materiales reciclados, impulsando un cambio positivo en el sector.

En la ciudad de Cuenca, de acuerdo con los datos proporcionados por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) y su base de cálculo generado en 2023, cada ciudadano de la ciudad genera 0,56 kilogramos de desechos sólidos. Los grandes generadores de residuos alcanzando cantidades mayores a 3200 litros de escombros al día son las empresas dedicadas a la manutención de elementos constructivos, tal como se evidencia en la **Imagen 1**, estos materiales como el hormigón, ladrillo, cerámica, etc.

Por este motivo, la presente investigación propone desarrollar una colaboración con la empresa Rialto, dedicada a la producción de productos cerámicos y porcelanatos desde 1982, con el objetivo de aprovechar estos materiales de manera más eficiente y sostenible. Esta empresa genera un residuo común en sus procesos, conocido como “pasta monoquema”, el cual proviene del excedente de productos cerámicos. Estos residuos se trituran y se mezclan con arcillas frescas y otros componentes para crear una nueva pasta que se pueda esmaltar y cocer en un solo paso (monococción).

Aunque Rialto reutiliza un pequeño porcentaje de esta pasta en su producción, se encuentra limitada por los estándares de seguridad establecidos por la normativa ISO 9001, lo que les impide incorporar una mayor cantidad de este material. Como resultado, la acumulación de pasta monoquema continúa, representando un desafío tanto ambiental como productivo para la empresa. Es fundamental encontrar un nuevo uso para este material, que no solo se acumula en grandes cantidades, sino que también se dispersa inadecuadamente, causando un impacto ambiental considerable.

Imagen 1: Residuos de construcción de Rialto



Fuente: Autoría Propia

La reutilización de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) ya no debe considerarse simplemente como una oportunidad o una innovación aislada, sino como una necesidad real dentro del sector de la construcción. En un contexto global donde el desarrollo sostenible es prioritario, la gestión eficiente de estos residuos debe ser una realidad adoptada de manera generalizada. Las enormes cantidades de desechos generados en la construcción, como se representan en la Imagen 2, deben ser optimizadas, promoviendo la transformación de los excedentes en nuevos materiales y productos que cumplan con los estándares y las demandas de la edificación moderna.

Este enfoque no solo ayuda a mitigar el impacto ambiental, sino que también permite reducir la dependencia de recursos naturales, impulsando una industria más responsable y comprometida con el entorno. De este modo la investigación se enfocará en la problemática de los residuos cerámicos, planteando la siguiente interrogante: ¿De qué manera es posible reciclar y optimizar los desechos generados por los elementos cerámicos, y aprovecharlos en la construcción sostenible?

Imagen 2: Planta Industrial de Rialto



Fuente: Rialto (2018)

El texto aborda la problemática ambiental generada por los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), particularmente los derivados de la industria cerámica, y su impacto en la sostenibilidad del sector de la construcción. A partir de este contexto, se resalta la necesidad de reutilizar estos residuos mediante enfoques innovadores que prioricen la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental. Los RCD son una de las principales fuentes de contaminación ambiental, debido a su mala gestión y disposición inadecuada en vertederos no autorizados, ríos, mares y espacios públicos.

Este problema se agrava por la creciente demanda de materiales de construcción, lo que intensifica la explotación de recursos naturales como arena, grava y piedra. Además, el sector de la construcción es responsable de un significativo porcentaje de las emisiones de carbono y la contaminación del agua, según diversas investigaciones. Por lo tanto, abordar esta problemática requiere soluciones innovadoras, como la reutilización de residuos para la creación de nuevos materiales. La colaboración propuesta con la empresa Rialto es un ejemplo concreto de cómo aprovechar los residuos cerámicos generados durante el proceso de

---

monococción. La pasta monoquema, un subproducto de este proceso, presenta un alto potencial para ser reincorporada en la fabricación de elementos constructivos sostenibles.

Sin embargo, la empresa enfrenta limitaciones normativas que restringen el uso de mayores porcentajes de este material, lo que genera acumulaciones significativas y riesgos ambientales. Este desafío subraya la importancia de encontrar aplicaciones alternativas que maximicen el uso de este residuo, transformándolo en un recurso valioso. La investigación sugiere que la gestión eficiente de estos residuos cerámicos no debe ser vista como una opción, sino como una necesidad dentro del sector de la construcción. Al reutilizar los RCD, no solo se reduce la dependencia de recursos naturales, sino que también se mitiga el impacto ambiental del sector, promoviendo prácticas sostenibles.

Además, este enfoque fomenta la innovación y el desarrollo de materiales alternativos que cumplan con las exigencias de la construcción moderna. La problemática abordada en este estudio plantea una interrogante clave: ¿cómo transformar los desechos cerámicos en componentes constructivos sostenibles que contri-

buyan al desarrollo de una industria más responsable? En este sentido, la investigación no solo busca analizar la viabilidad técnica de estos materiales, sino también generar conciencia sobre la importancia de adoptar estrategias sostenibles en toda la cadena productiva de la construcción. Este enfoque puede ser replicado en otras industrias, promoviendo una transición hacia un modelo más circular que beneficie tanto al medio ambiente como a las comunidades.

---

## Pregunta de Investigación

¿Cómo reutilizar los residuos cerámicos industriales para generar elementos constructivos?

## Hipótesis

A través de los residuos cerámicos industriales, que han sido triturados, es posible desarrollar elementos constructivos, que tras someterse a las pruebas de la normativa, que cumplan con los estándares de calidad, en la industria de la construcción.

---

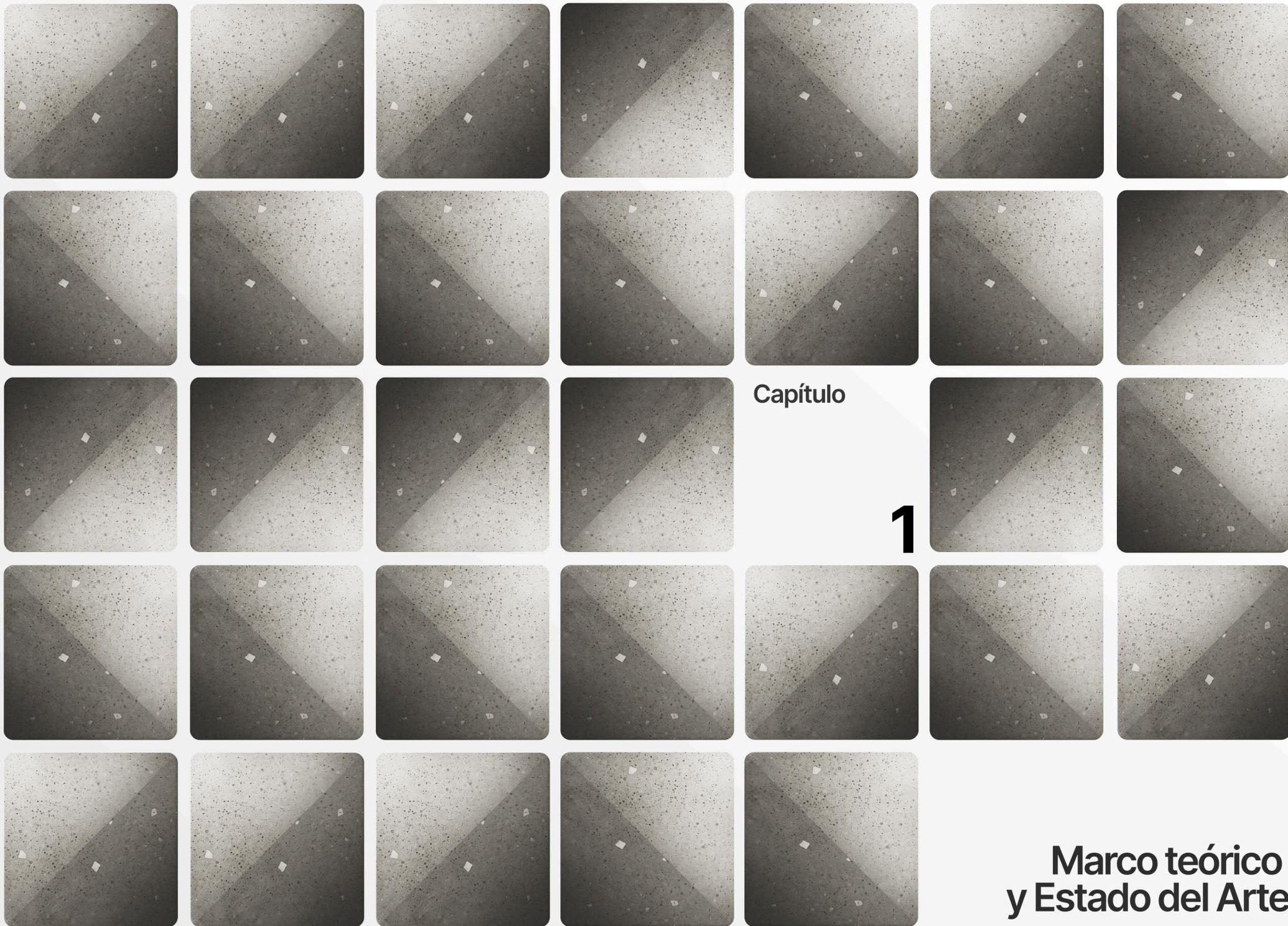
## Objetivo General

Desarrollar elementos constructivos utilizando residuos cerámicos triturados, que cumplan con los estándares de calidad establecidos por las normativas, mediante la realización de pruebas, para su aplicación en la construcción.

## Objetivos Específicos

1. Estudiar casos de reutilización de material cerámico, a través de la revisión de literatura.
2. Experimentar las propiedades obtenidas del material (pasta monoquema), y con ellas realizar una matriz de selección de posibles elementos constructivos a desarrollar.
3. Desarrollar un proceso experimental enfocada en la creación de elementos constructivos elaborado a partir de materiales cerámicos reciclados.
4. Evaluar el elemento constructivo según las pruebas de la normativa para corroborar su estándares de calidad, para su aplicación en la construcción.





Capítulo

1

**Marco teórico  
y Estado del Arte**

# REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN LA CONSTRUCCIÓN

---

Los residuos industriales en la construcción son materiales desechados o subproductos generados en proceso de fabricación pueden ser reciclados o reutilizados en elementos de infraestructura. Entre estos se incluyen concreto, ladrillos, madera, metales (como acero, aluminio y cobre), plásticos, asfalto, vidrio y productos químicos como pinturas, adhesivos y aditivos. También pueden usarse otros materiales que, aunque no suelen considerarse tradicionales, tienen propiedades que pueden aportar a la sostenibilidad y al rendimiento de los materiales de construcción (Castellas, L, s.f).

Reutilizar estos materiales en la construcción trae varios beneficios: reduce la cantidad de desechos que terminan en vertederos, disminuye la necesidad de extraer recursos naturales y puede mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales. Además, su aprovechamiento impulsa la economía circular y promueve prácticas más sostenibles en el sector (John Mungai Kinuthia, R.M. Nidzam, 2011). En Ecuador, el interés por el reciclaje de residuos industriales y su integración en procesos productivos, como la construcción, comenzó a destacarse a medida que aumentaban las preocupaciones por el impacto ambiental y

la sostenibilidad.

Desde 2021, con la aprobación de la Ley de Economía Circular Inclusiva, el país ha impulsado iniciativas para reutilizar materiales y reducir residuos, buscando crear procesos más sostenibles y responsables con el entorno, tal como se evidencia en la Imagen 3. Esta ley tiene como objetivo reducir residuos mediante su reutilización en diversas industrias, sobre todo la construcción, promoviendo un ciclo productivo más eficiente y sostenible (Anchatipán D. y Flores, N, 2022). Este enfoque también se ha reforzado gracias a la normativa del INEN (Servicio Ecuatoriano de Normalización), que exige a las industrias de construcción incorporar al menos un 8% de residuos en la fabricación de sus materiales.

El reciclaje de residuos en la construcción incluye diversos materiales como el concreto, que puede ser triturado y reutilizado en nuevas mezclas o pavimentos; metales como acero y aluminio, que son altamente reciclables; madera, que se puede transformar en tableros o reutilizar en nuevas estructuras; cerámica y azulejos, que, aunque complicados de reciclar, pueden ser utilizados como agregado; plásticos, que en

algunos casos se emplean en la fabricación de materiales compuestos; vidrio, que se reutiliza en nuevos productos o concreto; y residuos de yeso, que pueden reciclarse para producir paneles nuevos, siempre bajo un manejo cuidadoso (Schützenhofer, S., Kovacic, I., Rechberger, H., & Mack, S, 2022).

Estos materiales reciclados no solo son importantes por sus beneficios generales, sino que investigaciones recientes han profundizado en su potencial para aplicaciones específicas. Algunos ejemplos destacados de la reutilización de residuos industriales es la investigación de los ingenieros John Mungai Kinuthia y R.M. Nidzam, titulada “Hacia el desperdicio industrial cero: Utilización de residuos de polvo de ladrillo en la construcción sostenible.” en la cual se llevó a cabo mediante una serie de experimentos de laboratorio que evaluaron la efectividad del polvo de ladrillo y la ceniza de combustión como materiales estabilizadores, realizando pruebas de resistencia a la compresión y el índice de California Bearing Ratio (CBR) para determinar su desempeño mecánico.

Los resultados indicaron que la combinación de estos residuos industriales no solo mejoraba las propieda-

des mecánicas, sino que también contribuía a la reducción de residuos en la industria de la construcción, promoviendo prácticas más sostenibles y eficientes (John Mungai Kinuthia, R.M. Nidzam, 2011). Otro ejemplo importante la investigación de tesis doctoral del ingeniero químicos Alvaro Romero Esquinas, la cual se enfocó en la reutilización de residuos industriales de granulometría fina, como subproductos de plantas de mezclas bituminosas ( materiales utilizados en la construcción de pavimentos) y cenizas volantes de termoeléctricas, para su incorporación en hormigones autocompactantes (HAC).

A través de un análisis detallado de los materiales y un análisis experimental en estado fresco y endurecido, se evaluaron las propiedades mecánicas, microestructurales y de durabilidad de las mezclas. Los resultados demostraron que es posible sustituir parcial o totalmente el filler comercial por estos residuos, obteniendo hormigones con rendimiento mecánico y resistencia ambiental superiores a los requisitos mínimos de las normativas. Esto valida su potencial para promover una construcción más sostenible y optimizar recursos naturales.

Imagen 3: Producción Empresa Rialto.



Fuente: Rialto (2018)

Imagen 4: Clasificación de residuos de Rialto.



Fuente: Rialto (2018)

Los residuos industriales generados en el sector de la construcción, al ser gestionados y reciclados de manera adecuada, pueden convertirse en valiosos recursos para la producción de nuevos materiales de construcción. La reutilización de estos residuos no solo tiene un impacto ambiental positivo, sino que también mejora la eficiencia de los procesos productivos y reduce la dependencia de materias primas vírgenes, como se demuestra en la Imagen 4, contribuyendo así a la economía circular. Entre los materiales más comunes que se pueden reciclar en la construcción se encuentran el concreto, los metales (como el acero y el aluminio), la madera, los plásticos, el vidrio, y productos cerámicos.

Sin embargo, existen residuos menos convencionales, como las cenizas de combustión o el polvo de ladrillo, que también pueden ser utilizados para mejorar las propiedades de los materiales de construcción. Por ejemplo, el polvo de ladrillo ha mostrado, según estudios de Kinuthia y Nidzam (2011), un significativo potencial como estabilizador de suelos y agregado para la mejora de propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y el índice de California Bearing Ratio (CBR). El reciclaje de estos residuos ayuda

---

a mitigar los impactos ambientales negativos que la industria de la construcción genera. Según estudios recientes, el sector es responsable de aproximadamente el 40% de los residuos sólidos del mundo, y su contribución a la contaminación ambiental es alarmante.

En este sentido, la implementación de políticas como la Ley de Economía Circular Inclusiva en Ecuador (2021) busca fomentar la reutilización de estos residuos, promoviendo una industria más sostenible que aproveche los materiales reciclados en lugar de seguir extrayendo recursos naturales. Además, la legislación del INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) establece que, a partir de 2022, las industrias de la construcción deben incorporar al menos un 8% de residuos en sus procesos de fabricación, impulsando así un cambio hacia prácticas más responsables. De acuerdo con la normativa, no solo los residuos de concreto pueden ser reciclados, sino también otros materiales como plásticos y vidrio, que, aunque en un principio eran considerados difíciles de reciclar, han mostrado ser viables en la producción de nuevos elementos constructivos.

Un ejemplo significativo de este tipo de innovación

es el trabajo de Alvaro Romero Esquinas, quien investigó la reutilización de residuos industriales finos, como las cenizas volantes y los subproductos de plantas de mezclas bituminosas. Su estudio demostró que la incorporación de estos materiales en hormigones autocompactantes (HAC) no solo mejora las propiedades mecánicas del material, sino que también ofrece un rendimiento superior a los estándares de la industria. Este enfoque permite sustituir parcialmente los aditivos comerciales por estos residuos, lo que no solo optimiza los recursos naturales, sino que también reduce la huella de carbono del sector.

Así, el reciclaje de residuos industriales en la construcción se presenta no solo como una respuesta a los problemas ambientales, sino como una oportunidad para mejorar la calidad de los materiales de construcción, abrir nuevas posibilidades de investigación y fomentar el desarrollo de una economía más circular y sostenible.

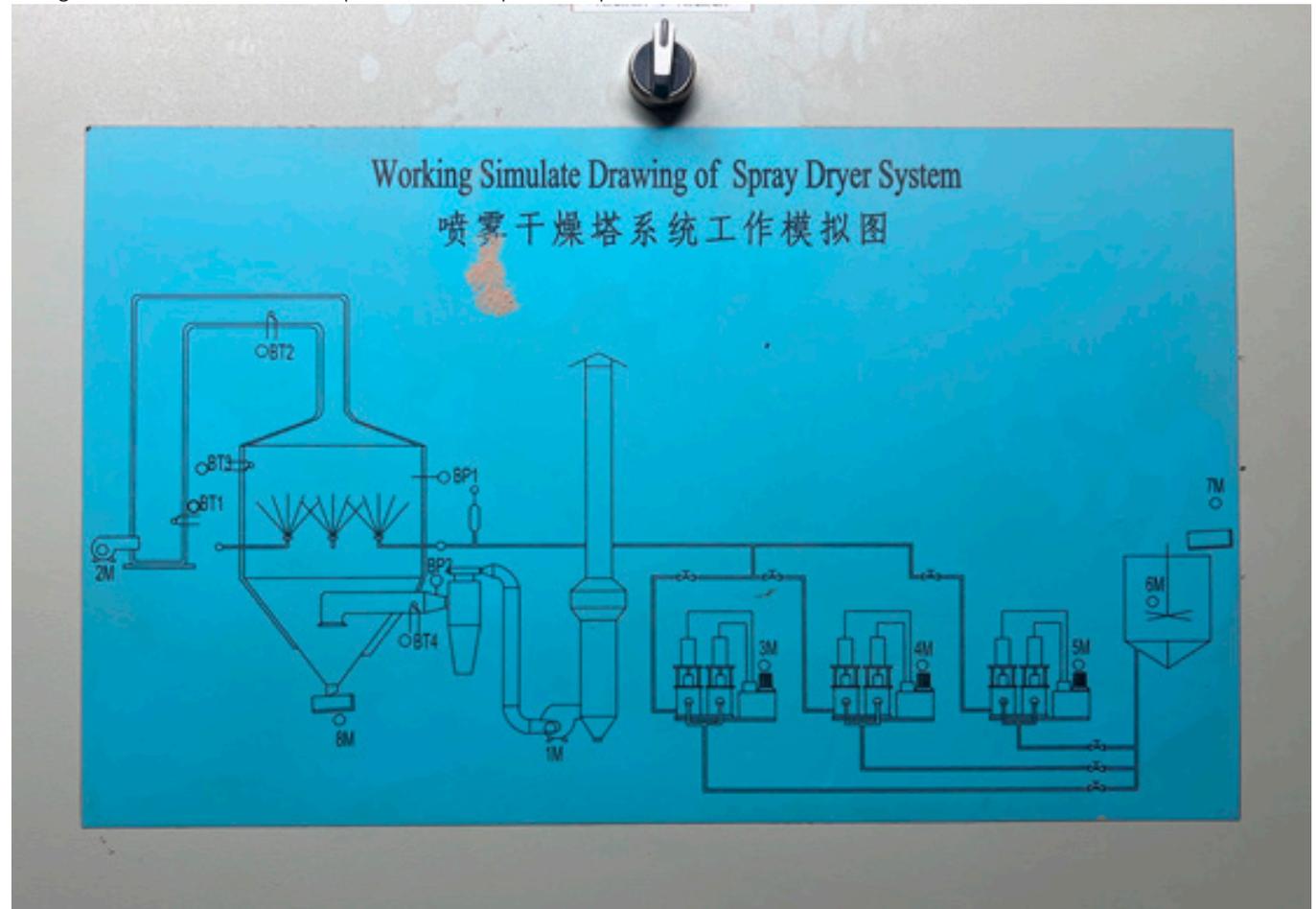
## RESIDUOS Y SU TRATAMIENTO: EMPRESA RIALTO

La gestión de residuos es un aspecto importante en cualquier industria, especialmente en aquellas vinculadas a la producción de elementos constructivos, como es el caso de la empresa Rialto. La correcta disposición, reutilización y tratamiento de los residuos generados no solo tiene un impacto directo en la sostenibilidad ambiental, sino que también marca y optimiza los procesos internos y refuerza el compromiso de la empresa con la responsabilidad social y medioambiental. Rialto produce más de 420.000 metros cuadrados de pisos mensualmente, de ellos, alrededor del 5% son residuos debido a que gracias a su adopción de buenas prácticas operativas han reducido en un 12% la cantidad de residuos.

En el contexto de Rialto, la producción cerámica genera diferentes tipos de residuos, desde barbotinas hasta sobrantes de esmaltes y polvos atomizados, los cuales requieren de estrategias específicas para minimizar su impacto. Todo el proceso de producción de estos residuos se reflejan en la Imagen 5, que detallan el proceso del atomizador que se explicara a continuación.

Para obtener la pasta monoquema como residuo industrial, es necesario entender primero el proceso de

Imagen 5: Proceso de la Empresa, monoquema - porcelanato.



Fuente: Autoría propia

---

fabricación de productos cerámicos, ya que este es el origen de los desechos que luego serán transformados, por lo que se llevó a cabo una visita técnica a la empresa, guiada por el Ingeniero Flavio Abad, responsable del proceso de producción. Durante esta visita, el ingeniero proporcionó una explicación detallada sobre cada etapa del proceso productivo, destacando los métodos, materiales y tecnologías utilizados en la planta para garantizar la eficiencia y calidad de los productos fabricados.

El proceso de fabricación de placas cerámicas monoquema inicia con la molienda del material en molinos industriales de gran capacidad, donde se mezcla con agua y un líquido dispersante. Esta combinación permite que los componentes se mantengan en una pasta fluida. Durante, se controla cuidadosamente parámetros como la densidad, viscosidad y el residuo presente en la mezcla. Posteriormente, la pasta se transfiere a cisternas en constante movimiento, evitando así su sedimentación. La pasta preparada, conocida como "barbotina", pasa a un atomizador, que tiene la función de transformarla en un polvo granulado. Este proceso reduce el contenido de humedad de la pasta, inicialmente al 36%, hasta un nivel final del 6%.

El atomizador produce microesferas huecas que forman el polvo cerámico. Este material, que constituye la base para el cuerpo de la baldosa, es almacenado en silos cilíndricos durante un periodo de reposo que puede variar entre 6 y 12 horas, garantizando la estabilidad de sus propiedades. El polvo cerámico se introduce posteriormente en prensas de alta capacidad, donde se aplica una presión de 30 bares, seguida de 10 bares, para dar forma al cuerpo de la baldosa. Estas prensas permiten trabajar con distintos formatos y diseños según las necesidades del producto final. Durante esta fase, se realizan pruebas de compactación y resistencia mecánica para asegurar la calidad del producto. El cuerpo de la baldosa es muy frágil en este punto, por lo que se maneja cuidadosamente para evitar daños.

Finalmente, las baldosas prensadas pasan por un proceso de secado y pre-cocción (Imagen 6). Este tratamiento térmico, que alcanza temperaturas de hasta 250 °C, refuerza la resistencia del material antes de las etapas finales de esmaltado y cocción. Este método asegura un producto de alta calidad, adecuado tanto para acabados de cerámica como de monococción estándar. Este es uno de los dos puntos clave donde se

generan residuos reciclables. La pasta monoquema se puede originar en dos puntos de la producción de la cerámica y pueden clasificarse en:

**-Residuos crudos:** Fragmentos de material no conocido, como polvos sobrantes del atomizador o piezas defectuosas durante el prensado.

**-Residuos cocidos:** Provenientes de productos que han pasado por el horno pero presentan defectos o fallas.

En el caso de los residuos cerámicos crudos se reincorporan al proceso de producción mediante una serie de pasos. Primero, se realiza la trituración y molienda de los residuos sólidos hasta obtener partículas finas. Luego, el material triturado se mezcla con agua y defloculantes para obtener una pasta homogénea, similar a la barbotina original. Posteriormente, la barbotina reciclada pasa por un atomizador para convertirla en polvo atomizado, que se utilizará en la producción de nuevas piezas.

En el caso de los residuos cocidos, que son más difíciles de reutilizar, se someten a un proceso de molienda intensiva para obtener partículas finas, que pueden ser utilizadas como aditivos en la fabricación de nue-

Imagen 6: Proceso de secado y pre-cocción.



Fuente: Rialto (2018)

vas pastas o como agregado en otros sectores, como la construcción. Este enfoque promueve la economía circular, contribuyendo a la reducción significativa del impacto ambiental.

Al abordar los residuos cerámicos que serán utilizados en esta investigación, nos encontramos con la denominada pasta monoquema y sus dos principales presentaciones, las cuales representan una oportunidad para la reutilización de estos desechos en el ámbito de la construcción. Su acumulación se genera en dos montículos diferenciados según el tamaño y el proceso de obtención de sus partículas.

El primero de estos es conocido como Chamote Monoquema (Imagen 7), el cual está compuesto por partículas de mayor tamaño y es considerado un árido grueso. Su estructura y granulometría le otorgan características que pueden ser aprovechadas en la elaboración de materiales de construcción, como concreto y morteros con agregados reciclados.

Por otro lado, el segundo montículo corresponde al Recuperado Monoquema (Imagen 8), un material proveniente de una fase distinta den-

tro del proceso industrial de la cerámica, caracterizado por un tamaño de partícula más fino.

Ambos tipos de residuos son sometidos a procesos específicos dentro de la fábrica para desarrollar la pasta monoquema en sus diferentes presentaciones, cada una con propiedades singulares que determinan su posible aplicación en la industria de la construcción. Debido a su origen y composición, estos residuos pueden ser reincorporados en el proceso de fabricación de productos cerámicos o utilizados en nuevas aplicaciones dentro de la producción de elementos constructivos.

Uno de los aspectos clave de este estudio es evaluar la viabilidad de integrar estos residuos en la producción de hormigón, analizando su influencia en las propiedades mecánicas, físicas y químicas del material resultante. Para ello, se realizarán pruebas de laboratorio que permitan caracterizar las propiedades de estos residuos cerámicos y determinar su comportamiento en distintas proporciones dentro de la mezcla de hormigón.

El objetivo principal de este proceso es reducir el impacto ambiental generado por los residuos industriales, promoviendo su reutilización en lugar

de su disposición final en vertederos. Además, se busca optimizar los recursos disponibles en la industria de la construcción, desarrollando materiales sostenibles que mantengan o incluso mejoren el rendimiento de los productos convencionales.

En este contexto, es fundamental considerar la dosificación adecuada de estos materiales dentro de las mezclas, asegurando que su incorporación no afecte negativamente la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del hormigón. A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, se definirán las proporciones óptimas de Chamote Monoquema y Recuperado Monoquema en la producción de elementos prefabricados de hormigón.

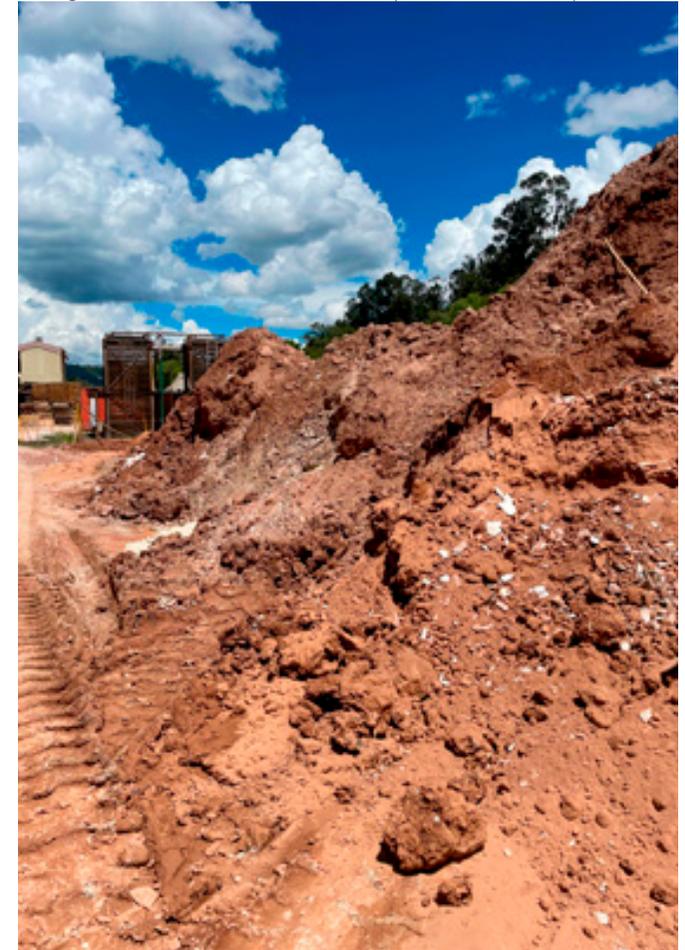
Finalmente, el análisis de estos residuos no solo permitirá evaluar su viabilidad técnica, sino que también abrirá nuevas oportunidades para la economía circular dentro de la industria de la construcción. Al transformar desechos industriales en materiales reutilizables, se contribuye a la reducción del impacto ambiental y se fomenta una construcción más eficiente y sostenible.

Imagen 7: Montículo de “Chamote Monoquema”.



Fuente: Autoría Propia

Imagen 8: Montículo de “Recuperado Monoquema”.



Fuente: Autoría Propia

# ANÁLISIS DE REFERENTE: ELEMENTOS A BASE DE RESIDUOS CERÁMICOS

Los elementos constructivos fabricados a partir de materiales cerámicos poseen una amplia variedad de aplicaciones, que abarcan desde la ornamentación y la construcción hasta la fabricación de sanitarios, productos refractarios y tuberías. Sin embargo, el manejo inadecuado de los residuos cerámicos ha provocado un impacto ambiental significativo, afectando tanto a las industrias como al entorno natural.

Este problema se agrava por el hecho de que las grandes industrias son las principales generadoras de escombros cerámicos, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras para su reutilización. En este contexto, se ha llevado a cabo una revisión de proyectos destacados que emplean cerámica reciclada para desarrollar nuevos elementos constructivos.

## Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles

Autores: Rocío Santos Jimenez

Ubicación: Madrid, España

La presente investigación se centra en la reutilización de residuos cerámicos de construcción y demolición (RCD) para la elaboración de nuevos materiales de construcción sostenibles, específicamente en la incorporación de estos residuos como adición en matrices de yeso. El objetivo principal fue desarrollar compuestos de escayola con distintos porcentajes y granulometrías de residuo cerámico, buscando maximizar la sustitución de materia prima tradicional por residuo reciclado, con el fin de reducir el impacto ambiental asociado al consumo de yeso y la gestión de residuos en el sector construcción.

El estudio se estructuró en varias fases experimentales, iniciando con la identificación y clasificación de los tipos de residuos cerámicos disponibles, procedentes de fábricas, obras nuevas y obras de rehabilitación, con diferentes niveles de pureza y composición. Se seleccionó la escayola E-35 como base para la elaboración de probetas, debido a sus características técnicas y amplia aplicación en revestimientos interiores.

Se prepararon distintas mezclas de escayola con diferentes proporciones de residuo cerámico, variando desde bajas hasta altas cantidades de sustitución de

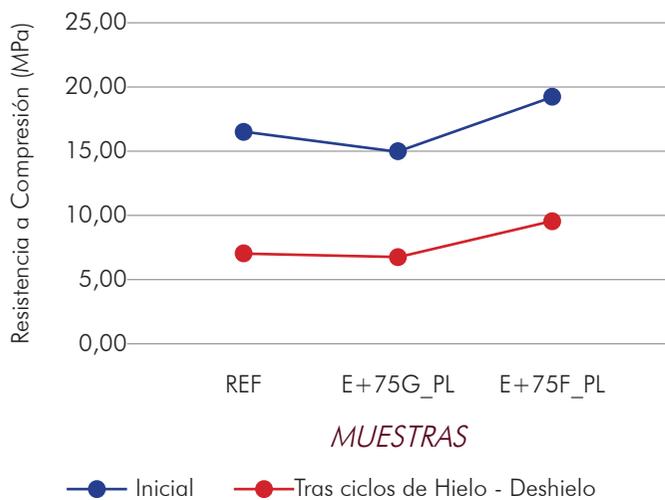
la materia prima convencional. Para cada mezcla, se modificó la cantidad de agua que se usó para hacer la pasta, porque según el tipo de residuo, la pasta absorbe diferente cantidad de agua, y esto afecta qué tan fácil es trabajarla y aplicarla.

Se fabricaron probetas con estas mezclas para someterlas a ensayos físicos y mecánicos. Entre los ensayos realizados destacaron la medición de la dureza superficial, la absorción de agua por capilaridad, la adherencia y las resistencias a flexión y compresión. Además, se evaluó cómo el tamaño de las partículas del residuo influía en las propiedades finales del material. Los residuos de mayor tamaño mostraron una mejora en la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia al agua, mientras que los finos facilitaron un mejor manejo y aplicación de la mezcla.

Un aspecto importante observado fue la resistencia a compresión antes y después de someter las muestras a ciclos de hielo y deshielo, simulando condiciones de exposición ambiental. Como se muestra en la [Tabla 1](#), los valores iniciales de resistencia a compresión fueron superiores para todas las mezclas; sin embargo, tras cinco días de ciclos de hielo-deshielo, se observa que

la muestra con mayor porcentaje de residuo cerámico (75% Fino) mantuvo una resistencia significativamente mayor (9.84 MPa) en comparación con la muestra de referencia (6.77 MPa), indicando una mejor durabilidad ante condiciones climáticas adversas.

Tabla 1: Comparación de la Resistencia a la compresión entre los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días de hielo - deshielo.



Fuente: Rocío Santos Jimenez (2018)

Según los resultados obtenidos, se eligió el residuo cerámico que ofrecía una mezcla fácil de manejar y con buenas características de resistencia. Se utilizó un porcentaje de sustitución de hasta un 75% de residuo cerámico en lugar de yeso convencional, logrando un producto final viable para su uso como revestimiento interior.

Para optimizar el proceso, se incorporaron aditivos retardadores de fraguado, como el PLAST RETARD, que permitió prolongar el tiempo de inicio del fraguado y mejorar la aplicabilidad en obra. Sin embargo, otros aditivos naturales probados, como la cal hidráulica, no cumplieron con los requerimientos de rendimiento deseados.

Finalmente, el compuesto seleccionado mostró un balance adecuado entre resistencia y trabajabilidad, manteniendo la resistencia a flexión del yeso convencional y mejorando la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, especialmente en mezclas con granulometría fina, lo que indica un buen desempeño estructural para su uso en la construcción.

Los autores concluyen que es viable la incorporación

de residuos cerámicos en matrices de yeso para la fabricación de materiales de construcción sostenibles, reduciendo la explotación de materias primas vírgenes y el impacto ambiental asociado a la producción de yeso. Se lograron cumplir los objetivos planteados, diseñando un material con hasta 75% de sustitución de materia prima, con propiedades mejoradas en aspectos claves como dureza superficial y absorción, que son fundamentales para aplicaciones en revestimientos interiores continuos.

Además, se resalta la importancia de continuar investigando en la optimización de aditivos y procesos para mejorar la aplicabilidad y prestaciones de estos materiales reciclados.

Teniendo en cuenta los resultados, esta investigación aporta una solución importante para crear materiales de construcción más sostenibles, ofreciendo una forma útil de aprovechar los residuos cerámicos que hoy en día suelen terminar en los vertederos. La incorporación del residuo cerámico en escayola no solo reduce el impacto ambiental, sino que también permite mejorar ciertas propiedades técnicas del material, lo que puede facilitar su aceptación en la industria.

## Reusing ceramic wastes in concrete

Autores: F. Pacheco-Torgal y S. Jalali

Ubicación: Guimarães, Portugal

El estudio de Pacheco-Torgal y Jalali (2010) aborda la problemática ambiental y económica generada por los residuos cerámicos de la industria, que suelen ser depositados en vertederos. La investigación evalúa la viabilidad de reutilizar estos residuos en la fabricación de concreto, reemplazando parcial o totalmente el cemento y los agregados tradicionales por polvo y agregados cerámicos.

La evaluación experimental se divide en dos fases: en la primera se reemplaza un 20% del cemento por polvo cerámico y en la segunda se sustituyen los agregados tradicionales por agregados cerámicos (arena y grava).

El proceso experimental incluyó la clasificación de residuos cerámicos según su tipo y proceso productivo, así como la caracterización química y mineralógica mediante técnicas de difracción de rayos X. En la

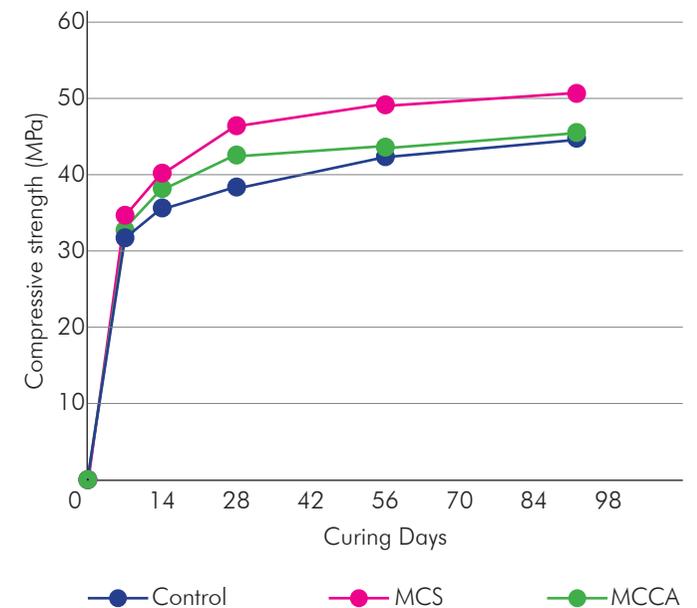
primera fase, se mezcló polvo cerámico molido con cemento Portland en proporción del 20%, utilizando arena y grava naturales. En la segunda fase, se reemplazaron los agregados tradicionales por agregados cerámicos prehumedecidos para evitar problemas de absorción.

Se diseñaron las mezclas usando el método Faury, manteniendo constante la relación agua/cemento y demás variables para facilitar la comparación. La resistencia a la compresión se midió a diferentes edades de curado (7, 14, 28, 56 y 90 días) y se realizaron pruebas de absorción de agua, permeabilidad, difusión de cloruros y envejecimiento acelerado para evaluar la durabilidad.

Los resultados muestran que el concreto con polvo cerámico presenta una ligera disminución en la resistencia mecánica, pero mejora la durabilidad por su actividad puzolánica, generando una microestructura más densa. En la segunda fase, la resistencia a la compresión fue superior en las mezclas con agregados cerámicos comparado con el control con agregados tradicionales, especialmente a partir de los 14 días. Como se puede observar en la **Tabla 2**, el concreto

con reemplazo de arena cerámica (MCS) y el concreto con agregado grueso cerámico (MCCA) presentan una mayor resistencia compresiva en comparación con el concreto control.

Tabla 2: Cuadro de Resistencias



Fuente: Pacheco-Torgal & Jalali (2010)

A partir del día 14, ambas mezclas con residuos cerámicos superan al control, alcanzando resistencias próximas a los 50 MPa, mientras que el control se mantiene alrededor de 46 MPa. Esta diferencia indica que el uso de agregados cerámicos no solo es viable, sino que puede potenciar el desempeño mecánico del concreto, aportando además beneficios en términos de durabilidad y sostenibilidad.

Los autores concluyen que la incorporación de polvo cerámico como reemplazo parcial del cemento es una solución viable para reducir el impacto ambiental y el costo del concreto, sin comprometer significativamente la resistencia y mejorando la durabilidad. El reemplazo de arena tradicional por arena cerámica es altamente favorable, pues no genera pérdidas de resistencia y mejora el comportamiento frente a la absorción y permeabilidad.

Por otro lado, el uso de agregados gruesos cerámicos mostró resultados prometedores, aunque con un leve aumento en absorción y permeabilidad, lo que posiciona la arena cerámica como la mejor opción para sustitución. En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial de reutilizar residuos cerámicos en la indus-

tria del concreto para una construcción más sostenible (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

Este estudio nos muestra una opción sólida y sostenible para aprovechar los residuos cerámicos, ayudando a cerrar el ciclo de materiales en la construcción. Además de cuidar el medio ambiente, reutilizar el polvo y los agregados cerámicos mejora la durabilidad y ofrece una resistencia adecuada, lo que lo hace no solo ecológico, sino también efectivo desde el punto de vista técnico.

De hecho, las mezclas que incluyen estos agregados han demostrado un rendimiento incluso mejor en estructuras, sobre todo en cuanto a la resistencia a la compresión, lo que las convierte en una excelente alternativa para la construcción responsable y eficiente.

## Recycling ceramic industry wastes in sound absorbing materials

**Autores:** C. Arenas, L.F. Vilches, C. Leiva, B. Alonso-Fariñas y M. Rodríguez-Galán

**Ubicación:** Sevilla, España

La investigación se centró en crear un material acústico a base de residuos cerámicos para reducir el ruido del tráfico vial. Se evaluaron sus propiedades acústicas, físicas y mecánicas, como la absorción de sonido, la porosidad, la densidad y la resistencia a compresión. También se analizó cómo el tamaño de las partículas cerámicas y el espesor de las muestras afectan el rendimiento del material. Para comparar, se usó un concreto poroso tradicional hecho con granito triturado, común en barreras acústicas.

El proceso comenzó con la recolección de residuos cerámicos de distintos tamaños, desde polvo fino hasta fragmentos mayores a 10 mm. Estos se clasificaron en tres grupos según su tamaño: gruesos (2.5 a 4.5 mm), medios (1.25 a 2.5 mm) y finos (menos de 1.25 mm), sin triturarlos para mantener su tamaño original.

Para fabricar las mezclas, se usó cemento Portland tipo II 32.5N junto con un 80% de residuos cerámicos según la fracción de tamaño. Las mezclas se colocaron en moldes cilíndricos de 34 mm de diámetro con distintos espesores y se compactaron para evitar vacíos. Luego, las muestras se desmoldaron después de 24 horas y se curaron durante 28 días en condiciones

normales para que se endurecieran.

Para medir el desempeño del material, se evaluó la absorción sonora en un tubo de impedancia siguiendo la norma EN ISO 10534-2, se midió la porosidad con un método de saturación y se probó la resistencia a compresión según ASTM-C39. Así, se pudo ver cómo el tamaño de las partículas y el espesor influían en sus propiedades acústicas y mecánicas.

Los resultados mostraron que las mezclas con partículas gruesas tenían mayor porosidad y mejor absorción sonora, superando al concreto poroso de referencia. Las mezclas con partículas finas tenían menos porosidad, mejor resistencia mecánica, pero menor capacidad para absorber sonido. Además, aumentar el espesor desplazaba el pico de absorción a frecuencias más bajas, importante para reducir el ruido del tráfico, especialmente por debajo de 1000 Hz.

Para aprovechar todas las propiedades, se creó un producto multicapa con capas de partículas gruesas, medias y finas, permitiendo reciclar todo el residuo cerámico. Aunque su absorción sonora es un poco menor que la mezcla solo con partículas gruesas, es

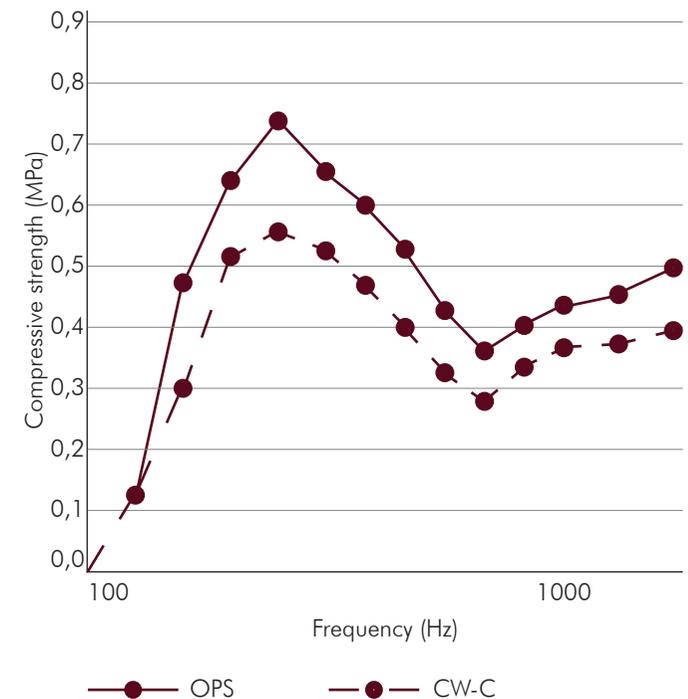
una opción equilibrada.

En la **Tabla 3** se compara la absorción sonora del producto con partículas gruesas (CW-C) con la mezcla multicapa (OPS), mostrando que el producto con partículas gruesas tiene mejor desempeño en la mayoría del rango de frecuencias, especialmente entre 100 y 1000 Hz, importantes para reducir el ruido vehicular.

El tamaño de partícula del residuo cerámico resultó ser un factor fundamental para determinar tanto las propiedades acústicas como las mecánicas del material final. Los productos elaborados con partículas gruesas demostraron una mayor capacidad de absorción sonora debido a la porosidad más elevada que generan, mientras que aquellos con partículas finas mostraron mejores características mecánicas aunque con menor capacidad de absorción acústica.

Además, se observó que el espesor de los paneles es clave para desplazar el pico de absorción hacia frecuencias más bajas, lo cual es especialmente útil para reducir el ruido de tráfico vial. Por último, se concluye que el material desarrollado, basado en residuos cerámicos, tiene un potencial real para sustituir al concre-

Tabla 3: Cuadro de Frecuencias



Fuente: C. Arenas, L.F. Vilches, C. Leiva, B. Alonso (2016)

---

to poroso tradicional empleado en barreras acústicas, ofreciendo una alternativa más sostenible y facilitando el reciclaje industrial.

Este estudio presenta una alternativa sostenible y viable para la gestión de residuos cerámicos industriales, transformándolos en un material con funcionalidad acústica avanzada, especialmente adecuado para barreras de reducción de ruido en carreteras. La adecuada combinación del tamaño de partícula y el espesor permite adaptar el comportamiento acústico a las necesidades específicas del entorno. Además, el proceso de fabricación es sencillo y compatible con técnicas tradicionales, facilitando su implementación comercial.

## TRATADO DEL HORMIGÓN: EMPRESA PREDELCA

En el mercado local, diversas empresas operan en distintos ámbitos de la construcción, desarrollando productos y soluciones innovadoras para el sector. Un claro ejemplo es la empresa "Predelca", especializada en la elaboración de elementos prefabricados de hormigón. Su catálogo incluye una amplia gama de productos, desde tubos, bloques, pozos de revisión, tapas, brocales y postes para cerramientos, hasta elementos arquitectónicos como bloques decorativos, bordillos, topes para llantas y camineras.

Además de su producción habitual, Predelca ha demostrado un compromiso con la innovación y la sostenibilidad al participar en esta investigación para la fabricación de elementos prefabricados de hormigón con la incorporación de residuos cerámicos industriales. Esta iniciativa busca evaluar el impacto del uso de estos residuos en la composición y desempeño de los elementos, promoviendo una construcción más sostenible y alineada con principios de economía circular.

Como empresa dedicada a la producción en masa, fabrica que se puede observar en la Imagen 9. Predelca fabrica elementos en grandes cantidades, lo que le permite ofrecer precios competitivos y abastecer el

Imagen 9: Fabrica Predelca.



Fuente: Autoría propia

mercado de manera eficiente. Según el ingeniero Miguel Puma, gerente de producción de la empresa, la fabricación de estos elementos sigue un proceso sistemático dividido en diversas fases. La materia prima principal utilizada en la producción incluye cemento Portland, áridos finos como la arena y áridos gruesos, específicamente grava de distintas granulometrías.

El proceso de fabricación comienza con la dosificación de los áridos de acuerdo con el tipo de elemento a producir. Esta dosificación es vertida en una concretera mixer de hormigón, ensamblada en la propia fábrica, con una capacidad aproximada de 700 litros por ciclo de producción. Durante esta fase, los materiales se mezclan hasta alcanzar una consistencia homogénea y, en caso necesario, se añaden aditivos que mejoran sus propiedades mecánicas y durabilidad.

Una vez lista la mezcla, se transporta mediante bandas transportadoras hasta los moldes de acero, donde operarios especializados se encargan de distribuir uniformemente el material. Este proceso es crucial para evitar pérdidas de material y garantizar que todos los espacios de los moldes sean llenados de manera adecuada. Posteriormente, la máquina se encarga de rea-

lizar la vibración de los moldes para lograr una óptima compactación del hormigón. La vibración es esencial para eliminar burbujas de aire y mejorar la cohesión de los materiales, lo que contribuye a la resistencia final de los elementos prefabricados.

Tras la compactación, los moldes son desmontados automáticamente por la maquinaria, permitiendo el traslado de las piezas a la fase de curado. Este período es fundamental para garantizar la resistencia y durabilidad del hormigón, ya que durante el curado se completa el proceso de hidratación del cemento, fortaleciendo la estructura interna de los elementos. Dependiendo del tipo de producto, el curado puede realizarse en cámaras controladas o en áreas específicas dentro de la fábrica, como se ilustra en la Imagen 10, asegurando las condiciones óptimas de humedad y temperatura.

Predelca mantiene un firme compromiso con la calidad, implementando estrictos controles en cada etapa de producción. Para garantizar la resistencia y durabilidad de sus productos, la empresa realiza periódicamente ensayos de calidad mediante probetas de hormigón, las cuales son sometidas a pruebas de

Imagen 10: Elementos de Predelca



Fuente: Autoría propia

---

compresión y tracción en laboratorios especializados. Estos ensayos permiten verificar que los productos cumplen con los estándares de calidad exigidos por la normativa ISO 9001 en el apartado de construcción de elementos de hormigón.

La incorporación de residuos cerámicos en la producción de prefabricados representa un paso significativo hacia una construcción más sostenible. Al reutilizar estos residuos industriales, se reducirá la cantidad de desechos enviados a vertederos y se disminuirá la extracción de materias primas naturales, contribuyendo a la preservación del medio ambiente. Además, investigaciones previas han demostrado que ciertos residuos cerámicos pueden mejorar algunas propiedades del hormigón, como su resistencia mecánica y durabilidad, lo que abre nuevas oportunidades para la optimización de los materiales de construcción.

En función del análisis realizado, se puede afirmar que la empresa Predelca destaca por su capacidad consolidada en la producción industrial de elementos prefabricados de hormigón, lo que la posiciona como un referente en el sector local. Esta ventaja operativa no solo permite mantener estándares de calidad con-

sistentes, sino también explorar alternativas innovadoras en sus procesos constructivos. En ese sentido, la incorporación de residuos cerámicos como parte de la materia prima constituye una estrategia altamente eficiente para reducir el impacto ambiental asociado a la industria del hormigón.

La implementación de este tipo de residuos reciclados no solo contribuye a minimizar la generación de desechos de construcción, sino que también representa un avance significativo hacia prácticas alineadas con los principios de sostenibilidad y economía circular. Estas acciones reafirman que es posible desarrollar una industria más consciente, responsable y ambientalmente eficiente, sin comprometer la calidad ni el rendimiento técnico de los productos. Es importante destacar la apertura de Predelca para colaborar activamente con esta investigación, evidenciando su interés por promover soluciones constructivas más sostenibles.

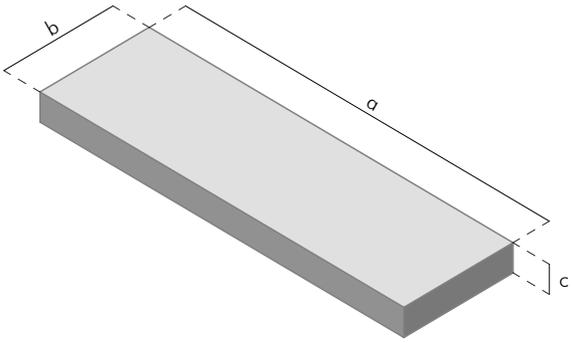
Esta alianza entre la academia y la industria constituye un ejemplo tangible del potencial de innovación conjunta orientada a transformar el sector de la construcción hacia modelos más resilientes y ambientalmente responsables.

## Elementos que desarrolla Predelca:

Una vez establecida la colaboración con la empresa Predelca, se realizó un análisis preliminar de los elementos prefabricados que esta fábrica produce de manera regular. Con el fin de identificar las piezas que podrían adaptarse a los objetivos de esta investigación, se revisó detalladamente el catálogo de productos ofertados por la empresa. Como resultado de este estudio inicial, se seleccionaron seis tipos distintos de elementos prefabricados, los cuales presentan características potencialmente aplicables dentro del marco de este proyecto, estos elementos se encuentran representados figurativamente.

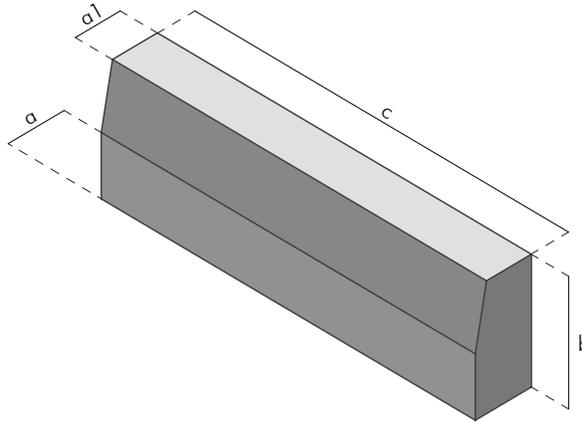
Cada uno de los elementos seleccionados fue evaluado a partir de diversos criterios técnicos, entre los que se destacan el dimensionamiento, la resistencia requerida según su función, su comportamiento estructural, así como su aplicabilidad real en el proceso constructivo. Esta evaluación permitió establecer una clasificación general que agrupa los elementos en dos categorías diferenciadas, según su función dentro de una obra.

Gráfico 1: Camineras prefabricadas

CAMINERAS PREFABRICADAS	
	
Dimensiones:	a) 100cm b) 30cm c) 07cm
Resistencia:	300 kg/cm <sup>2</sup>

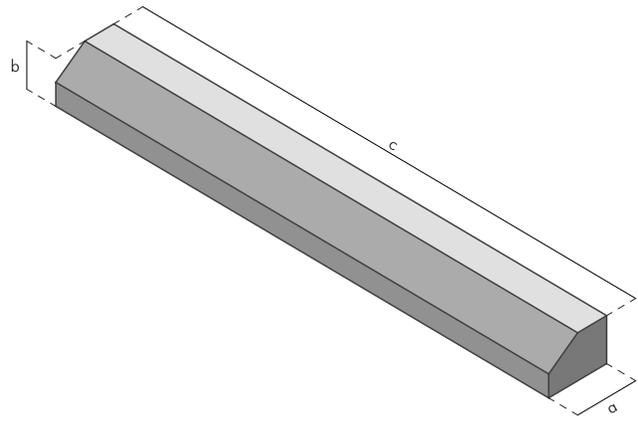
Fuente: Autoría propia

Gráfico 2: Bordillo prefabricado

BORDILLO PREFABRICADO	
	
Dimensiones:	a) 15cm    a1) 12cm b) 30cm c) 100cm
Resistencia:	400 kg/cm <sup>2</sup>

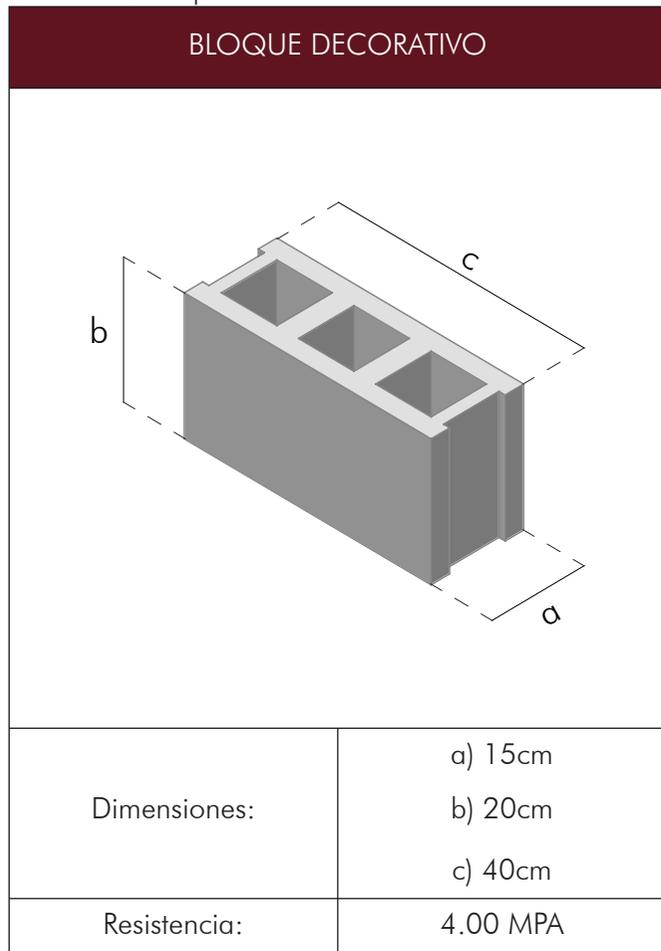
Fuente: Autoría propia

Gráfico 3: Tope para llantas

TOPE PARA LLANTAS	
	
Dimensiones:	a) 20cm b) 14cm c) 170cm
Resistencia:	320 kg/cm <sup>2</sup>

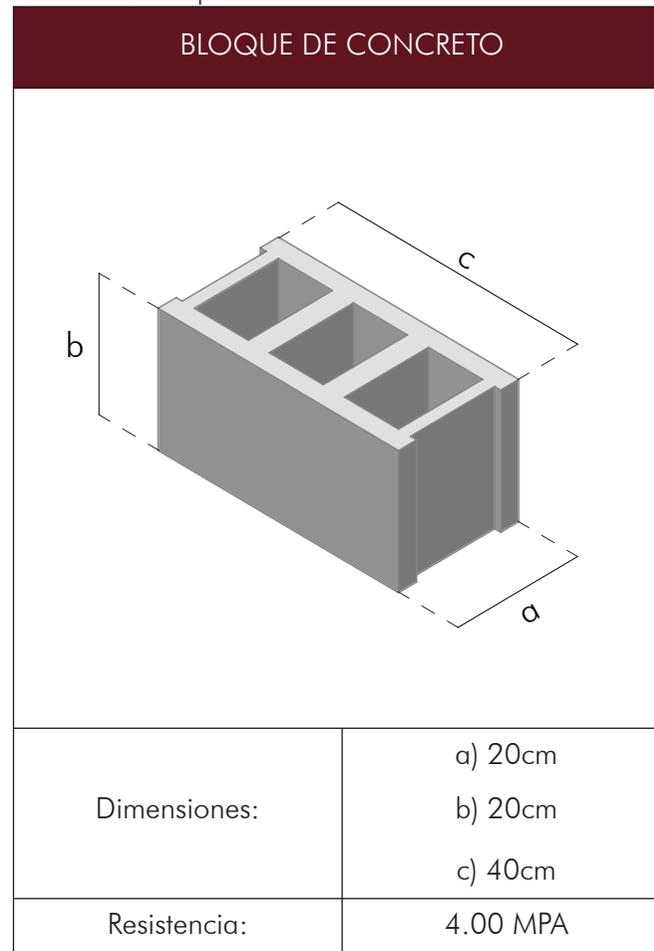
Fuente: Autoría propia

Gráfico 4: Bloque decorativo



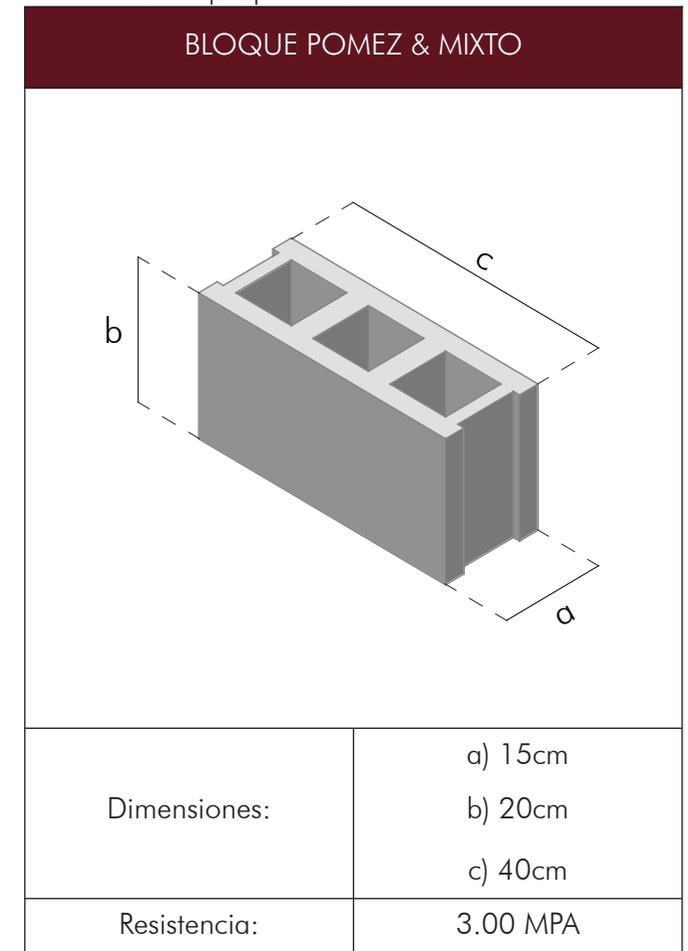
Fuente: Autoría propia

Gráfico 5: Bloque de concreto



Fuente: Autoría propia

Gráfico 6: Bloque pomez & mixto



Fuente: Autoría propia

---

La primera categoría corresponde a elementos considerados no estructurales, los cuales, aunque no participan directamente en la resistencia global del sistema constructivo, cumplen un papel relevante en los acabados y en la calidad estética de la edificación. Estos se encuentran ilustrados en los Gráficos 1, 2 y 3. Su inclusión en esta investigación responde al interés por analizar la posibilidad de incorporar residuos cerámicos también en piezas complementarias, cuya producción en masa puede contribuir significativamente a la sostenibilidad del proceso constructivo.

La segunda categoría comprende elementos de carácter estructural, específicamente aquellos utilizados en sistemas de mampostería. En este grupo se incluyen distintos tipos de bloques prefabricados, representados en los Gráficos 4, 5 y 6, cuya resistencia mecánica y funcionalidad son esenciales para el desempeño general del sistema constructivo. Este grupo de elementos resulta particularmente considerable para los fines de esta investigación, dado que su fabricación en serie, con incorporación de residuos reciclados, puede tener un impacto considerable tanto en términos técnicos como ambientales.

Con base en esta categorización inicial, se plantea la necesidad de analizar de manera integral las ventajas y desventajas que presenta cada uno de estos elementos, considerando no solo su comportamiento estructural y viabilidad técnica, sino también su impacto económico y ambiental. Esta etapa permitirá establecer criterios claros para determinar qué tipo de prefabricado es el más adecuado para incorporar materiales reciclados, con el objetivo de garantizar un producto final que sea eficiente, competitivo y alineado con los principios de sostenibilidad que orientan esta investigación.

### Selección del elemento:

A partir del análisis técnico y conceptual desarrollado en las fases previas de la investigación, se decidió optar por el diseño y fabricación de un elemento perteneciente al primer grupo de clasificación, es decir, un prefabricado no estructural. Esta elección responde principalmente al hecho de que los elementos del segundo grupo, aquellos destinados a sistemas de mampostería estructural, requieren cumplir con normativas y especificaciones de resistencia que exceden el alcance y enfoque de este estudio. La presente investigación no busca sustituir elementos estructurales que formen

parte del sistema resistente de una edificación, sino más bien proponer una solución innovadora que pueda integrarse de forma complementaria a los sistemas constructivos existentes.

En consecuencia, se seleccionó como objeto de estudio a las camineras prefabricadas (Gráfico 1), un tipo de elemento tradicionalmente utilizado como superficie de tránsito peatonal. No obstante, su morfología y características formales permiten que este componente sea reinterpretado para cumplir funciones distintas a las originalmente concebidas. Específicamente, se plantea su adaptación como panel de revestimiento vertical, otorgándole así un nuevo uso arquitectónico más versátil, estético y funcional.

La elección de este elemento se fundamenta no solo en su viabilidad técnica para ser producido mediante procesos de prefabricación con incorporación de residuos cerámicos, sino también en su potencial de ser replicado y comercializado en el mercado como un producto innovador y sostenible. Con estas consideraciones, se justifica plenamente la selección de las camineras como prototipo de aplicación dentro del marco de esta investigación.

## CASOS DE ESTUDIO

Gracias a las revisiones de literatura y a las investigaciones previas sobre el uso de residuos cerámicos, se logró identificar una relación directa entre los componentes del hormigón y las propiedades distintivas de la pasta monoquema. El análisis detallado de estos estudios permitió inferir que nuestro residuo podría presentar características similares a las de los elementos tradicionales del hormigón, debido a su composición y proceso de cocción, lo que sugiere su potencial viabilidad como material sustituto.

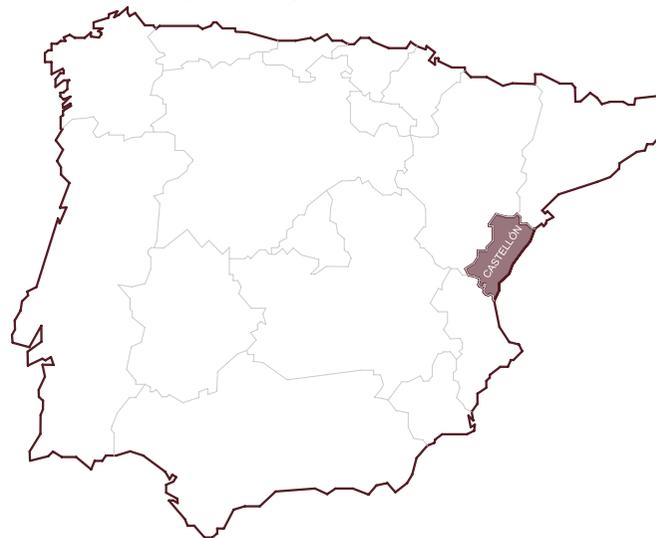
En este marco, se llevó a cabo una revisión de proyectos destacados que incorporan residuos en la fabricación de hormigón. Esta investigación no solo buscó identificar ejemplos exitosos de aplicaciones con cerámica reciclada y otros materiales, sino también servir como una guía para analizar qué estrategias han funcionado y qué errores se han cometido previamente, con el objetivo de evitar estos fallos y optimizar los resultados durante la experimentación.

### Reutilización de residuos de baldosas cerámicas en el desarrollo de baldosas de hormigón

Autores: A. Pitarch, L. Reig, J. Mira, J. Corrales y L.

Ubicación: Castellón, España

Gráfico 7: Mapa de España



Fuente: Autoría propia

Este estudio aborda la problemática ambiental derivada del elevado consumo de recursos y generación de residuos en el sector de la construcción, enfocándose en la reutilización de residuos de baldosas cerámicas como materia prima para fabricar baldosas de hormigón. Dentro de los proyectos CERBUILD y ECOSISCER, financiados por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE), se planteó una solución innovadora para favorecer la economía circular y mejorar la sostenibilidad en la fabricación de prefabricados de construcción.

El objetivo principal fue desarrollar baldosas de hormigón compactas y porosas, empleando áridos reciclados derivados de baldosas cerámicas trituradas, y evaluar su comportamiento mecánico, físico y funcional para pavimentos urbanos. Se exploró la viabilidad técnica, estética y funcional de estos productos para uso en pavimentos exteriores, incluyendo análisis sobre permeabilidad, resistencia a flexión, absorción de agua y comportamiento al deslizamiento.

El proceso experimental se estructuró en tres fases. La primera consistió en diseñar, fabricar y caracterizar distintos prototipos de baldosas con diferentes espe-

sores y características (compactas, porosas, con y sin aislamiento térmico). Para ello se emplearon áridos reciclados con granulometrías 0/5 mm y 5/12 mm, garantizando uniformidad y mínima contaminación. Las mezclas se ajustaron para optimizar la relación resistencia-permeabilidad, y se produjeron muestras en moldes estándar con control del curado para asegurar desarrollo óptimo de las propiedades.

En la segunda fase se optimizaron las dosificaciones y acabados superficiales, buscando mejorar la homogeneidad y estética, sin comprometer la funcionalidad. Se descartaron tratamientos que generaban superficies demasiado agresivas o peligrosas para el usuario, y se exploraron técnicas de pulido y desbaste para mejorar el acabado.

Finalmente, en la tercera fase, se colaboró con una empresa local para la fabricación industrial de las baldosas seleccionadas, evaluando su desempeño a escala real. Se verificó que las propiedades mecánicas y funcionales obtenidas en laboratorio se replicaban en producción, confirmando la viabilidad del proceso y del producto.

Las baldosas compactas de 40x40x6 cm alcanzaron resistencias a flexión cercanas a 4 MPa y cargas de rotura superiores a 11 kN, mientras que las baldosas porosas de 40x40x8 cm mostraron valores ligeramente menores pero adecuados para tránsito peatonal intenso y paso ocasional de vehículos, como aceras y parques. Estas propiedades cumplen con la norma UNE-EN 1339:2004, lo que garantiza su idoneidad

para aplicaciones urbanas. Como se puede observar en la **Tabla 4**, estas baldosas recibieron una clasificación y marcado que certifican su calidad y resistencia para su uso previsto.

Los autores concluyen que es posible fabricar baldosas de hormigón compactas y porosas empleando residuos de baldosas cerámicas como árido reciclado, logrando productos con las características mecánicas y funcionales necesarias para pavimentos urbanos. La transferencia exitosa de laboratorio a producción industrial demuestra la aplicabilidad práctica del método.

Además, la reutilización local de estos residuos contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones asociadas al transporte y promover la economía circular. La posibilidad de fabricar tanto baldosas compactas como porosas amplía su uso y favorece la creación de pavimentos permeables para una mejor gestión urbana del agua.

Tabla 4: Clasificación de las baldosas de hormigón desarrolladas con árido reciclado cerámico

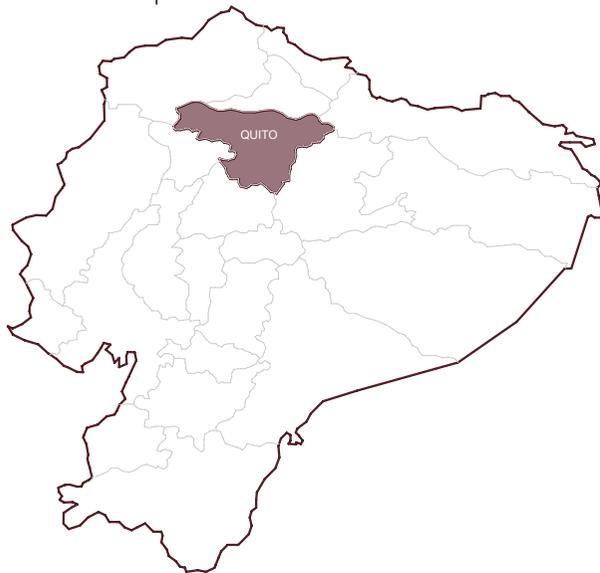
Tipo	Dimensiones (mm)	Resistencia a flexión (MPa)	Carga de rotura (KN)	Clasificación UNE-EN	
				Clase	Marcado
Compacta	400x400x60	3,96	11,60	110	11
Porosa	400x400x80	2,00	9,80	70	7

Fuente: A. Pitarch, L. Reig, J. Mira, J. Corrales y L. (2024)

## Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con cerámicos reciclados como sustituto del agregado grueso

Autores: Édison Eráclides Hernández Ávila y Freddy Bolívar Saravia Zambrano  
Ubicación: Quito, Ecuador

Gráfico 8: Mapa de Ecuador



Fuente: Autoría propia

El estudio realizado por Hernández y Saravia (2018) analiza el comportamiento del hormigón fabricado sustituyendo parcialmente el agregado grueso tradicional por residuos cerámicos triturados. Esta iniciativa responde a la necesidad de dar un uso eficiente y sostenible a los residuos cerámicos generados en plantas industriales de Quito, que actualmente son descartados en vertederos causando impactos ambientales negativos. El objetivo principal fue evaluar cómo afecta esta sustitución las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, para determinar su viabilidad en aplicaciones estructurales.

El proceso comenzó con la recolección y caracterización de los materiales. Se analizaron las propiedades del agregado fino proveniente de una cantera, el agregado grueso tradicional y el agregado cerámico reciclado, mediante ensayos que incluyeron granulometría, resistencia a la abrasión, peso específico, absorción y contenido de impurezas orgánicas. Esta etapa permitió asegurar que los materiales cumplieran con las normas técnicas para su uso en hormigón.

Luego se diseñaron las mezclas de hormigón siguiendo el método ACI 211.1, ajustando las dosificacio-

nes para alcanzar una resistencia a la compresión de 24 MPa. En el hormigón experimental, el agregado grueso fue sustituido por cerámico triturado tamizado en varias fracciones, mientras que el agregado fino se mantuvo igual.

Se prepararon un total de 72 cilindros para el hormigón con cerámico y 14 para el hormigón convencional, los cuales fueron curados y ensayados a las edades de 7, 14 y 28 días. Se evaluó la resistencia a la compresión mediante ensayos estándar, así como el módulo de elasticidad para conocer el comportamiento elástico del material y por último, se midió la trabajabilidad a través del asentamiento en el cono de Abrams.

Como se observa en la [Tabla 5](#), el hormigón con residuos cerámicos mostró una resistencia promedio de 29.32 MPa a los 28 días, lo que equivale a cerca del 90% de la resistencia del hormigón convencional, que alcanzó 35.69 MPa. A edades menores, la resistencia del hormigón con cerámico fue menor pero suficiente para ciertos usos estructurales. El módulo de elasticidad también fue similar entre ambos hormigones, indicando que la sustitución no compromete la rigidez

en el rango elástico.

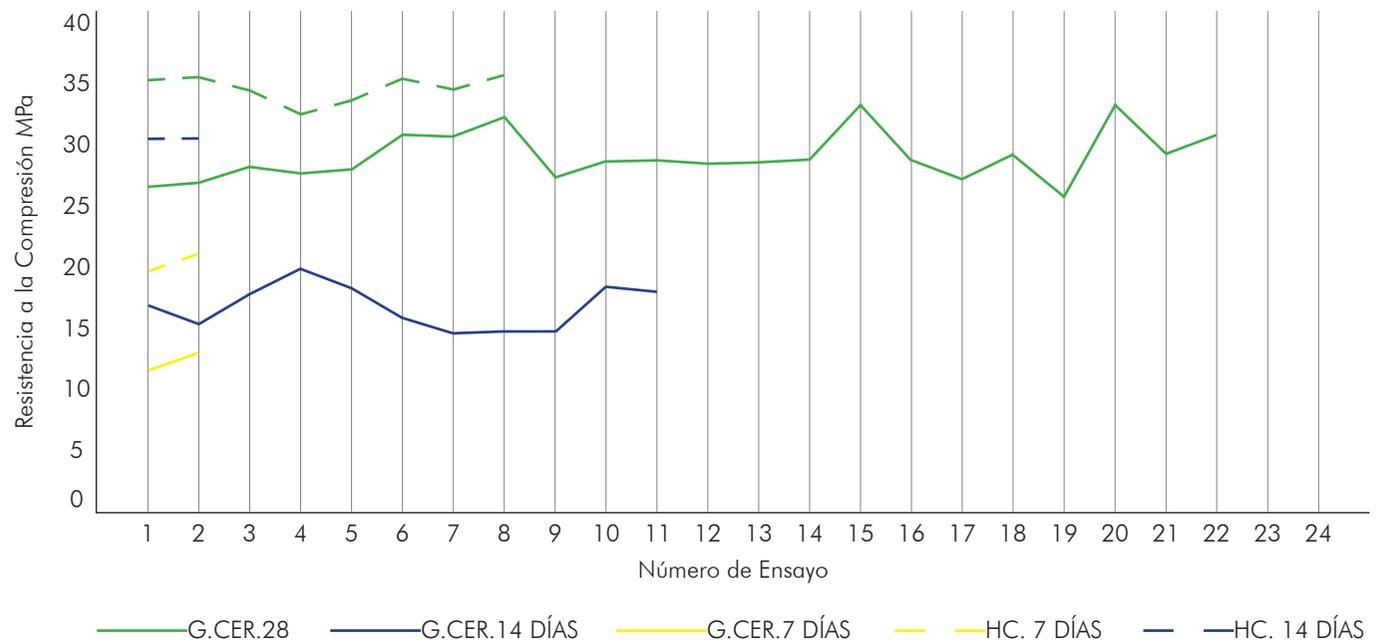
Sin embargo, la trabajabilidad del hormigón con cerámico fue inferior, reflejándose en un asentamiento menor al esperado (46 mm versus 80 mm proyectado), debido a la forma irregular y mayor rugosidad de las partículas cerámicas. En cuanto al costo, el hormigón con agregado cerámico presentó una reducción aproximada del 2.18% respecto al convencional, sumando un beneficio económico a los ambientales de reducir residuos.

Los autores concluyen que el agregado cerámico triturado cumple con los requisitos técnicos para usarse como sustituto parcial del agregado grueso en hormigón estructural, con un desgaste aceptable y resistencia adecuada. La reducción de resistencia a la compresión es menor al 10%, manteniendo la funcionalidad para diseños convencionales. No obstante, es recomendable incorporar aditivos plastificantes para mejorar la trabajabilidad y alcanzar mejores asentamientos en la mezcla.

Este estudio demuestra el potencial de los residuos cerámicos para fomentar una construcción más sos-

tenible, al reducir la extracción de recursos naturales y minimizar la contaminación generada por desechos industriales. Además, la disminución en costos de producción aumenta la viabilidad y atractivo de esta alternativa para el sector de la construcción.

Tabla 5: Cuadro de resistencia a la Compresión



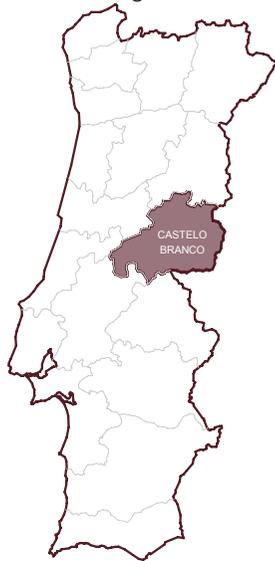
Fuente: É. Hernández y F. Saravia (2018)

## Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste

Autores: Miguel C.S. Nepomuceno, Rui A.S. Isidorob y José P.G. Catarinoc

Ubicación: Castelo Branco, Portugal

Gráfico 9: Mapa de Portugal



Fuente: Autoría propia

La investigación realizada por Nepomuceno, Isidoro y Catarino (2018) se centró en el uso de agregados cerámicos reciclados (RCA) provenientes de residuos industriales de ladrillos como sustitutos parciales del agregado grueso natural (NCA) en la fabricación de concreto. El estudio busca determinar el efecto que tiene la incorporación de estos residuos sobre las propiedades mecánicas y físicas del concreto, con el objetivo de promover su reutilización sostenible y minimizar el impacto ambiental generado por estos desechos.

Para ello, se diseñaron y fabricaron cinco mezclas diferentes de concreto con reemplazos volumétricos del agregado grueso natural por RCA en proporciones de 0% (mezcla control), 10%, 30%, 50% y 75% (Tabla 6). Se aplicaron estrictos controles en la preparación de las mezclas para garantizar que la granulometría y la trabajabilidad fueran constantes, permitiendo así comparar los resultados mecánicos sin que variables externas afectaran la evaluación.

Los agregados cerámicos reciclados fueron previamente caracterizados para determinar su granulometría, densidad, absorción de agua y propiedades geométricas como forma y planitud. Se observó que el

RCA tiene una densidad menor y mayor absorción de agua que el agregado natural, lo cual puede afectar el comportamiento del concreto si no se controla adecuadamente.

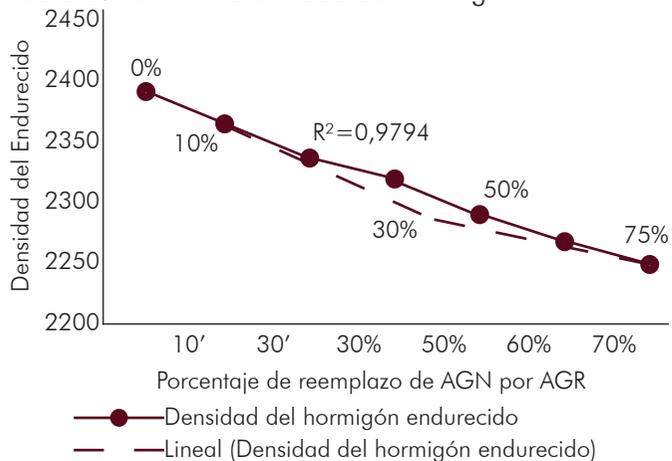
Para mitigar el efecto de la alta absorción de agua, se aplicó un procedimiento de pre-hidratación del agregado reciclado, en el cual este se saturó con agua antes de la mezcla, para evitar que absorba el agua libre necesaria para la hidratación del cemento. Posteriormente, se evaluaron las propiedades del concreto fresco (trabajabilidad, asentamiento, contenido de aire) y endurecido (resistencia a compresión, flexión, tracción y densidad), para medir el impacto del reemplazo progresivo del agregado grueso por RCA.

Los resultados mostraron que, a pesar de la menor densidad y mayor absorción del RCA, la pre-hidratación permitió mantener la trabajabilidad de la mezcla constante a lo largo de los diferentes porcentajes de sustitución. La textura angular y rugosa del RCA podría haber reducido la fluidez, pero este efecto fue compensado mediante la saturación previa del agregado. Las propiedades mecánicas evidenciaron una disminución progresiva en la resistencia a la compresión

conforme aumentaba la cantidad de RCA, con un valor del 97.7% de la resistencia del concreto control para el 10% de reemplazo, y un 88.9% para el 75% de reemplazo. La resistencia a la flexión y a la tracción siguieron una tendencia similar, aunque con pérdidas menos pronunciadas.

Además, se encontró que el concreto elaborado con RCA proveniente de residuos industriales limpios y homogéneos presentó mejores resultados mecánicos que aquel fabricado con residuos de demolición, que suelen contener impurezas adheridas que afectan la

Tabla 6: Tabla de Densidad del hormigón



Fuente: Nepomuceno, Isidoro y Catarino (2018)

calidad del agregado. El estudio concluyó que el concreto con hasta un 30% de agregado grueso reciclado de cerámica industrial mantiene un rendimiento mecánico aceptable para aplicaciones estructurales moderadas, siempre que se controle la absorción de agua mediante pre-hidratación del RCA. El uso de estos residuos representa una alternativa sostenible para la construcción, promoviendo la economía circular y la reducción de desechos industriales.

La selección cuidadosa y el tratamiento previo del material reciclado son claves para asegurar la calidad del concreto, evitando pérdidas significativas en resistencia y trabajabilidad. Este caso aporta evidencia sólida para integrar residuos cerámicos industriales en mezclas de concreto, ofreciendo beneficios ambientales sin comprometer la seguridad estructural (Nepomuceno et al., 2018).

### Análisis comparativo entre artículos:

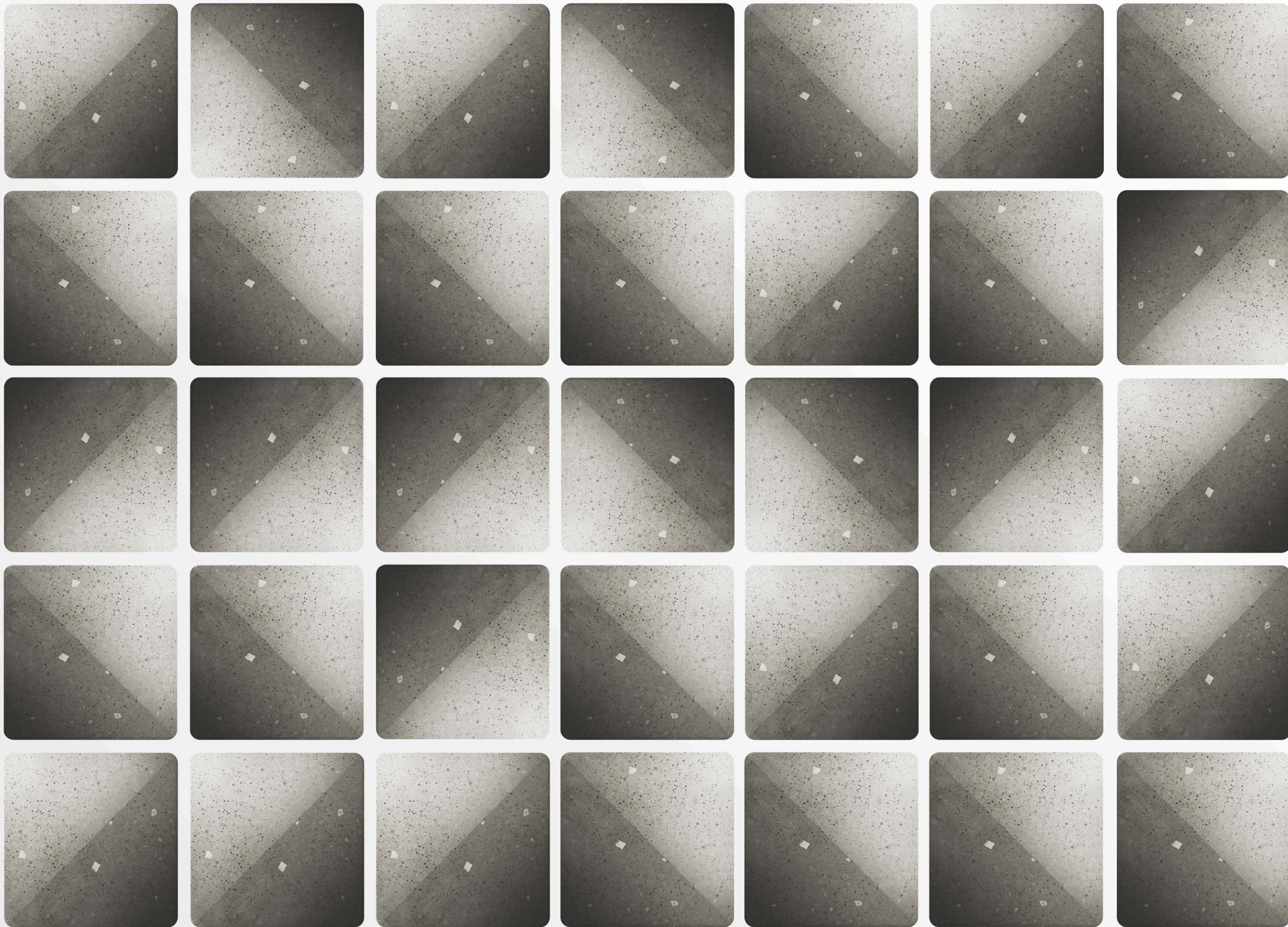
La incorporación de residuos cerámicos en la fabricación de hormigón ha demostrado ser una alternativa viable y sostenible en varios estudios. El proyecto CER-BUILD en España demostró la viabilidad de fabricar

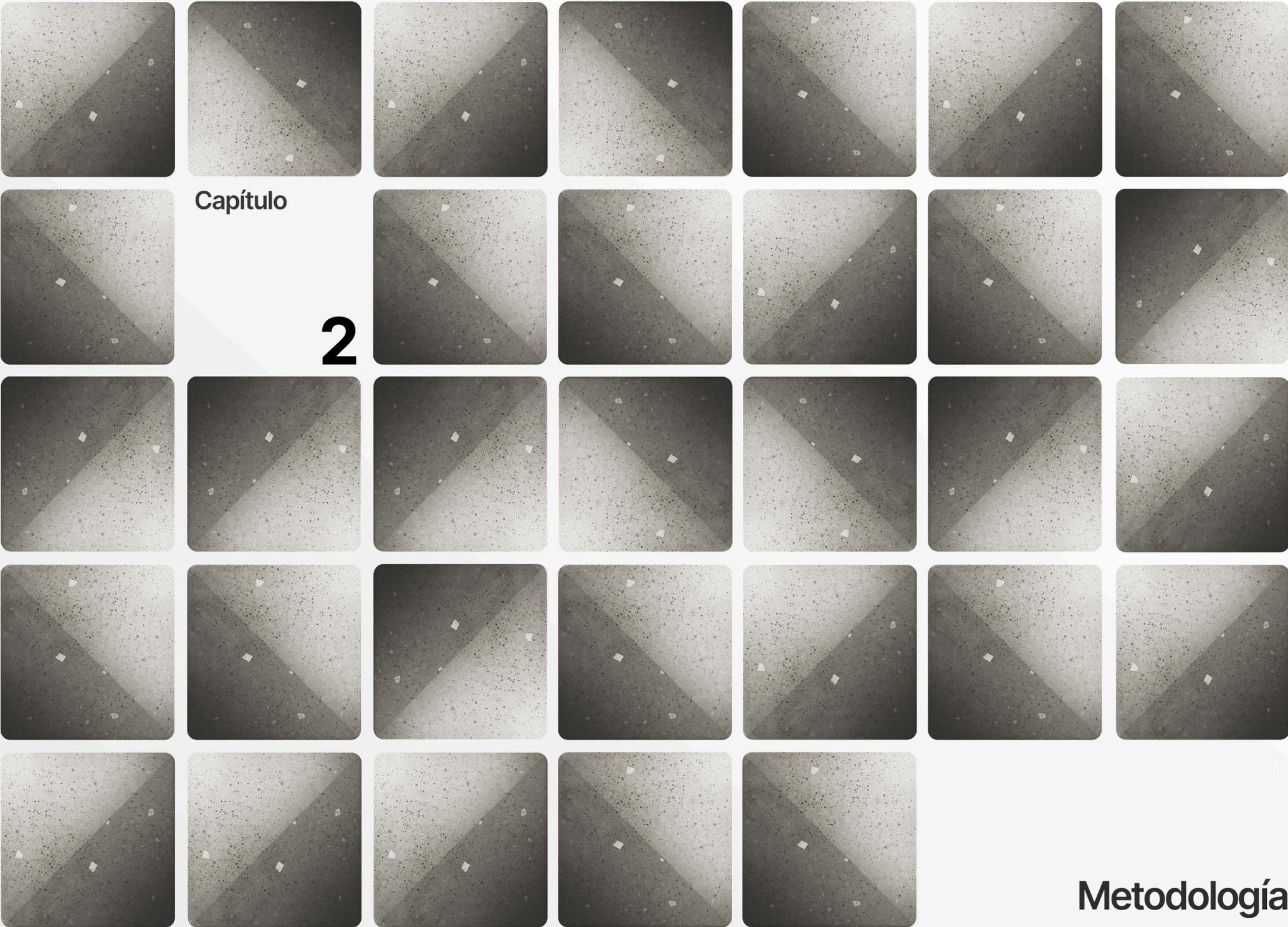
baldosas de hormigón utilizando residuos de baldosas cerámicas, cumpliendo con las normativas de resistencia para pavimentos urbanos. Este enfoque industrial también destacó por su contribución a la economía circular.

Por otro lado, el estudio de Hernández y Saravia (2018) en Ecuador analizó el uso de cerámicos reciclados como sustituto del agregado grueso en hormigón estructural. Aunque la resistencia a la compresión fue ligeramente menor, alcanzó el 90,77% de la resistencia esperada, lo que lo hace adecuado para proyectos de construcción con bajo y mediano requerimiento.

Finalmente, el estudio de Nepomuceno et al. (2018) en Portugal evaluó el uso de residuos de ladrillos cerámicos, demostrando que hasta un 30% de sustitución en concreto mantiene un rendimiento mecánico aceptable, resaltando la importancia del tratamiento previo de los agregados reciclados.

A pesar de sus enfoques distintos, los estudios coinciden en que los residuos cerámicos, con el tratamiento adecuado, son viables para su reutilización, favoreciendo la sostenibilidad, la reducción de costos y el aprovechamiento eficiente de materiales reciclados.





Capítulo

2

Metodología

## CAMPAÑA EXPERIMENTAL

---

La investigación se realizará mediante la recopilación de datos cuantitativos a través de revisiones de literatura y pruebas de laboratorio, con el objetivo de obtener información detallada sobre el residuo cerámico generado por la empresa Rialto y las posibles aplicaciones en materiales constructivos. Además se realizarán visitas técnicas a la empresa Rialto, donde se aprenderá de primera mano sobre el proceso de reciclaje de residuos cerámicos y su integración en la producción de nuevos materiales, lo que enriquecerá la comprensión del ciclo de vida de estos materiales y sus aplicaciones potenciales en la construcción.

El estudio tendrá un enfoque exploratorio, permitiendo una investigación preliminar y amplia de los diversos factores que podrían influir en la creación de un componente constructivo a base de pasta monoquema. Esta investigación, de carácter experimental, tiene como objetivo explorar el potencial del material denominado “pasta monoquema”. Se prestará especial atención al proceso completo de fabricación de la pasta monoquema, buscando obtener la mayor cantidad de información posible sobre este material, especialmente a través de las perspectivas que la empresa Rialto pueda aportar sobre su producción y sus

características.

Además, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas de la pasta monoquema, mediante pruebas de contracción y absorción del material. Estas pruebas se deben realizar mediante los equipos de laboratorio con los que la empresa Rialto realiza sus propios análisis, y la ayuda de Ingenieros experimentados lo que garantiza la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos. Este enfoque permitirá evaluar si, al ser implementado en elementos constructivos, el material cumple con los estrictos estándares de calidad exigidos por la industria de la construcción.

Además, el enfoque metodológico será cualitativo, ya que se pretende realizar un análisis profundo tanto del material en sí como de sus aplicaciones potenciales en la creación de diversos componentes constructivos. El estudio se dirigirá a identificar si los productos fabricados con pasta monoquema, a partir de residuos cerámicos reciclados, pueden igualar o incluso superar las propiedades de los materiales que actualmente dominan el mercado local, tales como los productos de cerámica convencional o los materiales utilizados para la fabricación de ladrillos y otros elementos para

la construcción. Se evaluarán distintas características clave, como la resistencia mecánica, la durabilidad y la capacidad de aislamiento de estos elementos, dependiendo del elemento seleccionado, lo cual es esencial para determinar su viabilidad en la construcción de infraestructuras.

Por otro lado, se explorarán las posibles aplicaciones de la pasta monoquema en diversos tipos de construcciones, como viviendas, pavimentos y elementos decorativos, con el fin de promover la sostenibilidad en la industria. Este enfoque no solo busca obtener una visión clara sobre el comportamiento de este material en condiciones reales de uso, sino también contribuir a la economía circular al utilizar un material reciclado, reduciendo el impacto ambiental asociado con la producción de nuevos recursos.

En la Tabla 7, se presenta las principales variables de estudio de esta investigación, destacando el análisis detallado de la materia prima seleccionada para la elaboración del elemento constructivo. Se incluyen tanto las pruebas de laboratorio como los procedimientos técnicos necesarios, además de una descripción del proceso de fabricación planificado. Cada una de las definiciones conceptuales se organiza en fases, facilitando la estructuración del proyecto y permitiendo una mejor comprensión de los objetivos planteados.

En la sección de operación, se especifican las tareas y procesos que se desarrollarán de manera cronológica a lo largo de la investigación, asegurando una metodología clara y organizada. Es importante señalar que este cuadro tiene como propósito principal explorar y aprovechar las potencialidades de la pasta monoque- ma, optimizando así las propiedades y características del elemento constructivo a desarrollar.

Tabla 7: Tablas de Variables de Estudio

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIONES CONCEPTUALES	OPERACIÓN
Propiedades técnicas del material.	Las propiedades técnicas del material son las cualidades y atributos específicos que caracterizan al elemento constructivo a realizar, estas mismas determinan su comportamiento frente a distintas fuerzas físicas y termoeléctricas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisión de literatura</li> <li>- Exploración del material y sus características mediante pruebas de campo.</li> </ul>
Experimentos de Laboratorio.	Proceso de pruebas y ensayos con el material reciclado para considerar sus propiedades físicas y mecánicas, con las cuales se trabajara el elemento constructivo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pruebas de campo con el material chamote, asignadas por la empresa Rialto</li> </ul>
Elementos Constructivos	Posibles elementos constructivos que se pueden aplicar en base de los residuos cerámicos analizados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generación de una matriz de posibles elementos cerámicos constructivos que se puedan adaptar a las propiedades obtenidas de las pruebas de laboratorio.</li> </ul>
Procesos de Fabricación	Conjunto de actividades y técnicas que se conllevan en un orden específico, mediante los cuales los residuos cerámicos se transforman en un elemento constructivo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maquinaria y pruebas de laboratorio implementadas en la empresa con la que se llevará a cabo la investigación.</li> </ul>

Fuente: Autoría propia

# HERRAMIENTAS METODOLÓGICAS

---

## Revisión de Literatura

El primer paso en el estudio del material consiste en realizar una revisión exhaustiva de la literatura, centrada en la consulta y análisis de artículos científicos que aborden enfoques relacionados con el uso de cerámica reciclada en la construcción. Este proceso permitirá recopilar información clave sobre investigaciones previas que han explorado aplicaciones innovadoras de este material, estableciendo una base sólida y fundamentada para el desarrollo del proyecto.

Se priorizarán estudios que examinen las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la cerámica reciclada, así como su viabilidad en la creación de elementos constructivos sostenibles. Además, se analizarán metodologías, resultados y conclusiones de investigaciones anteriores para identificar posibles brechas de conocimiento o áreas de oportunidad. Esta verificación no solo garantizará un enfoque metodológico bien fundamentado, sino que también aportará perspectivas que contribuirán al diseño experimental de esta investigación, asegurando su alineación con prácticas sostenibles y normas de calidad.

## Ensayos de Laboratorio

Una vez completada la recopilación de información previa y realizadas las consultas pertinentes en la revisión de la literatura, el siguiente paso en la investigación consiste en el análisis detallado de los residuos cerámicos. En este caso, la “pasta monoquema” se presenta en dos tipos de residuos: áridos gruesos y áridos finos. Ambos deberán ser sometidos a pruebas en laboratorio para evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, con el fin de determinar su viabilidad como material reciclado en la producción de elementos constructivos.

Dado que estos residuos cerámicos constituyen la materia prima fundamental en esta investigación, resulta esencial conocer en detalle su composición, resistencia y comportamiento estructural. Paralelamente, se analizarán las propiedades de los demás materiales que conforman el hormigón, como el cemento Portland, los áridos gruesos (grava) y los áridos finos (arena). Con los datos obtenidos de estas pruebas, se podrán establecer parámetros adecuados para su incorporación en la mezcla y avanzar en el desarrollo experimental del proyecto.

## Pruebas de Campo

Con los datos obtenidos sobre la materia prima, en este caso los residuos cerámicos, se procederá a la incorporación de la “pasta monoquema” dentro de la mezcla de hormigón. Esta etapa experimental permitirá analizar la reacción del material y su comportamiento dentro de la matriz cementicia, con el objetivo de evaluar su viabilidad para la fabricación de elementos constructivos.

Durante este proceso, será fundamental elaborar informes detallados sobre las probetas de hormigón, registrando los diferentes porcentajes de residuos cerámicos utilizados en la mezcla y su impacto en las propiedades mecánicas del material. Se realizarán pruebas de resistencia a la compresión, tracción y flexión, lo que permitirá determinar la dosificación óptima para obtener un hormigón de calidad.

El propósito de esta fase es lograr una comprensión clara sobre la forma en que se deben fabricar los elementos prefabricados, asegurando que la incorporación de los residuos cerámicos contribuya a la sostenibilidad sin comprometer la resistencia ni la durabilidad del material.

---

## Diseño y Construcción de los Elementos

Una vez completadas las fases de pruebas y ensayos, se dará inicio al diseño del nuevo elemento constructivo. En esta etapa del proyecto, es fundamental contar con el apoyo de un profesional especializado o de una empresa con experiencia en la fabricación de productos de hormigón. Esto permitirá garantizar que el diseño y desarrollo de los nuevos elementos cumplan con los estándares de calidad y resistencia requeridos.

Uno de los aspectos clave en esta fase es la fabricación de los moldes en los que se verterá la mezcla de hormigón con residuos cerámicos. Para ello, se deberán analizar diferentes materiales y técnicas de moldeo, asegurando que el proceso de producción sea eficiente y que los elementos obtenidos posean las características deseadas en términos de forma, acabado y funcionalidad.

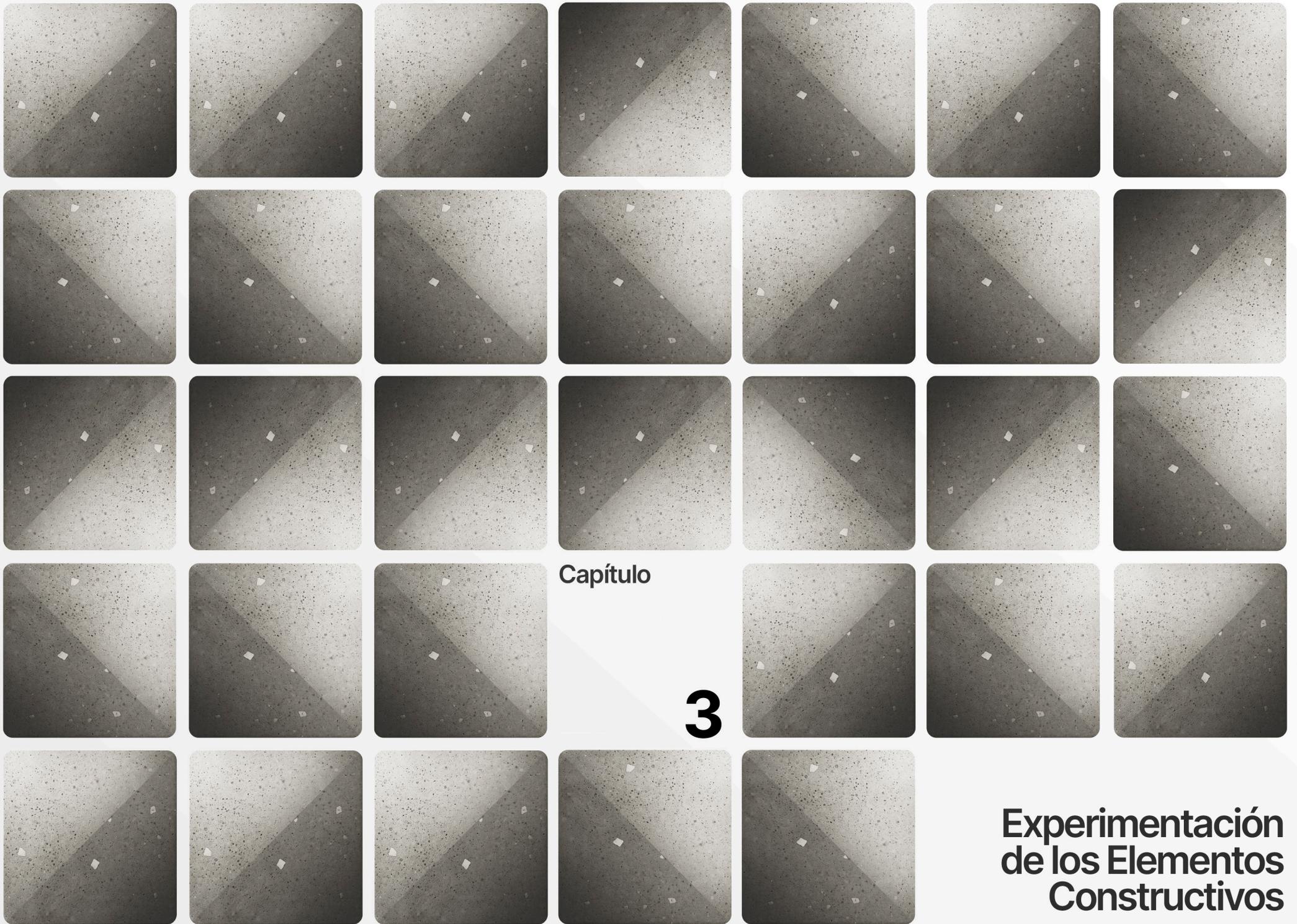
Paralelamente, se dará inicio a la producción de los prototipos finales, los cuales serán sometidos a una última evaluación antes de su implementación en la fase definitiva del proyecto.

## Cumplimiento de la Normativa

Con los elementos constructivos ya fabricados, esta etapa se centrará en la realización de pruebas para verificar el cumplimiento de la normativa correspondiente. Estas pruebas permitirán evaluar las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad de los materiales, asegurando que los elementos cumplan con los estándares de calidad y resistencia exigidos en el sector de la construcción.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se procederá a su análisis detallado, comparando el desempeño de los nuevos elementos con los materiales tradicionales. Finalmente, con base en la información recopilada, se desarrollarán las conclusiones finales de la investigación, estableciendo las ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones futuras de estos materiales innovadores.





Capítulo

**3**

**Experimentación  
de los Elementos  
Constructivos**

# PRUEBAS DE LABORATORIO DE LOS RESIDUOS CERÁMICOS

---

## Experimentación de los Residuos Cerámicos

Para comprender con mayor claridad las propiedades y características de la pasta y chamote monoquema, se llevaron a cabo una serie de pruebas orientadas a identificar su comportamiento físico y mecánico. El objetivo principal de este análisis fue comparar dichas propiedades con las de los componentes tradicionales del hormigón y evaluar la viabilidad del residuo cerámico como un posible sustituto en su composición.

Se realizó una investigación detallada sobre las características de cada uno de los componentes tradicionales del hormigón. Para complementar esta información, se consultaron las pruebas realizadas por la empresa PREDELCA, lo que permitió conocer los estándares y especificaciones utilizadas en sus procesos de producción. Además, se indagó si los materiales o componentes variaban dependiendo del tipo de elemento fabricado.

Sin embargo, la investigación aclaró que, en la fábrica, los mismos materiales se utilizaban de manera uniforme para cualquier elemento, lo que simplificó el análisis comparativo entre el residuo cerámico y los

materiales convencionales. En el caso específico del residuo cerámico, se realizaron pruebas fundamentales para su caracterización.

Entre estas pruebas se incluyeron el análisis granulométrico, para estudiar la distribución de tamaños de partículas; pruebas de plasticidad y límite líquido, que determinaron su comportamiento frente a deformaciones y cambios en su contenido de agua; así como ensayos de absorción de agua y absorción de humedad, que permitieron evaluar su capacidad de interactuar con líquidos y su desempeño en diferentes condiciones ambientales.

Estas pruebas, junto con la información recopilada sobre los materiales tradicionales del hormigón, proporcionaron una base sólida para identificar las ventajas y limitaciones del residuo cerámico como posible sustituto. Este enfoque permitió no solo entender sus propiedades físicas y químicas, sino también determinar si su incorporación en mezclas de hormigón era técnicamente factible y sostenible.

## Análisis de Resultados del Ensayo de Granulometría de Áridos Gruesos

La granulometría de los áridos es fundamental en la calidad del hormigón, ya que influye directamente en su trabajabilidad, resistencia mecánica, compacidad y durabilidad. Una distribución adecuada de tamaños permite que las partículas encajen mejor entre sí, reduciendo los vacíos y la cantidad de pasta de cemento necesaria. Esto mejora el comportamiento del hormigón y optimiza el uso de materiales, reduciendo costos.

En este sentido, la prueba de granulometría resulta indispensable, ya que permite conocer cómo se distribuyen los tamaños de las partículas dentro de una muestra de agregado grueso, facilitando así el diseño de mezclas más eficientes y de mejor desempeño técnico. En este estudio se realizó una prueba granulométrica al material cerámico reciclado (Chamote Monoquema **Imagen 12**), proveniente de residuos de la industria de fabricación de cerámica.

El objetivo fue determinar si este material podía utilizarse como sustituto parcial del agregado grueso natural. Los resultados fueron comparados con el árido convencional de la empresa Predelca (**Tabla**

Tabla 8: Granulometría Chamote Monoquema

GRANULOMETRÍA SERIE GRUESA CHAMOTE MONOQUEMA				
Tamiz N°	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido acumulado	% Retenido	% Pasa
1 ½"	0	0	0	0
1"	205	205	6,57	93,43
¾"	185	390	12,50	87,50
½"	166	556	17,82	82,18
3/8"	124	680	21,80	78,20
N° 4	460	1140	36,54	63,46
Pan	1995			
N° 8	0,95	0,95	36,64	63,36
N° 19	0,46	1,41	36,59	63,41
N° 16	1,42	2,83	36,69	63,31
N° 30	2,08	4,91	36,76	63,24
N° 40	1,78	6,69	36,73	63,27
N° 50	2,25	8,94	36,78	63,22
N° 100	5,36	14,3	37,11	62,89
N°200	15,5	29,8	38,18	61,82
Pan	3,42			

Fuente: Autoría propia

8) para evaluar su viabilidad técnica. Esta evaluación fue esencial para verificar si el residuo cerámico cumplía con los rangos establecidos por la normativa ecuatoriana vigente y si presentaba un comportamiento granulométrico apto para el uso en hormigón.

El material fue recolectado directamente desde la montaña de residuos de Rialto, compuesta por restos cerámicos rotos. Debido a su fractura aleatoria, presentaba formas y tamaños muy variados. Para el ensayo, se tomó una muestra representativa de 3355 g de árido grueso, la cual fue sometida a una serie de tamices estandarizados. Se pesó la fracción retenida en cada uno para determinar la curva de distribución granulométrica.

Según la norma INEN 1573:2010, los agregados gruesos deben presentar la mayoría de sus partículas entre los tamices 1 ½" (37.5 mm) y N.º 4 (4.75 mm). En el caso del residuo cerámico, el 63.46% del material pasó por el tamiz N.º 4, cumpliendo dimensionalmente con el rango correspondiente a agregados gruesos.

Sin embargo, los resultados reflejaron una distribución desigual: abundancia de partículas de ciertos tamaños y escasez en otros. Esto dificultó

Tabla 9: Granulometría PREDELCA

GRANULOMETRÍA SERIE GRUESA PREDELCA				
Tamiz ASTM		Masa Retenida		% Pasante
Abertura	Nº.	Parcial	Acumulada	
600, mm	24"			
300, mm	12"			
150, mm	6"			
75, mm	3"			
63, mm	2½"			
50, mm	2"			
38,1 mm	1½"	0	0,0	100,0
25, mm	1"	0,1	0,1	100,0
19, mm	¾"	0,1	0,2	100,0
12,5 mm	½"	110,7	108,0	96,4
9,5 mm	⅜"	202,1	304,9	89,8
4,75 mm	No. 4	764,8	1049,8	65,0
Pasa No.4		11,7	10,7874	

Fuente: Predelca (2021)

ta que las partículas encajen correctamente al mezclar el hormigón, afectando su compacidad.

Este comportamiento se explica por la naturaleza del material: al provenir de cerámicas rotas sin control dimensional, el residuo muestra una distribución granulométrica desordenada. Como resultado, hay zonas con acumulación y otras con vacíos, lo que afecta la estructura del hormigón al generar huecos, disminuir resistencia y aumentar la porosidad.

Para comparar, se realizó el mismo análisis al árido convencional de Predelca (Tabla 9). Este material mostró una curva más continua y uniforme, resultado de un proceso industrial controlado. Aunque ambos presentan porcentajes similares en el tamiz N.º 4 (63.46% en el cerámico y 65.0% en el convencional), las diferencias en la homogeneidad y equilibrio entre tamaños son evidentes.

Desde el punto de vista técnico, según el ingeniero William Lituma, del laboratorio de ingeniería civil de la Universidad del Azuay, el residuo cerámico podría aportar beneficios como menor absorción de agua y menor riesgo de fisuración, debido a su

escasa cantidad de partículas finas. Sin embargo, también implica menor cohesión y trazabilidad respecto al material convencional, que tiene más finos y permite mezclas más homogéneas y trabajables.

Este análisis permitió identificar que, si bien el residuo cerámico cumple con los requisitos dimensionales para ser considerado agregado grueso, su distribución granulométrica debe mejorarse antes de incorporarlo en diseños estructurales. Para ello, es imprescindible usar al menos tres tamices intermedios y asegurar una clasificación más equilibrada. Solo con este control técnico, el Chamote Monoquema podrá aprovecharse eficientemente como sustituto parcial del agregado grueso convencional.

Imagen 11: Proceso de Tamizado



Fuente: Autoría propia

Imagen 12: Áridos Gruesos (Chamote Monoquema)



Fuente: Autoría propia

## Análisis de Resultados del Ensayo de Granulometría de Aridos Finos

Con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica del uso de residuos cerámicos reciclados (Chamote Monoquema) como agregado fino en hormigón, se realizó un ensayo de granulometría conforme a la norma INEN 1573:2010. Esta prueba permite conocer cómo se distribuyen los tamaños de las partículas en el material, lo cual influye directamente en su comportamiento dentro de la mezcla, especialmente en términos de trabajabilidad, cohesión, demanda de agua y riesgo de retracción.

Se tomó una muestra representativa, la cual fue lavada, secada y tamizada mediante una batería de tamices estandarizados (Imagen 11), que iban desde 1½" hasta el N.º 200. Se midió la fracción retenida en cada tamiz y se calculó el porcentaje pasante acumulado. El análisis mostró que el 38.88% del material fue retenido en el tamiz N.º 4, lo que confirma que el material se encuentra dentro del rango granulométrico que corresponde a los agregados finos (Tabla 10)

No obstante, a partir del tamiz N.º 8, se observó que más del 95% del material pasaba por todos los tamices.

Tabla 10: Granulometría Pasta Monoquema

GRANULOMETRÍA SERIE FINA PASTA MONOQUEMA				
Tamiz N°	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido acumulado	% Retenido	% Pasa
1½"	90	90	2,69	97,31
1"	916	1006	5,27	94,73
¾"	1042	2048	10,67	89,33
½"	790	2838	15,30	84,70
3/8"	155	2993	30,02	69,98
N° 4	181	3174	38,88	61,12
Pan	177			
N° 8	27,88	27,88	4,19	95,81
N° 19	4,99	32,87	4,78	95,22
N° 16	12,52	45,39	4,83	95,17
N° 30	11,37	56,76	4,88	95,12
N° 40	6,02	62,78	4,83	95,17
N° 50	5,12	67,90	4,97	95,03
N° 100	10,16	78,06	5,04	94,96
N°200	7,89	85,95	5,07	94,93
Pan	1,89			

Fuente: Autoría propia

ces, incluyendo los más finos como el N.º 100 y el N.º 200. Esta condición indica un contenido muy alto de partículas finas y ultrafinas, lo cual tiene implicaciones importantes. Aunque la presencia de finos puede mejorar la cohesión inicial de la mezcla y reducir la posibilidad de segregación, también implica que hay una mayor superficie específica que debe ser cubierta por la pasta de cemento, lo que incrementa la demanda de agua y puede afectar negativamente la trabajabilidad y durabilidad del hormigón si no se corrige adecuadamente.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en los áridos finos de la empresa Predelca (Tabla 11), se evidenció que el residuo cerámico reciclado presenta una curva granulométrica más cerrada, con una concentración de partículas finas considerablemente mayor, especialmente en los tamices intermedios. Mientras que el material cerámico presenta más del 95% de pasante en los tamices N.º 16, N.º 50 y N.º 100, los áridos de Predelca presentan porcentajes significativamente menores en los mismos rangos, lo que les da una distribución más balanceada.

Este exceso de finos en el residuo cerámico puede pro-

Tabla 11: Granulometría Serie Fina PREDELCA

GRANULOMETRÍA SERIE FINA PREDELCA					
Tamiz ASTM		Masa Retenida		% Pasante Acumulado	% Pasa
Abertura	Nº.	Parcial	Acumulada		
2,36 mm	No. 8	119,70	119,70	76,06	23,94
2, mm	No. 10	0,00	130,49	73,90	26,10
1,18 mm	No. 16	141,30	261,00	47,80	52,20
0,85 mm	No. 20	0,00	261,00	47,80	52,20
0,60 mm	No. 30	108,10	369,10	26,18	73,82
0,425 mm	No. 40	0,00	369,10	26,18	73,82
0,3 mm	No. 50	60,20	429,30	14,14	85,86
0,15 mm	No. 100	29,20	458,50	8,30	91,70
0,075 mm	No. 200	14,30	472,80	5,44	94,56
Pasa No. 200		15,40	450,12		
Masa inicial del material para Lavado= 542 gr.					
Masa final corregida por Humedad de los finos=			500,0 gr.		
Masa Total del Material utilizados para el Ensayo=			10,8 gr.		

Fuente: Predelca (2021)

vocar mezclas con mayor riesgo de retracción plástica si no se controlan cuidadosamente las condiciones de curado. También puede afectar la fluidez y la colocación del hormigón, obligando al uso de aditivos plastificantes o reductores de agua y a realizar ajustes en la relación agua/cemento.

La curva obtenida muestra que el agregado fino cerámico reciclado, como se muestra en la Imagen 13, presenta una distribución muy cerrada, con una alta proporción de partículas finas y ultrafinas, lo cual lo diferencia de agregados tradicionales como los de Predelca, que presentan una curva más balanceada. Esta condición puede favorecer la cohesión de la mezcla en estado fresco, pero también implica una mayor demanda de agua y cemento, además de un potencial incremento en el riesgo de retracción plástica.

En términos de comportamiento, el material puede ser utilizado como agregado fino, siempre que se tomen medidas de ajuste en el diseño de la mezcla, como modificar la relación agua/cemento, mezclarlo con áridos de granulometría más gruesa o incorporar aditivos plastificantes que mejoren su trabajabilidad sin comprometer la resistencia ni la durabilidad. Bajo es-

tas condiciones, el residuo cerámico reciclado representa una alternativa técnica viable y ambientalmente responsable para su uso en hormigón.

Imagen 13: Áridos Finos (Pasta Monoquema)



Fuente: Autoría propia

## Pruebas de Absorción de Humedad: Ensayo de contenido de humedad Predelca

El presente ensayo se compara los valores obtenidos de los áridos gruesos con cerámica reciclada (pasta monoquema) y los resultados de absorción de humedad de la empresa PREDELCA en el laboratorio SV

CONCRETE. Los parámetros evaluados incluyen el porcentaje de absorción y el contenido de humedad de los áridos, aspectos fundamentales para la correcta dosificación y desempeño del hormigón, como muestra la Tabla 12.

Tabla 12: Tabla de Ensayo de Contenido de Humedad

Ensayo de Contenido de Humedad	Material Serie	
	Gruesa	Fina
Recipiente N°	6, 8, 9	3, 4, 5
Masa de Recipiente + Muestra Humeda (P1)	64,00	63,90
Masa de Recipiente + Muestra Seca (P2)	62,70	60,00
Masa de Agua (P3= P1- P2)	1,30	3,90
Masa de Recipiente (P4)	13,90	13,90
Masa de Muestra Seca (P5= P2 - P4)	48,80	46,10
% de Humedad (W= P3*100 + P5)	2,66	8,46

Fuente: Autoría propia

Imagen 14: Áridos Finos (Pasta Monoquema)



Fuente: Autoría propia

## Resultados de Absorción de Humedad:

El árido con cerámica reciclada presentó un 7% de absorción, mientras que el árido convencional evaluado por PREDELCA obtuvo 3,09%. Esto indica que el árido reciclado tiene más del doble de capacidad de absorción en comparación con el material estándar, lo que sugiere una mayor porosidad.

Este factor es bastante importante, ya que un árido con alta absorción puede retener agua dentro de su estructura, reduciendo la cantidad de agua libre disponible para la hidratación del cemento, por lo que si no se ajusta la cantidad de agua en la mezcla, se pueden presentar problemas en la trabajabilidad y la resistencia final del hormigón.

## Resultados de Contenido de Humedad:

El contenido de humedad del árido con cerámica reciclada fue 2,66%, mientras que el árido de PREDELCA registró valores inferiores al 2%. Este incremento indica que el material reciclado retiene más agua en su superficie. Una cantidad mayor de agua en la mezcla

puede afectar la viabilidad y, en algunos casos, provocar fisuración por retracción o afectar la durabilidad del material a largo plazo.

El uso de un árido con una mayor porosidad también puede influir en la resistencia y durabilidad del hormigón.

Los resultados muestran que el árido con cerámica re-

ciclada tiene propiedades significativamente diferentes a los áridos convencionales utilizados por PREDELCA en SV CONCRETE. Su mayor absorción y contenido de humedad (Tabla 13), requieren ajustes en la dosificación del agua y monitoreo de su impacto en las propiedades mecánicas del hormigón.

Tabla 13: Tabla de Ensayo de Contenido de Humedad Chamote Monoquema

Ensayo de Contenido de Humedad CHAMOTE MONOQUEMA	Humedad del Material pasante Nro4	
Nº Tarro	55	59
Peso Tarro	30,09	29,99
Peso tarro + Muestra Húmeda	104,35	108,19
Peso tarro + Muestra Seca	103,76	107,61
Peso Seco	0,59	0,58
Peso agua	73,67	77,62
% de Humedad	0,80	0,75
% de Humedad Promedio	0,77	

Fuente: Autoría propia

## Ensayo de Gravedad Específica de los Sólidos (Gs) en Áridos con Cerámica Reciclada

Tabla 14: Tabla de Ensayo de Gravedad Específica

Gravedad Específica de los Sólidos (Gs)		
Ensayo N°	1	Absorción 3,09
Volumen del frasco a 20°C	500 ml	
Método de remoción del aire	Vacío	
Peso picnómetro + agua	706,65	
Densidad del agua	30	
Peso del suelo seco	0,9956	
Volumen desplazado	97	
Gs	37,97	
k20	2,54	
R	0,9982	
Gs20	≤1,02	Está bien
Gravedad específica promedio de los sólidos 2,54		

Fuente: Autoría propia

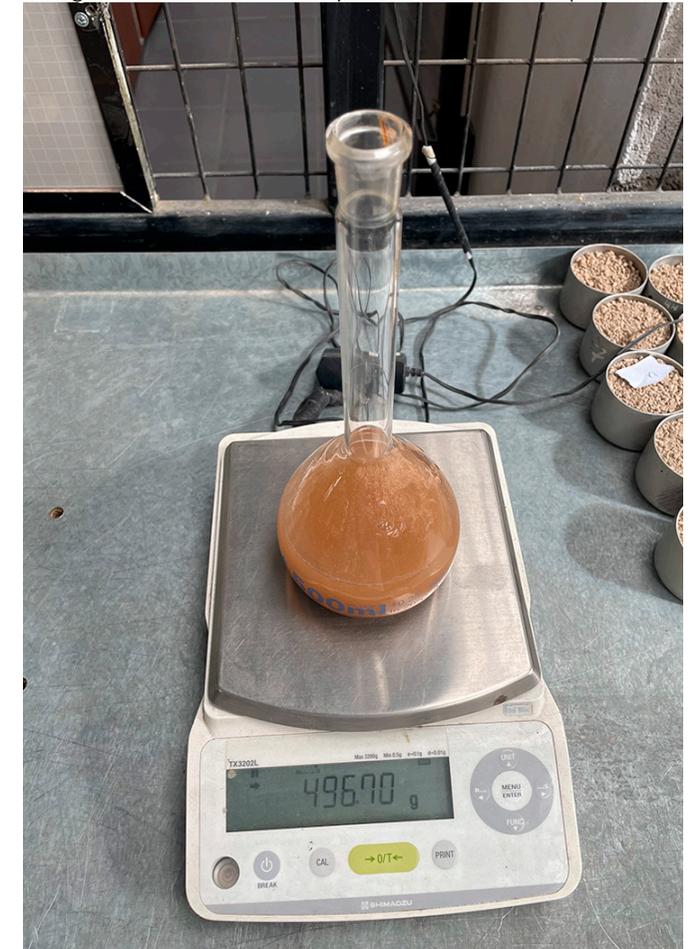
Como explica el Ing. William Lituma, encargado del laboratorio de ingeniería civil de la Universidad del Azuay, el ensayo de gravedad específica de los sólidos se realiza para comparar la densidad de un material sólido con la del agua, permitiendo conocer qué tan pesado es en relación con este líquido. Este parámetro es clave para identificar las propiedades de los áridos, ya que afecta la cantidad de materiales en la mezcla de hormigón y su resistencia final.

La gravedad específica (Gs) se define como la relación entre la densidad del material sólido y la densidad del agua a una temperatura específica. El ensayo consiste en medir la masa del suelo seco, el volumen de agua desplazado y la masa del suelo dentro de un picnómetro lleno de agua. Estos valores permiten calcular la gravedad específica mediante la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{\text{masa del suelo seco}}{\text{volumen del agua desplazada}}$$

En este caso, el ensayo se realizó con una muestra de 500 mL a 30 °C, utilizando un picnómetro como método de medición. Se registraron los siguientes valores clave:

Imagen 15: Proceso ensayo de Gravedad Específica



Fuente: Autoría propia

- Peso del suelo seco: 97 g
- Volumen desplazado: 37,97 mL
- Densidad del agua: 0,99567 g/mL
- Gravedad específica calculada: 2,54
- Porcentaje de absorción: 3,09%

El valor de gravedad específica obtenido (2,54) se encuentra dentro del rango de áridos naturales, pero es ligeramente inferior al de áridos convencionales utilizados en hormigón, que suelen estar entre 2,6 y 2,8. Esto indica que el árido con cerámica reciclada tiene una menor densidad. El porcentaje de absorción obtenido (Tabla 14) en el ensayo es del 3,09%, lo cual es mayor que el de áridos naturales usados en hormigón estructural (generalmente entre 1-2%).

Este aumento en la absorción indica que la cerámica reciclada es más porosa, lo que puede generar varia-

ciones en la relación agua/cemento de la mezcla y afectar la manejabilidad del hormigón. El ensayo de gravedad específica permitió determinar que el árido con cerámica reciclada tiene una menor densidad y una mayor absorción en comparación con los áridos convencionales. Esto sugiere que su uso en hormigón puede requerir ajustes en la dosificación del agua y en el diseño de mezcla para evitar problemas de resistencia y durabilidad.

## Ensayo Límite Líquido

De la misma forma, el ing. William Lituma explica que el límite líquido es la cantidad de humedad necesaria para que un suelo pase de un estado plástico a un estado líquido. Se determina utilizando el dispositivo de Casa grande (Imagen 16), el cual mide el número de golpes necesarios para cerrar una abertura en la

muestra de suelo bajo condiciones controladas. A medida que aumenta el contenido de agua, el número de golpes necesarios para el cierre de la ranura disminuye. El porcentaje de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}} * 100$$

Este valor se usa para trazar una curva de fluidez y determinar el límite líquido cuando se alcanza la referencia de 25 golpes. Los resultados muestran en la Tabla 15, que el porcentaje de humedad aumenta a medida que disminuye el número de golpes, lo cual es una tendencia esperada en suelos con alta capacidad de absorción como la arcilla.

La muestra con 12 golpes presenta el mayor contenido de humedad (29,58%), mientras que la de 37 golpes tiene el valor más bajo (27,63%). En suelos naturales como arcillas o limos, el límite líquido suele estar en un rango de 20% a 50%, dependiendo del tipo de material y su estructura. Los valores obtenidos están dentro del rango esperado (20% - 50%), lo que confirma que el suelo cumple con las características de un material arcilloso.

Tabla 15: Tabla de Limite Líquido

LIMITE LÍQUIDO					
Tarro N°	N° de Golpes	Peso Tarro	Peso Húmedo	Peso Seco	% de Humedad
058	37	30,11	42,62	39,99	27,63
054	21	30,08	45,45	42,08	28,08
046	12	30,84	48,80	44,70	29,58

Fuente: Autoría propia

Al igual que análisis anteriores se demostró que el ensayo de límite líquido indica que el material analizado tiene una alta capacidad de absorción de agua, lo que puede influir en la trabajabilidad del hormigón.

## Ensayo de Límite Plástico en Suelos con Cerámica Reciclada

De igual forma el límite plástico, explicado por el laboratorista Ing. William Lituma, es el contenido de humedad mínimo a partir del cual un suelo deja de ser plástico y se vuelve quebradizo. Se determina mediante la prueba de hilos de suelo, en la que la muestra se amasa hasta formar cilindros de 3 mm de diámetro. Cuando los hilos comienzan a desmoronarse, la humedad correspondiente se considera límite plástico. Para este ensayo, se registraron los siguientes valores: A partir de estos datos, se calculó el límite plástico en 18,26% y el límite líquido en 28,35%, lo que permite determinar el índice de plasticidad (IP) mediante la siguiente ecuación:

$$IP = LL - LP$$
$$IP = 28,35 - 18,26 = 10,09$$

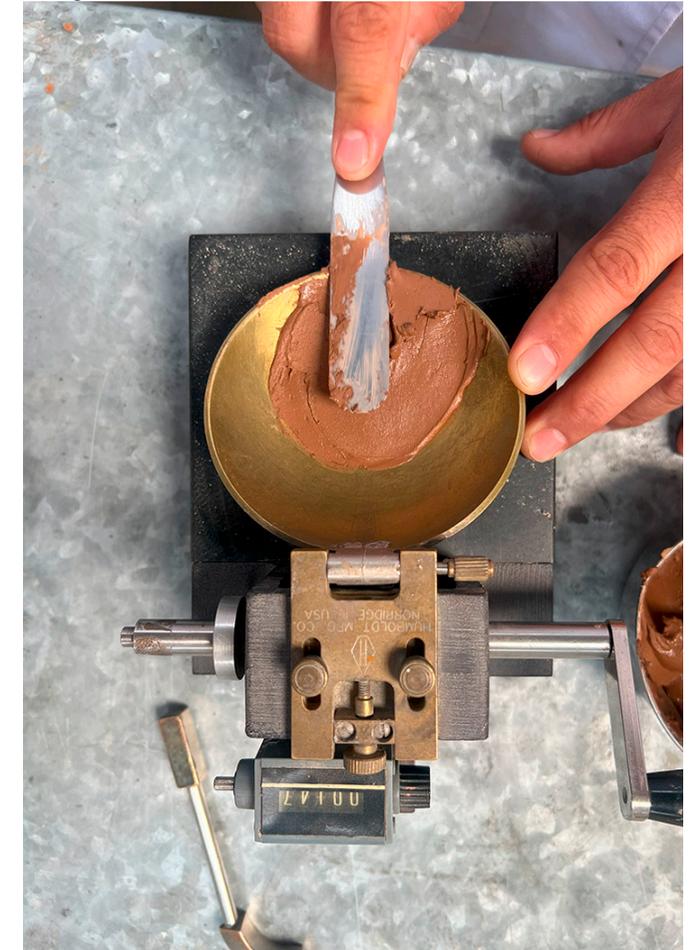
El límite plástico de 18,26% indica que el suelo mantiene una cantidad de humedad relativamente alta antes de perder su plasticidad. En comparación con suelos naturales, este valor sugiere una composición con alto contenido de finos, posiblemente influenciado por la presencia de cerámica reciclada.

El índice de plasticidad obtenido es de 10,09, lo que indica que el suelo tiene una plasticidad media. En términos generales:

- $IP < 7$ : Suelo de baja plasticidad (arenosos, limos no plásticos).
- $7 < IP < 17$ : Suelo de plasticidad media (limos plásticos y arcillas con baja plasticidad).
- $IP > 17$ : Suelo de alta plasticidad (arcillas expansivas).

El valor obtenido indica que el suelo no es altamente expansivo, pero tiene suficiente plasticidad para retener humedad. El ensayo de límite plástico indica que el material con cerámica reciclada posee una plasticidad media, con un índice de 10,09. Esto propone que el material tiene una capacidad moderada de retención de agua y cohesión.

Imagen 16: Instrumento Casa Blanca



Fuente: Autoría propia

# ENSAYOS DE INCORPORACIÓN DEL RESIDUO CERÁMICO EN EL HORMIGÓN

En esta etapa de la investigación, se llevarán a cabo ensayos para la incorporación de residuos cerámicos en el hormigón, lo que representa la fase experimental más crucial del proyecto. En este proceso se definirá la fórmula y la dosificación óptima para la fabricación de los elementos constructivos propuestos, asegurando que el material resultante posea las características mecánicas y estructurales adecuadas.

El desarrollo de esta fase se dividirá en dos etapas fundamentales basadas en el método de prueba y error. En primer lugar, se realizarán pruebas preliminares para determinar la viabilidad de la incorporación de los residuos cerámicos, evaluando su influencia en la resistencia y trabajabilidad del hormigón. Posteriormente, se procederá a la optimización de la mezcla, estableciendo las proporciones adecuadas de cemento, áridos finos y gruesos así como residuos cerámicos reciclados.

El objetivo principal de este estudio es obtener un hormigón con una resistencia óptima que, al mismo tiempo, logre incorporar la mayor cantidad posible de residuos cerámicos sin comprometer su desempeño estructural.

## 1.ª Fase:

Esta primera etapa se centra en la exploración del material y en el análisis de su comportamiento al ser incorporado en la mezcla de hormigón. Es fundamental destacar la metodología empleada en estos ensayos, los cuales se llevaron a cabo mediante la fabricación de probetas de hormigón en las instalaciones de PREDELCA.

El enfoque principal de esta fase consiste en sustituir el recuperado monoquema y el chamote monoquema por arena y ripio, respectivamente. Para ello, se realizó la recolección de los residuos cerámicos directamente de las montañas de desechos en Rialto, incorporándolos en la mezcla sin un tratamiento previo. Sin embargo, este procedimiento permitió la inclusión de impurezas y materiales ajenos a la cerámica, lo que pudo comprometer la calidad y el desempeño del hormigón.

## Dosificación 1.ª fase:

$$1 \text{ saco de Cemento} = \frac{2.5 \text{ Parihuelas Árido Fino}}{2.5 \text{ Parihuelas Árido Grueso}}$$

fórmula 1: Dosificación predelca

Se empleó esta dosificación (formula 1) debido a que es la misma que Predelca utiliza en la fabricación de sus elementos prefabricados. Es importante destacar que la cantidad de agua utilizada en estas pruebas fue determinada por los técnicos de la empresa, siguiendo los procedimientos habituales en su planta de producción. Además, se incorporó una pequeña cantidad del aditivo Sika ViscoFlow, de uso común en la empresa, con el objetivo de mejorar la trabajabilidad del hormigón.

Este aditivo es especialmente adecuado para mezclas de concreto que requieren una mayor fluidez y facilidad de manipulación. En este caso, se utilizó en una proporción del 0.6% en relación con el peso del cemento, asegurando así un adecuado desempeño de la mezcla.

En esta fase se diseñaron cinco mezclas experimentales, en las que se variaron los porcentajes de incorporación del residuo cerámico en sustitución de los áridos tradicionales. La proporción de reemplazo es experimental como primera fase, pero se escogieron porcentajes que varíen bastante para abarcar resultados más amplios. Para cada mezcla, se fabricaron

cinco probetas, las cuales fueron sometidas a ensayos de resistencia a compresión a diferentes edades de curado, con el fin de evaluar la evolución de su desempeño mecánico en el tiempo. A los 7 días de curado se realizó la primera serie de roturas de probetas para obtener los valores preliminares de resistencia y analizar la influencia del contenido de residuos cerámicos en la capacidad de carga del hormigón.

### Resultados 1.ª fase:

Los resultados de esta primera serie de pruebas, reflejados en la **Tabla 16**, mostraron que la resistencia a la compresión del hormigón convencional, sin residuos cerámicos, alcanzó 170 kg/cm<sup>2</sup>. En comparación, la mezcla que mejor desempeño tuvo dentro de las que contenían residuos cerámicos fue la de 30% de cerámica reciclada y 70% de áridos convencionales, la cual alcanzó una resistencia de 56 kg/cm<sup>2</sup>. Sin

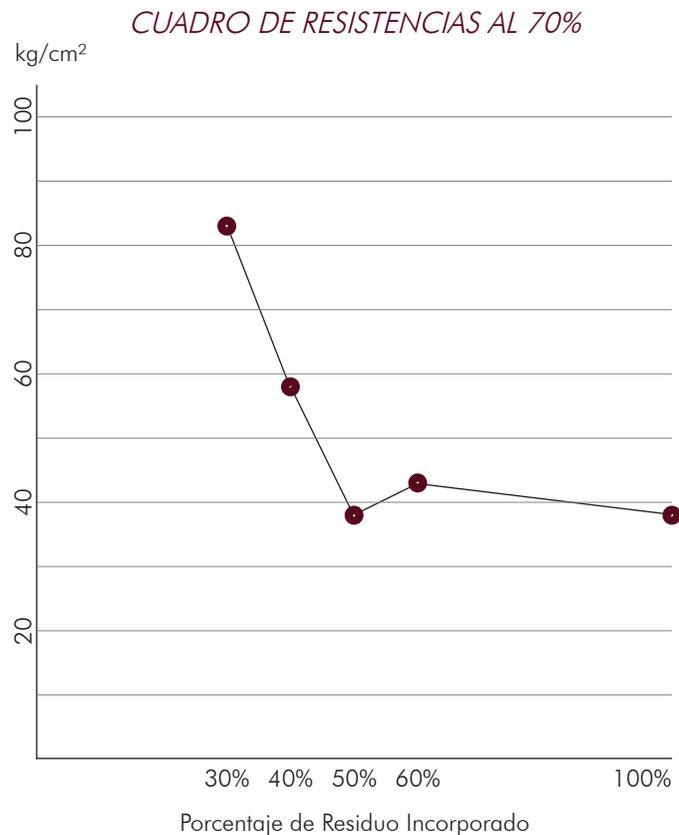
embargo, durante el proceso de experimentación se identificaron ciertos aspectos que pueden mejorarse, por lo que se planifican ajustes en las futuras pruebas para optimizar la mezcla y aumentar la resistencia del hormigón con material cerámico reciclado. En cuanto a los resultados de la primera fase, es importante destacar que la resistencia de las probetas ensayadas aún no alcanza los valores óptimos establecidos en esta investigación. Como se observa en la **Tabla 17**, la mayor resistencia obtenida corresponde

Tabla 16: Tabla de resultados 1.ª fase:

1.ª FASE: PROBETAS DE HORMIGÓN + RESIDUOS CERÁMICOS											
% Residuos	Elaboración	Rotura	Código	Edad (días)	Peso (kg)	Largo (cm)	Diámetro	Fuerza (KN)	Resistencia	F'c al 65%	Predicción
100%	12/Feb	19/Feb	M1	7	3,20	20,80	10,05	20,90	26 kg/cm <sup>2</sup>	25 kg/cm <sup>2</sup>	38 kg/cm <sup>2</sup>
	12/Feb	19/Feb	M2	7	3,24	20,50	10,14	18,30	23 kg/cm <sup>2</sup>		
60%	13/Feb	20/Feb	A1	7	11,66	30,00	15,15	51,50	29 kg/cm <sup>2</sup>	28 kg/cm <sup>2</sup>	43 kg/cm <sup>2</sup>
	13/Feb	20/Feb	A2	7	3,42	20,00	10,10	21,50	27 kg/cm <sup>2</sup>		
50%	12/Feb	19/Feb	M7	7	11,96	30,20	15,20	44,40	25 kg/cm <sup>2</sup>	25 kg/cm <sup>2</sup>	38 kg/cm <sup>2</sup>
	12/Feb	19/Feb	M8	7	11,94	30,00	15,30	44,30	25 kg/cm <sup>2</sup>		
40%	13/Feb	20/Feb	B1	7	11,86	30,00	15,00	61,10	35 kg/cm <sup>2</sup>	38 kg/cm <sup>2</sup>	58 kg/cm <sup>2</sup>
	13/Feb	20/Feb	B2	7	3,54	20,00	10,10	32,50	41 kg/cm <sup>2</sup>		
30%	12/Feb	19/Feb	M13	7	12,28	29,90	15,20	99,60	56 kg/cm <sup>2</sup>	54 kg/cm <sup>2</sup>	83 kg/cm <sup>2</sup>
	12/Feb	19/Feb	M14	7	12,46	30,00	15,30	93,50	52 kg/cm <sup>2</sup>		

Fuente: Autoría propia

Tabla 17: Tabla de resistencia 1.ª fase:



Fuente: Autoría propia

a la mezcla que contiene un 30% de residuos cerámicos. Sin embargo, esta resistencia alcanzó únicamente 83 kg/cm<sup>2</sup>, un valor considerablemente inferior a los 210 kg/cm<sup>2</sup> registrados en el hormigón convencional sin residuos, fabricado en la misma fase experimental. Tras la recopilación de datos y el análisis de la metodología utilizada en esta primera etapa, se identificaron varias observaciones clave que deberán ser consideradas en la siguiente fase. La principal de ellas es que los residuos cerámicos empleados fueron recolectados directamente de las montañas de desechos de Rialto sin ningún tipo de clasificación ni análisis granulométrico previo.

Además, se evaluará la dosificación utilizada en la mezcla, así como la incorporación del aditivo, con el objetivo de optimizar los resultados en las siguientes pruebas.

## 2.ª Fase:

Para la segunda fase experimental, se han considerado minuciosamente las observaciones y conclusiones obtenidas en la fase anterior. El objetivo principal de esta etapa es mejorar la resistencia del hormigón

con residuos cerámicos, de manera que pueda ser empleado en la fabricación de elementos constructivos prefabricados sin comprometer su desempeño estructural. En esta fase, se implementarán ajustes en la metodología, como la selección y clasificación granulométrica de los residuos cerámicos, con el fin de optimizar su integración en la mezcla.

Asimismo, se analizarán posibles modificaciones en la dosificación y el uso de aditivos para mejorar la trabajabilidad y resistencia del material resultante. La viabilidad de esta etapa dependerá en gran medida de las observaciones y aprendizajes obtenidos en la fase previa, permitiendo corregir deficiencias y validar nuevas estrategias que conduzcan a un hormigón con propiedades mecánicas más adecuadas para su aplicación en la industria de la construcción.

En esta nueva fase experimental, se prioriza el tratamiento adecuado de los residuos cerámicos, corrigiendo la deficiencia detectada en la etapa anterior, donde estos fueron incorporados a la mezcla sin ningún tipo de lavado ni procesamiento previo. El objetivo principal fue limpiar los residuos de impurezas y asegurarse de que su granulometría fuera similar a

Imagen 17: Tamices Fabricados



Fuente: Autoría propia

la de los áridos comúnmente utilizados en la fabricación de hormigón, optimizando así su integración en la mezcla.

Para lograr esta mejora, se diseñaron y fabricaron dos tamices, los cuales se pueden observar en la Imagen 17, con dimensiones de 80 x 60 centímetros. Uno de ellos incorporó una malla de 3/4", mientras que el otro utilizó un tamiz #16. Ambos fueron construidos con una base de vigas cuadradas de madera de 5 centímetros por lado, lo que les otorgó la rigidez necesaria para soportar el peso del material durante su clasificación.

Estos tamices fueron empleados en la recolección de los residuos cerámicos directamente en la empresa Rialto, permitiendo seleccionar únicamente las partículas del tamaño requerido y descartando aquellos fragmentos conglomerados que no aportarían al proceso y que, en la fase anterior, habían sido considerados como excedentes o material no aprovechable. Con esta estrategia, se garantiza una mayor homogeneidad en los residuos cerámicos utilizados, lo que facilitará su incorporación en el hormigón y mejorará su desempeño estructural en las siguientes pruebas.

Durante el proceso de tamizado, lavado y limpieza de los residuos cerámicos, se observó un fenómeno particular con el polvo atomizado, también conocido como recuperado monoquema. Este material se desintegraba con facilidad y no lograba mantenerse en el tamiz requerido, lo que evidenció su falta de estabilidad granulométrica. A diferencia de la arena convencional, que posee una granulometría controlada de aproximadamente 2 milímetros y puede ser utilizada como reemplazo en la mezcla de hormigón, el polvo atomizado no alcanzaba las dimensiones necesarias para cumplir esta función.

Esta observación fue respaldada por los análisis de laboratorio realizados previamente, los cuales afirman que la cantidad de partículas del tamaño granulométrico adecuado dentro del recuperado monoquema era mínima, representando un porcentaje prácticamente insignificante en comparación con los volúmenes requeridos para la mezcla. Debido a estos hallazgos, se tomó la decisión de descartar este residuo en la fase experimental, ya que su inclusión en la mezcla no aportaría beneficios significativos en términos de resistencia estructural.

En lugar de contribuir al desempeño mecánico del hormigón, su presencia podría incluso comprometer la integridad de la mezcla. Esta decisión permitió enfocar los esfuerzos en el uso de residuos cerámicos con mejores propiedades estructurales, optimizando así la formulación del material y asegurando que los elementos prefabricados alcanzaran las condiciones requeridas para su aplicación en construcción.

Una vez que los residuos cerámicos han sido preparados adecuadamente para su incorporación en la mezcla de hormigón, es fundamental considerar la dosificación de los materiales, ya que esta influye directamente en la resistencia final del producto. En la fase anterior, se utilizó la misma dosificación con la que Predelca elabora sus elementos prefabricados.

### Dosificación 2.ª fase:

$$1 \text{ saco de Cemento} = \frac{2 \text{ Parihuelas Árido Fino}}{2 \text{ Parihuelas Árido Grueso}}$$

fórmula 2: Dosificación 2.ª Fase

Sin embargo, en esta nueva etapa se decidió realizar ajustes en la composición de la mezcla (formula 2) con el objetivo de mejorar su desempeño estructural.

El principal cambio en esta fase experimental fue el incremento en la cantidad de cemento y la reducción de los áridos en la mezcla. Este ajuste se fundamenta en la necesidad de aumentar la proporción de clinker, el componente activo del cemento, para mejorar la adherencia entre los áridos y lograr una mayor cohesión en la mezcla.

Al incrementar la cantidad de material cementante, se busca reforzar la estructura del hormigón y mejorar su resistencia mecánica. Un aspecto relevante en esta fase es la implementación de una dosificación precisa (formula 3) del agua incorporada en la mezcla. A diferencia de la fase anterior, donde la cantidad de agua no fue estrictamente medida, en esta etapa se establecerá un control exacto sobre su proporción. Esto permitirá realizar ajustes específicos en función de los resultados obtenidos, ya sea aumentando o reduciendo la cantidad de agua según las necesidades del material.

El control preciso del agua en la mezcla es fundamental para optimizar la trabajabilidad del hormigón y mejorar su resistencia final. Para determinar la cantidad adecuada, el cálculo se realizó en función del

peso total del material cementante aplicado, utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Peso del Cemento}}{0.25\% \text{ Peso del Cemento en Agua}}$$

fórmula 3: Dosificación 2.ª Fase

Si bien en esta fase se optimizó la dosificación de la mezcla, se reguló de manera precisa la cantidad de agua incorporada y se trató adecuadamente los residuos cerámicos, descartando aquellos que no aportan a la composición del hormigón, aún quedaba por abordar un aspecto clave identificado en la fase anterior. La última consideración necesaria para esta etapa fue la selección del aditivo adecuado, con el propósito de mejorar la consistencia de la mezcla y garantizar que alcanzará las propiedades requeridas.

Para ello, fue indispensable contar con la asesoría de profesionales especializados en aditivos para hormigón. Se llevó a cabo una reunión con el ingeniero Hugo Egüez, asesor técnico de Sika en la ciudad de Cuenca, a quien se le presentó el contexto de la investigación y los resultados obtenidos en la primera fase. Durante la reunión, el ingeniero recomendó el uso de un plastificante en lugar de un aditivo convencional,

ya que, a diferencia de estos últimos, el plastificante no altera las propiedades químicas del hormigón, sino que mejora su trabajabilidad y resistencia.

En particular, sugirió el uso del plastificante Sika Visco-Crete GL 7952, el cual tiene la capacidad de reducir la cantidad de agua requerida en la mezcla, mejorar su fluidez y aumentar su resistencia final. Siguiendo su recomendación, se incorporó este plastificante en una proporción del 1% en relación con el peso del cemento utilizado en la mezcla. Con esta mejora, se espera

obtener un hormigón con mejores características mecánicas y una mayor durabilidad.

Con todas las consideraciones previas resueltas, se procedió a la elaboración de las probetas de hormigón correspondientes a esta fase experimental. En esta ocasión, únicamente se pudieron realizar cuatro tipos de mezclas debido a la cantidad limitada de plastificante disponible, lo que restringió la producción de un mayor número de pruebas. Para garantizar la precisión en la dosificación, se controló meticulosamente

el peso y porcentaje de cada material incorporado en la mezcla.

El proceso de elaboración consistió en agregar primero los áridos, seguidos por el cemento, para luego proceder con la adición de agua de manera gradual y, finalmente, incorporar el plastificante. Los datos específicos sobre los porcentajes empleados y sus respectivas variaciones se detallan en la **Tabla 18**, la cual ofrece una visión clara de los resultados obtenidos en esta fase. Un aspecto relevante que se presentó durante el proceso fue que, al día siguiente de la elab-

Tabla 18: Tabla de resultados 2.ª fase:

2.ª FASE: PROBETAS DE HORMIGÓN + RESIDUOS CERÁMICOS											
% Residuos	Elaboración	Rotura	Código	Edad (días)	Peso (kg)	Largo (cm)	Diámetro	Fuerza (KN)	Resistencia	F'c al 80%	Predicción
20%	13/Mar	27/Mar	A1	14	13,36	30,00	15,10	35,80	20 kg/cm <sup>2</sup>	19 kg/cm <sup>2</sup>	24 kg/cm <sup>2</sup>
	13/Mar	27/Mar	A2	14	13,16	30,00	15,00	32,20	19 kg/cm <sup>2</sup>		
25%	13/Mar	27/Mar	B1	14	13,20	30,00	15,00	24,60	14 kg/cm <sup>2</sup>	15 kg/cm <sup>2</sup>	19 kg/cm <sup>2</sup>
	13/Mar	27/Mar	B2	14	13,16	30,00	15,08	28,10	16 kg/cm <sup>2</sup>		
30%	13/Mar	27/Mar	C1	14	13,26	30,00	15,20	17,40	10 kg/cm <sup>2</sup>	10 kg/cm <sup>2</sup>	13 kg/cm <sup>2</sup>
	13/Mar	27/Mar	C2	14	13,28	30,00	15,20	17,30	10 kg/cm <sup>2</sup>		
40%	13/Mar	27/Mar	D1	14	13,08	30,00	15,10	43,50	25 kg/cm <sup>2</sup>	30 kg/cm <sup>2</sup>	38 kg/cm <sup>2</sup>
	13/Mar	27/Mar	D2	14	13,06	30,00	15,20	62,50	35 kg/cm <sup>2</sup>		

Fuente: Autoría propia

Imagen 18: Probetas 1.º fase



Fuente: Autoría propia

Imagen 19: Probetas 2.º fase



Fuente: Autoría propia

boración de las probetas, al intentar desencofrarlas, se observó que aún no estaban completamente compactadas.

Ante esta situación, se consultó con el asesor técnico de Sika, quien explicó que una posible causa de este comportamiento era que el plastificante pudo haber actuado como un retardante del fraguado. Como medida correctiva, recomendó extender el tiempo de desencofrado a 48 horas y realizar las pruebas de resistencia a la compresión una vez que las probetas alcanzaran 14 días de fraguado, asegurando así que la mezcla desarrollara sus propiedades mecánicas adecuadamente.

## Resultados 2.ª fase:

Los resultados de los ensayos de compresión realizados en esta fase fueron inferiores a los obtenidos en la primera fase, como se puede observar en la **Tabla 19**. Si bien no se ha podido determinar con precisión la causa exacta de estos resultados, se llegó a la hipótesis de que el plastificante utilizado podría haber influido negativamente en el desempeño del hormigón. Esta teoría se sustenta en las diferencias evidenciadas en la consistencia de la mezcla y en la textura final de

las probetas en comparación con las elaboradas en la fase anterior, lo cual se puede apreciar en las **Imágenes 18 y 19**.

Además de estas diferencias, se ha observado de manera reiterada un comportamiento particular de los residuos cerámicos al incorporarse en la mezcla de hormigón. A diferencia de los áridos gruesos convencionales, estos residuos no presentan una adecuada adherencia dentro de la matriz cementante, lo que genera una falta de cohesión en la mezcla. Como se puede evidenciar en la **Imagen 20**, tras la ruptura de las probetas, los residuos cerámicos se mantienen prácticamente intactos, sin mostrar signos de haber sido afectados por la mezcla.

Esto sugiere que el hormigón no logra una integración efectiva con estos residuos, permitiendo incluso su reutilización después de los ensayos. Con base en estos hallazgos, se hace imprescindible replantear la metodología para la siguiente etapa de experimentación. Se deberá evaluar nuevas estrategias de tratamiento y preprocesamiento de los residuos cerámicos para mejorar su compatibilidad con la mezcla de hormigón, así como reconsiderar el uso de aditivos o plas-

Tabla 19: Tabla de resistencia 2.ª fase:

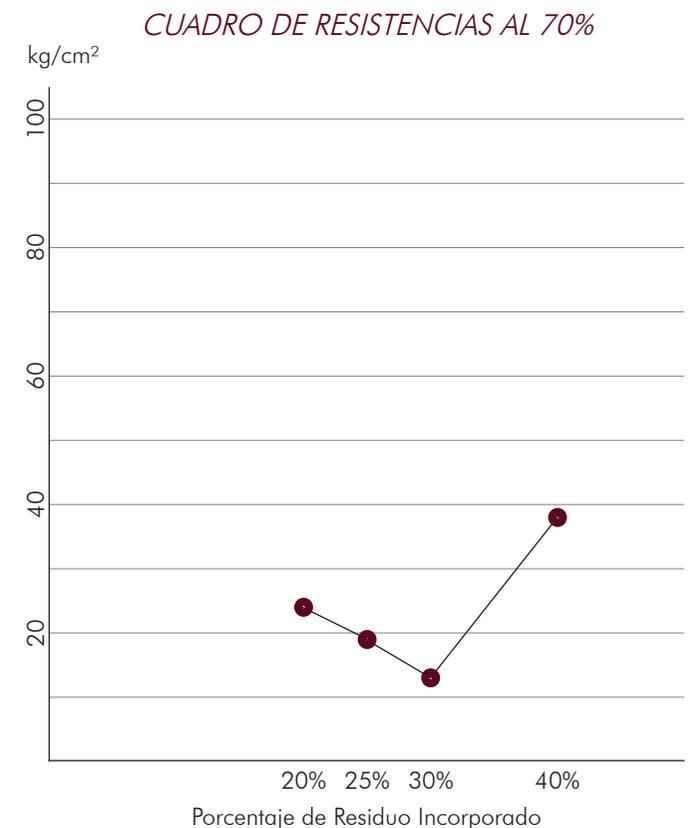


Tabla 11: Cuadro de Resistencia en la 2.ª Fase

Imagen 20: Ruptura Probetas



Fuente: Autoría propia

tificantes que puedan estar afectando negativamente la cohesión del material. Estos aspectos serán clave en la planificación y ejecución de la tercera fase experimental.

Haciendo una recapitulación de los aspectos clave a intervenir, es fundamental realizar un análisis detallado sobre el uso de aditivos o plastificantes. Si bien estos compuestos pueden mejorar la resistencia del hormigón y optimizar su trabajabilidad, también pueden influir negativamente en el acabado y la cohesión de la mezcla. Se deberá evaluar con precisión el impacto que tienen en la adherencia de los residuos cerámicos dentro del hormigón, para evitar que estos actúen como elementos independientes dentro de la mezcla.

Otro punto crucial será la optimización de la dosificación del hormigón. Ajustar correctamente la proporción de los materiales no solo impactará la resistencia de los elementos prefabricados, sino que también tendrá una influencia directa en los costos de producción. Este factor es determinante para evaluar la viabilidad económica del proyecto y establecer si la fabricación de estos elementos es factible a nivel industrial. Por último, es imprescindible revisar la granulometría de

los residuos cerámicos empleados en la investigación, ya que su tamaño y distribución afectan la homogeneidad y resistencia de la mezcla.

Además, se debe considerar la posible incorporación de otros materiales o agentes estabilizadores que puedan mejorar la cohesión y desempeño del hormigón con residuos cerámicos, con el objetivo de alcanzar un producto con características óptimas tanto estructurales como económicas.

### 3.º Fase:

Durante esta fase de la investigación, se prioriza el análisis y control del tamaño granulométrico de los residuos cerámicos incorporados en la mezcla. Tal como se evidenció en la fase anterior, varios fragmentos cerámicos presentaban dimensiones excesivamente grandes en relación al volumen total de la mezcla, lo que impedía una correcta cohesión del hormigón, afectando negativamente su desempeño estructural y su homogeneidad.

Como parte de las recomendaciones técnicas, se contó con la colaboración directa del ingeniero Daniel

Gutiérrez, especialista en ensayos de hormigón en la planta de Prefabricados Predelca. El profesional enfatizó que uno de los factores determinantes para alcanzar una mezcla eficiente es lograr que los residuos cerámicos que reemplazan al árido grueso (específicamente al ripio) presenten características morfológicas y granulométricas lo más similares posibles a este material convencional.

Para ello, indicó que no basta con limpiar y secar los residuos, sino que es indispensable someterlos a un proceso de fragmentación controlada y tamizado específico. Atendiendo a esta indicación, se incorporó una etapa adicional de procesamiento: luego del secado y limpieza de los residuos cerámicos, se procedió a su rotura manual utilizando martillos, con el fin de reducir su tamaño de forma más precisa.

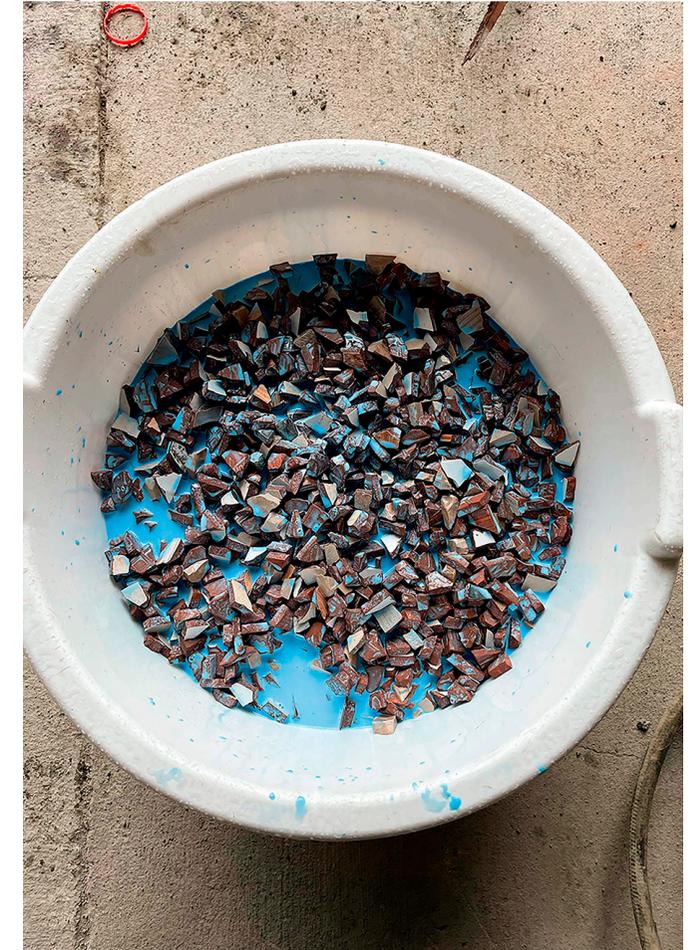
Posteriormente, se aplicó un doble tamizado (para asemejar más la granulometría de los residuos al del ripio) utilizando dos tamices dispuestos uno sobre otro. El primero, con una malla de 3/4 de pulgada, permite clasificar los residuos que cumplen con la dimensión máxima utilizada habitualmente por Predelca. El segundo tamiz, de 1/2 pulgada, retiene los fragmentos

demasiado pequeños que no aportan estructuralmente al hormigón. El objetivo de esta metodología fue seleccionar únicamente los residuos cerámicos que quedaban atrapados entre ambos tamices, es decir, aquellos que presentaban un tamaño intermedio, compatible con las propiedades del ripio utilizado normalmente.

Este proceso permitió obtener una muestra más homogénea, optimizando la adhesión del material cerámico con la matriz cementante, lo cual se espera que contribuya de forma positiva a los resultados estructurales de esta fase experimental.

A pesar del riguroso control granulométrico aplicado a los residuos cerámicos en esta fase experimental, estos materiales conservan una característica física que sigue representando una limitación técnica importante: la capa de esmalte superficial que permanece adherida desde su proceso de fabricación en la planta industrial de Rialto. Esta capa esmaltada, compuesta por materiales vitrificados, impide una adecuada interacción entre los residuos cerámicos y la matriz cementante del hormigón, dificultando significativamente la adherencia y, en consecuencia, la cohesión interna de la mezcla.

Imagen 21: Residuos en el ligante



Fuente: Autoría propia

Como se evidenció en las fases anteriores (específicamente en la imagen 17 del registro experimental), los residuos cerámicos tendían a comportarse como elementos independientes dentro del hormigón, ya que la mezcla no lograba fijarse correctamente a su superficie. Esta deficiencia en la cohesión interna entre los componentes del hormigón afecta directamente su desempeño estructural, reflejándose en los bajos resultados en los ensayos de resistencia a la compresión.

Con el objetivo de mitigar este problema, en esta etapa se implementó el uso de un producto químico específico para mejorar la adherencia entre superficies cerámicas y morteros: el Sika Ligante. Este producto, comúnmente utilizado en la colocación de porcelanatos y revestimientos cerámicos, actúa como puente de adherencia entre superficies de baja porosidad y nuevas capas de mortero o concreto. Su fórmula, que se diluye en agua, permite modificar la tensión superficial de los materiales esmaltados, facilitando la fijación de compuestos cementantes.

En el contexto de esta investigación, se adoptó un procedimiento experimental en el cual los residuos cerámicos ya clasificados y limpios fueron sumergidos

en una solución de Sika Ligante diluida, tal como se muestra en la Imagen 21. Estos fragmentos permanecieron en reposo durante aproximadamente 30 minutos, permitiendo que el producto actuará sobre la superficie esmaltada. Posteriormente, los residuos fueron retirados de la solución y, sin aplicar enjuague adicional, se incorporaron directamente en la mezcla de hormigón.

Esta intervención busca establecer una mejor integración entre el residuo cerámico y la mezcla, mejorando la adherencia y, por ende, aumentando las posibilidades de obtener un material más homogéneo y resistente.

### Dosificación 3.<sup>ª</sup> fase:

$$1 \text{ saco de Cemento} = \frac{2 \text{ Parihuelas Árido Fino}}{2.5 \text{ Parihuelas Árido Grueso}}$$

fórmula 4: Dosificación 3.<sup>ª</sup> Fase

Uno de los aspectos fundamentales para alcanzar mejores resultados en esta fase experimental radica en una correcta dosificación de los materiales que com-

ponen la mezcla, como se muestra en la fórmula 4. La proporción adecuada de cada componente influye de manera directa en la resistencia, cohesión y trabajabilidad del hormigón. Con este objetivo, se llevó a cabo un análisis conjunto con el equipo de laboratoristas de la empresa Predelca, revisando diversas formulaciones empleadas en investigaciones previas dirigidas por el arquitecto Carlos Contreras, actual director de esta investigación.

En dichos estudios se obtuvieron resultados destacados a partir de variaciones precisas en la proporción de cemento, áridos y aditivos. Tras una evaluación comparativa de los datos obtenidos, se identificó una dosificación que presenta un balance óptimo entre rendimiento mecánico y viabilidad técnica, considerando también la incorporación del residuo cerámico reciclado.

A partir de ello, se adoptará como base la siguiente fórmula de dosificación para su aplicación en esta nueva fase experimental: fórmula 5

$$\frac{\text{Peso del Cemento}}{0.30\% \text{ Peso del Cemento en Agua}}$$

fórmula 5: Dosificación de agua 3.<sup>ª</sup> Fase

Como se explicó anteriormente, la fábrica Predelca trabaja con elementos prefabricados elaborados a partir de una mezcla de hormigón de tipo semiseco. Esta condición implica que la proporción de agua incorporada en la mezcla es considerablemente menor en comparación con la utilizada en un hormigón convencional. Debido a esta particularidad en el proceso de producción, la dosificación del agua se ha determinado con especial cuidado, tomando en cuenta las condiciones específicas del material y el tipo de mezcla empleada. Por esta razón, la proporción de agua fue establecida de la siguiente manera:

Además de todas las consideraciones previamente mencionadas, con el objetivo de incrementar la fiabilidad de los resultados obtenidos en esta nueva fase experimental, se ha decidido incorporar un elemento adicional a la mezcla. En la actualidad, es común el uso de mallas electrosoldadas en elementos de concreto como pisos, muros y losas, con la finalidad de absorber los esfuerzos de tracción y torsión que actúan sobre los elementos estructurales.

No obstante, dado que en esta etapa aún no se han definido con precisión las dimensiones ni los volúme-

nes específicos de los elementos prefabricados que se fabricarán, la inclusión de mallas resulta poco viable. Ante esta situación, se optó por la incorporación de un material alternativo que cumple una función equivalente. Según el Ing. Jorge Arias, asesor técnico de la empresa Sika, existe un tipo de fibra sintética denominada Sikafiber Force-48, diseñada para ser añadida en proporción (formula 6) a la mezcla del hormigón.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de hormigón} = 3 \text{ kg de Fibra Force}$$

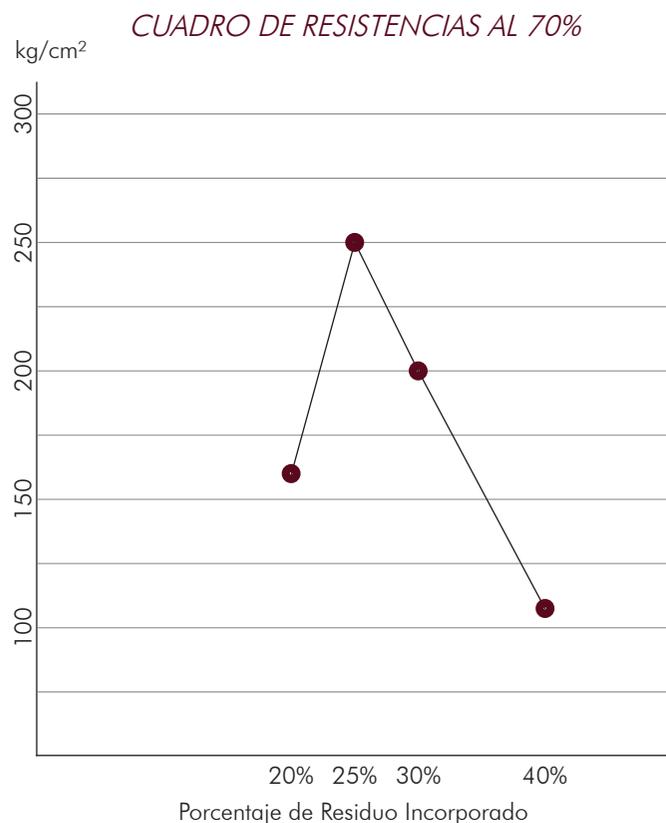
fórmula 6: Dosificación 3.ª Fase

Tabla 20: Tabla de resultados 3.ª fase:

3.ª FASE: PROBETAS DE HORMIGÓN + RESIDUOS CERÁMICOS											
% Residuos	Elaboración	Rotura	Código	Edad (días)	Peso (kg)	Largo (cm)	Diámetro	Fuerza (KN)	Resistencia	F'c al 70%	Predicción
20%	17/Abr	24/Abr	A1	7	3,82	20,00	10,10	106,40	135 kg/cm <sup>2</sup>	160 kg/cm <sup>2</sup>	228 kg/cm <sup>2</sup>
	17/Abr	24/Abr	A2	7	3,86	20,00	10,00	142,40	185 kg/cm <sup>2</sup>		
25%	17/Abr	24/Abr	B1	7	3,80	20,00	10,00	199,30	259 kg/cm <sup>2</sup>	248 kg/cm <sup>2</sup>	354 kg/cm <sup>2</sup>
	17/Abr	24/Abr	B2	7	3,84	20,00	10,10	186,10	237 kg/cm <sup>2</sup>		
30%	17/Abr	24/Abr	C1	7	3,70	20,00	10,00	155,90	202 kg/cm <sup>2</sup>	200 kg/cm <sup>2</sup>	285 kg/cm <sup>2</sup>
	17/Abr	24/Abr	C2	7	3,74	20,00	10,00	151,70	197 kg/cm <sup>2</sup>		
40%	17/Abr	24/Abr	D1	7	3,68	20,00	10,10	85,20	108 kg/cm <sup>2</sup>	108 kg/cm <sup>2</sup>	154 kg/cm <sup>2</sup>
	17/Abr	24/Abr	D2	7	3,70	20,00	10,10	85,20	108 kg/cm <sup>2</sup>		

Fuente: Autoría propia

Tabla 21: Tabla de resistencia 3.ª fase:



Fuente: Autoría propia

De acuerdo con su ficha técnica, este producto contribuye a mejorar significativamente el desempeño mecánico del hormigón, ya que incrementa la resistencia a la flexión y al corte, disipa las tensiones internas y previene la aparición de fisuras estructurales. Estas fibras actúan como refuerzo tridimensional dentro de la masa del hormigón, ofreciendo una solución eficiente y práctica en procesos de prefabricación.

### Resultados 3.ª fase:

Con todas las consideraciones previamente analizadas e implementadas, se procedió a la ejecución de esta nueva fase experimental, en la cual se respetaron de manera minuciosa cada uno de los pasos y parámetros establecidos. La elaboración de las probetas se llevó a cabo bajo condiciones controladas, distribuyéndolas en cuatro grupos con diferentes porcentajes de incorporación de residuos cerámicos, tal como se representa en la **Tabla 20**.

Una vez completado el proceso de fabricación, las probetas fueron sometidas a ensayos de compresión luego de un período de fraguado de siete días, a fin de evaluar el comportamiento mecánico de las nuevas

mezclas.

Los resultados obtenidos, también reflejados en la **Tabla 21**, fueron altamente satisfactorios. Las probetas alcanzaron niveles de resistencia a la compresión notablemente superiores a los obtenidos en fases anteriores, e incluso superaron los valores máximos de resistencia recomendados por la empresa Predelca, lo que evidencia el éxito de los ajustes realizados en esta etapa.

No obstante, uno de los inconvenientes más relevantes identificados en esta fase está relacionado con los costos de producción. Aunque estos no constituyen un aspecto prioritario dentro del objetivo experimental de la investigación, resultan determinantes al momento de evaluar la viabilidad económica y productiva del proyecto a futuro.

La incorporación de fibras sintéticas como las Sika Fiber Force 48 incrementa significativamente el costo total de la mezcla, llegando a representar un aumento aproximado del 37 % en comparación con una mezcla convencional. A ello se suma la utilización del Sika Ligante, un producto adicional que, si bien no se

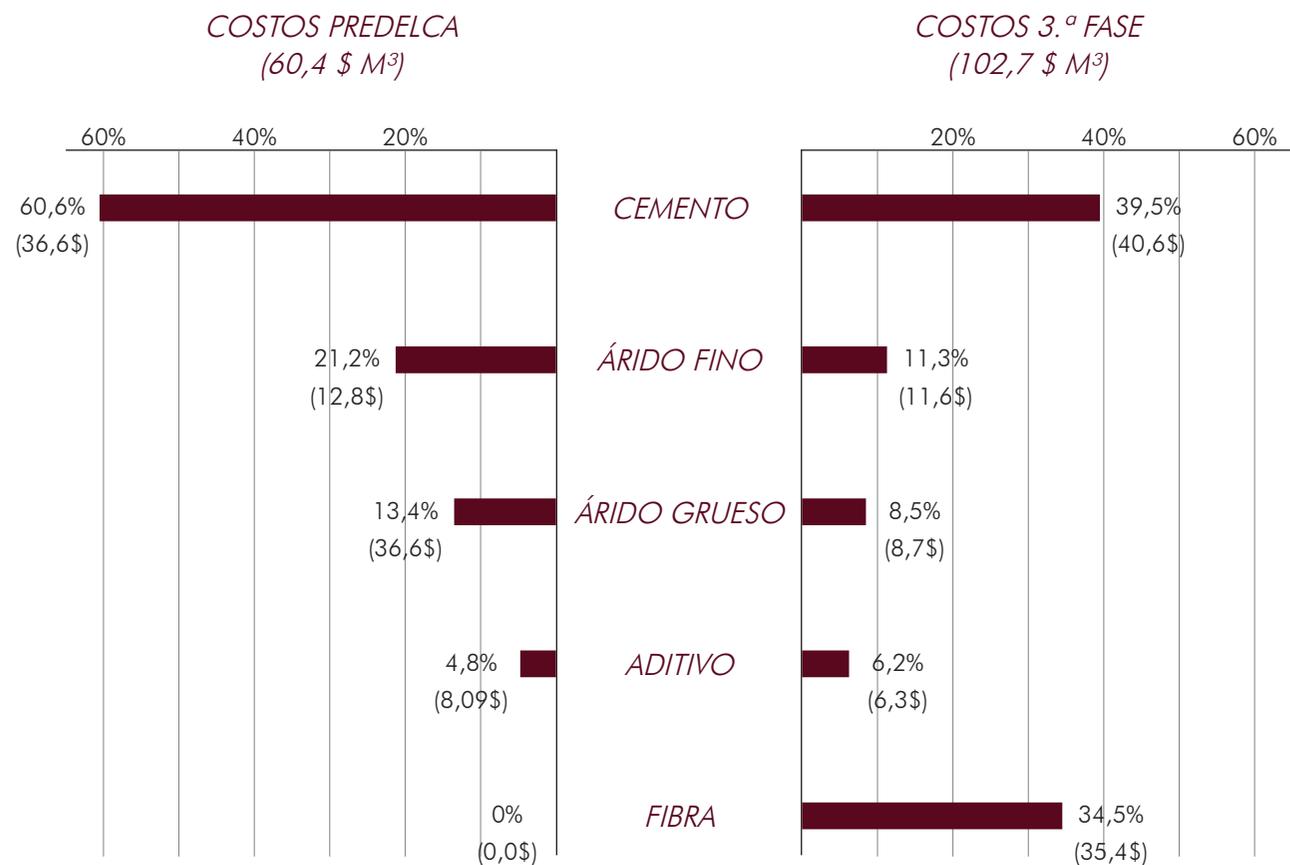
considera un componente estructural del hormigón, sí representa un costo en el proceso de fabricación.

Tal como se evidencia en la **Tabla 22**, existe una diferencia considerable entre los costos de producción de la mezcla empleada en Predelca y aquella desarrollada en esta investigación durante la fase 3. A pesar de que las dosificaciones de los materiales empleados son similares y las proporciones varían mínimamente, la inclusión de estos aditivos especializados eleva considerablemente el valor final del producto.

En conclusión, si bien la mezcla desarrollada en esta etapa cumple satisfactoriamente con los parámetros normativos de resistencia y calidad exigidos para elementos prefabricados, los elevados costos asociados a su producción podrían limitar su viabilidad en el contexto del mercado local. Será necesario, por tanto, continuar explorando alternativas que mantengan el desempeño mecánico logrado, pero con un costo de producción más competitivo.

Con el propósito de validar la viabilidad técnica y económica de la propuesta, se plantea la ejecución de una cuarta y última fase experimental. Esta etapa

Tabla 22: Tabla de Precios de producción



Fuente: Autoría propia

replicará la metodología aplicada en la fase anterior, manteniendo las mismas proporciones y procedimientos constructivos, con la salvedad de que se omitirá el uso del ligante químico utilizado previamente para mejorar la adherencia de los residuos cerámicos, así como la incorporación de fibras sintéticas en la mezcla.

La decisión de excluir estos aditivos responde a la necesidad de evaluar si es posible alcanzar una resistencia estructural aceptable, conforme a las normativas vigentes, utilizando exclusivamente residuos cerámicos procesados de forma adecuada, pero sin recurrir a insumos que eleven significativamente los costos de producción.

#### 4.ª Fase:

Esta fase adquiere una importancia estratégica dentro del desarrollo del proyecto, ya que permitirá determinar si se puede obtener un hormigón reciclado que no solo cumpla con los estándares técnicos, sino que también sea económicamente competitivo dentro del mercado local. Si bien en fases anteriores se logró alcanzar niveles óptimos de resistencia a la compresión, los altos costos asociados limitarían su aplicabilidad en un contexto de producción industrial. Por tanto, esta última etapa se orienta a buscar un equilibrio entre calidad, sostenibilidad y rentabilidad.

En esta cuarta y última fase del estudio, se busca determinar si la incorporación de agentes externos, como

las fibras, fue decisiva para alcanzar los resultados satisfactorios obtenidos en la etapa anterior. Bajo este enfoque, se procedió a la elaboración de las probetas correspondientes, orientando el diseño de la mezcla hacia un equilibrio entre desempeño técnico y viabilidad económica. El objetivo principal de esta etapa es desarrollar una formulación de hormigón que, sin depender de insumos adicionales de alto costo, cumpla con los estándares normativos y pueda competir de manera eficiente dentro del mercado local de prefabricados.

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica y técnica de los elementos prefabricados de hormigón con inclusión de residuos cerámicos, se diseñó una cuarta y última fase experimental. En esta fase se man-

Tabla 23: Tabla de resultados 4.ª fase:

4.ª FASE: PROBETAS DE HORMIGÓN + RESIDUOS CERÁMICOS											
% Residuos	Elaboración	Rotura	Código	Edad (días)	Peso (kg)	Largo (cm)	Diámetro	Fuerza (KN)	Resistencia	F'c al 70%	Predicción
20%	09/May	16/May	A1	7	3,84	19,90	10,10	194,00	247 kg/cm <sup>2</sup>	242 kg/cm <sup>2</sup>	322 kg/cm <sup>2</sup>
	09/May	16/May	A2	7	3,86	19,90	10,10	185,70	236 kg/cm <sup>2</sup>		
25%	09/May	16/May	B1	7	3,90	20,00	10,10	184,10	234 kg/cm <sup>2</sup>	221 kg/cm <sup>2</sup>	294 kg/cm <sup>2</sup>
	09/May	16/May	B2	7	3,88	19,90	10,10	163,50	163 kg/cm <sup>2</sup>		

Fuente: Autoría propia

tuvo la misma metodología aplicada previamente en la tercera etapa, sin embargo, se realizaron modificaciones sustanciales orientadas a reducir los costos de producción. En concreto, se eliminó el uso de aditivos externos de alto valor económico, como las fibras de refuerzo mecánico y el ligante utilizado para el pretratamiento de los residuos cerámicos.

Estas decisiones fueron tomadas en función de los resultados obtenidos anteriormente, donde se comprobó que ambos insumos, si bien mejoraron las propiedades mecánicas del material, incrementaron de manera significativa el costo total de fabricación, comprometiendo la viabilidad financiera del producto.

A diferencia de la tercera fase, en esta etapa no se evaluaron cuatro proporciones distintas de residuos cerámicos, sino que se seleccionaron únicamente los dos porcentajes que demostraron un comportamiento mecánico aceptable y pertinente para los fines del proyecto: 25% y 30%. Esta selección permitió concentrar esfuerzos en rangos que ya habían mostrado buenos resultados, eliminando las proporciones menos eficientes y reduciendo así el margen de error y el gasto innecesario de recursos.

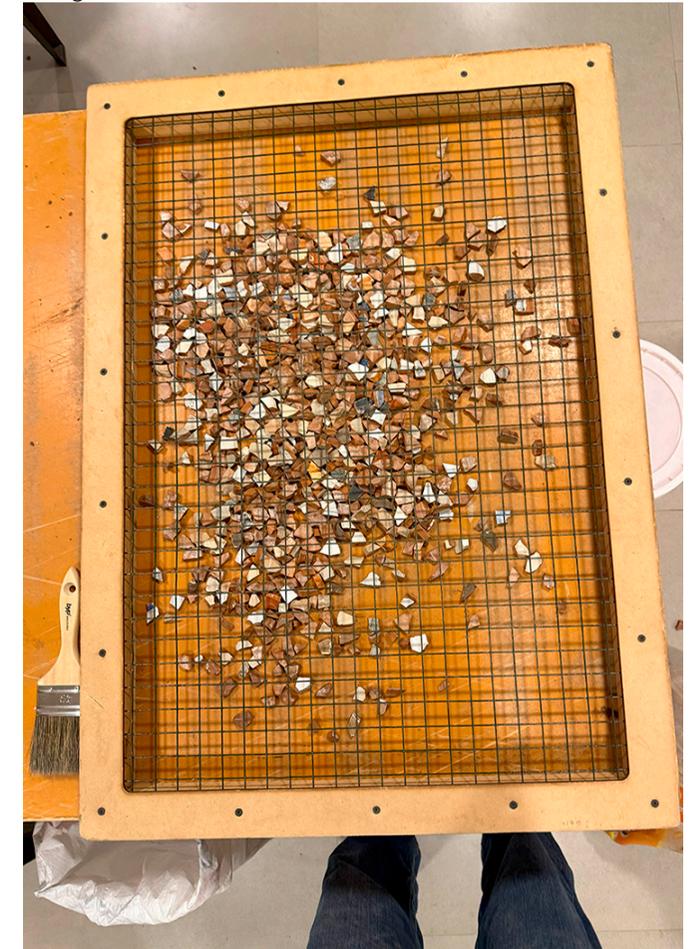
## Resultados 4.ª fase:

Como se detalla en la Tabla 23, se replicó el proceso de mezclado, curado y ensayo de las probetas, siguiendo los tiempos normativos de fraguado. Una vez cumplidos los siete días de curado, se procedió con los ensayos de resistencia a compresión de las probetas. Los resultados revelan que la mezcla cumple satisfactoriamente con los requerimientos técnicos previstos en esta investigación, tanto en términos de resistencia como de comportamiento general.

Uno de los aspectos más destacados en esta etapa radica en la comparación directa de los resultados obtenidos en la tercera y cuarta fase. Si bien es cierto que la tercera fase presentó valores máximos de resistencia ligeramente superiores, esto se logró a costa de una incorporación significativa de fibras y aditivos especiales, cuyo precio elevado elevó el costo de producción hasta un 70% por encima del valor de referencia de Predelca.

En contraste, los resultados de la cuarta fase, donde no se utilizó ningún refuerzo adicional, muestran un comportamiento estructural muy similar, con una di-

Imagen 22: Proceso de Tamizado



Fuente: Autoría propia

Imagen 23: Incorporación de la mezcla



Fuente: Autoría propia

ferencia de resistencia mínima, pero con un costo de producción apenas 14% por encima del estándar.

Uno de los aspectos favorables de esta fase fue la correcta cohesión de la mezcla, evidenciada en la Imagen 23, donde se observa una adecuada integración entre los residuos cerámicos y la matriz cementante. A pesar de no utilizar aditivos externos como el ligante, que mejora la adherencia, ni fibras sintéticas, que refuerzan la resistencia mecánica, la mezcla presentó una textura uniforme y estable durante el proceso. Esto demuestra que es posible obtener un comportamiento adecuado en términos técnicos sin recurrir a materiales complementarios costosos, lo cual favorece la viabilidad económica de la propuesta investigativa.

Por tanto, esta cuarta fase experimental demuestra que es posible obtener una mezcla viable tanto técnica como económicamente, lo que la convierte en una alternativa factible para la producción de elementos prefabricados en contextos donde la eficiencia de costos sea prioritaria sin sacrificar significativamente el desempeño mecánico, siempre y cuando se mantenga un correcto tamizado evidenciado en la Imagen 22.

## Resultados de los Ensayos de incorporación del residuo cerámico en el hormigón

Luego de la experimentación con mezclas de hormigón incorporadas con residuos cerámicos, desarrollada en cuatro fases diferenciadas, se puede concluir que es viable alcanzar una dosificación que satisfaga tanto los objetivos planteados en esta investigación como los requerimientos técnicos establecidos por la normativa vigente.

A lo largo del proceso experimental se analizaron múltiples proporciones de incorporación de residuos, cuyos resultados se detallan en la Tabla 24. Estas dosificaciones permitieron evaluar el desempeño mecánico de la mezcla en condiciones controladas, determinando qué porcentajes resultaban adecuados para cumplir con las exigencias de resistencia.

Aunque únicamente las fases tres y cuatro lograron alcanzar los valores estructurales mínimos estipulados por la normativa, se optó por continuar la investigación con los parámetros obtenidos en la cuarta y última fase. Esta decisión responde al equilibrio entre desempeño

técnico y viabilidad económica. Si bien la tercera fase evidenció un comportamiento estructural ligeramente superior, dicha mejora implicó un incremento significativo en los costos de producción, producto de la incorporación de fibras sintéticas y ligantes especiales.

Por el contrario, la cuarta fase logró mantener un comportamiento estructural aceptable sin necesidad de recurrir a aditivos costosos, lo cual la convierte en una

alternativa más adecuada para proyectos que buscan eficiencia y sostenibilidad. Esta fase demostró que es posible alcanzar un producto técnicamente funcional y económicamente competitivo, alineado con los principios de economía circular y aprovechamiento de residuos en la construcción. En consecuencia, se continuará el desarrollo investigativo basándose en la dosificación optimizada de la cuarta fase experimental.

Tabla 24: Cuadro de dosificaciones de las fases experimentales

TABLA DE RESULTADOS DE LAS FASES EXPERIMENTALES								
Tipo de Dosificación (Fases Experimentales)	Materiales						Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Precio (m <sup>3</sup> )
	Cemento	Árido Fino	Árido Grueso	Residuo	Aditivo	Fibra		
1 - 2.5 - 2.5	50,0 kg	168,0 kg	106,4 kg	45,6 kg	0,6 kg	-	54 kg/cm <sup>2</sup>	39,42\$
1 - 2 - 2	50,0 kg	134,4 kg	72,9 kg	48,7 kg	3,2 kg	-	30 kg/cm <sup>2</sup>	93,90\$
1 - 2 - 2.5	50,0 kg	134,4 kg	114,0 kg	38,0 kg	0,6 kg	10,4 kg	248 kg/cm <sup>2</sup>	102,27\$
1 - 2 - 2.5	50,0 kg	134,4 kg	114,0 kg	38,0 kg	0,6 kg	-	221 kg/cm <sup>2</sup>	69,02\$

Fuente: Autoría propia

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO

---

Una vez definida la mezcla de hormigón más adecuada, el siguiente paso corresponde al diseño de los elementos prefabricados a elaborar en el marco de esta investigación. En este caso específico, se optó por la elaboración de paneles de revestimiento con un enfoque versátil, que permite su uso tanto en aplicaciones verticales, como en recubrimiento de muros de mampostería. Así como en superficies horizontales destinadas al tránsito peatonal.

Esta decisión responde no solo a criterios técnicos y estéticos, sino también a la necesidad de generar un producto adaptable a distintas exigencias constructivas del entorno local. Si bien la fábrica Predelca cuenta con una línea propia de elementos prefabricados de uso cotidiano en sus procesos productivos y comerciales, el objetivo de esta investigación es desarrollar un nuevo tipo de elemento arquitectónico que pueda insertarse de forma competitiva en el mercado local, incorporando innovación tanto en su diseño como en su composición.

En el proceso de diseño se realizó una revisión detallada de casos relacionados con paneles prefabricados de hormigón arquitectónico. Se identificó que en el

contexto local este tipo de producto no se encuentra disponible comercialmente, sin embargo, se constató que el Ing. Santiago Vélez, propietario del laboratorio SV Concrete, ha desarrollado paneles de hormigón con fines de revestimiento en algunos de sus proyectos.

Su asesoría técnica fue clave en esta fase, especialmente ante la escasa documentación existente sobre estos sistemas constructivos. Gracias a su colaboración, muchas de las decisiones relacionadas con el dimensionamiento, el proceso de fabricación y los criterios de colocación de los paneles fueron validadas con respaldo técnico, fortaleciendo así la rigurosidad metodológica de esta investigación.

## Diseño de los Encofrados:

En este caso particular, los paneles prefabricados propuestos tendrán un dimensionamiento estándar de 40 x 40 centímetros. Esta elección responde a criterios técnicos y prácticos, buscando un equilibrio entre funcionalidad, resistencia y facilidad de manipulación. Se consideró que un elemento de dimensiones más reducidas podría carecer del volumen necesario para asegurar su estabilidad y resistencia, mientras que un

panel excesivamente grande podría generar complicaciones durante su transporte, manipulación en obra y colocación, especialmente considerando las condiciones de trabajo habituales en entornos constructivos locales.

No obstante, este módulo puede ampliarse hasta un máximo de 80 x 40 centímetros, dependiendo de los requerimientos específicos del proyecto o del sistema constructivo en el que se desee integrar. Lo que se mantiene constante en todos los casos es el espesor de los paneles, fijado en 3 centímetros. Esta medida fue recomendada por el laboratorio SV Concrete, cuyos técnicos han comprobado que dicho espesor ofrece un equilibrio adecuado entre resistencia estructural y facilidad de manejo.

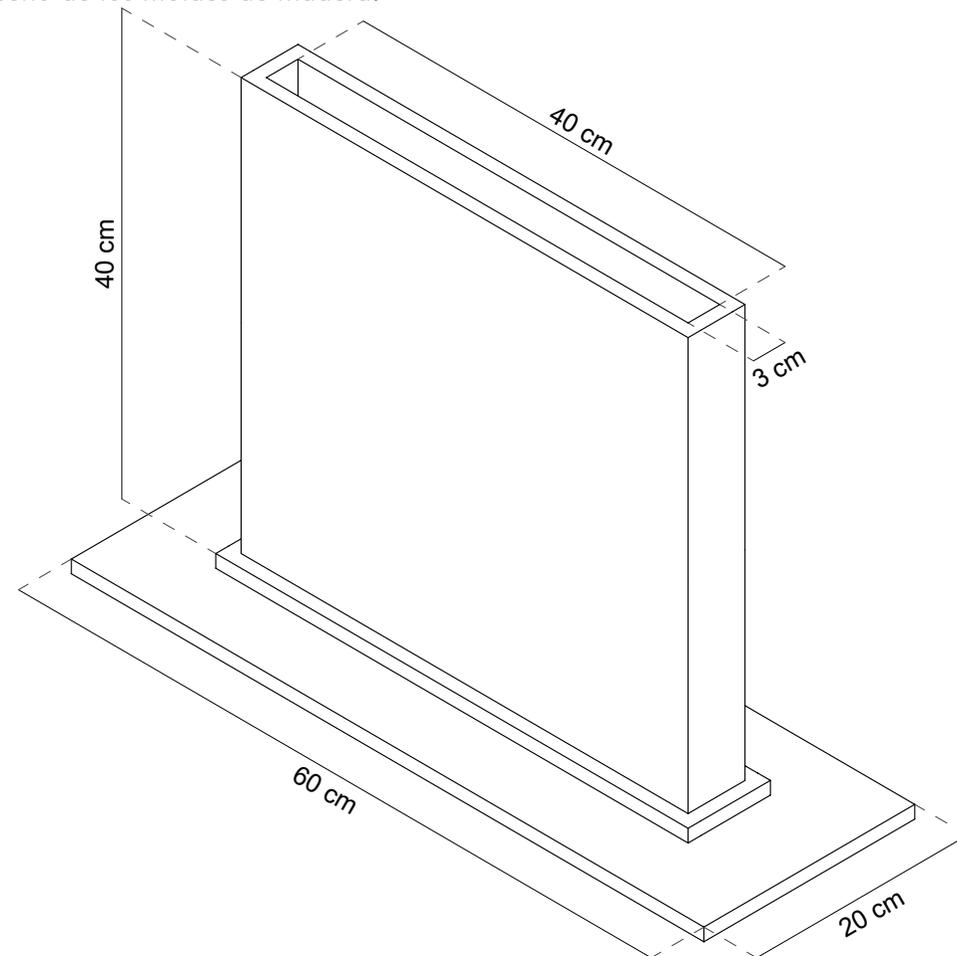
Un espesor mayor aumentaría considerablemente el peso de los elementos, lo cual dificultaría su instalación y requeriría más recursos logísticos. Por el contrario, reducir el espesor comprometería la robustez y la integridad mecánica del panel, factores esenciales para garantizar su comportamiento estructural en condiciones reales de uso. Para la elaboración de los primeros prototipos dentro del marco experimental de

esta investigación, se confeccionaron moldes artesanales utilizando tableros de plywood de 12 milímetros de espesor. Como se aprecia en el **Gráfico 10**, se tomó la decisión de hacerlo vertical debido a que debe rematar el área más pequeña con un bailejo al momento de vibrarlo. Además, con el objetivo de reducir costos, mantener una ejecución práctica y facilitar la adaptación a posibles cambios en el diseño durante el proceso.

Sin embargo, en una eventual etapa de industrialización, se recomienda el uso de moldes metálicos, preferentemente de acero, ya que presentan una mayor durabilidad, resistencia al desgaste y una capacidad significativamente superior de reutilización en comparación con los moldes de madera. Esta transición permitiría optimizar la producción en términos de eficiencia, estandarización y reducción de residuos durante el proceso de fabricación.

Durante la elaboración de las probetas correspondientes a la cuarta fase experimental, se tomó la decisión de fabricar, de manera paralela, los primeros paneles de revestimiento utilizando los moldes previamente diseñados. En esta etapa se trabajó con dos

Gráfico 10: Diseño de los moldes de madera.



Fuente: Autoría propia

moldes distintos: el primero con dimensiones de 40 x 40 centímetros, correspondiente al módulo base, y un segundo de 60 x 40 centímetros, pensado como una extensión modular que permite una mayor versatilidad en su aplicación arquitectónica.

## Elaboración de Paneles:

El proceso de elaboración de los paneles siguió la misma logística aplicada en la confección de las probetas, con la diferencia de que, para este caso, fue necesario aumentar el volumen de mezcla preparado, dado que los moldes demandaban una mayor cantidad de material para su llenado completo. Adicionalmente, se empleó un agente desmoldante para facilitar la extracción de los paneles una vez fraguados.

Este producto fue aplicado con una pistola pulverizadora, herramienta proporcionada por la fábrica Predelca, garantizando una distribución homogénea del desmoldante sobre las superficies interiores de los moldes. Tal como se evidencia en la **Imagen 24**, ambos moldes funcionaron de forma eficiente. No obstante, se detectó una ligera deformación (pandeo) en el molde de mayores dimensiones, producto del peso adicional de la mezcla y de las vibraciones generadas

durante el proceso de compactación en la mesa vibradora.

A pesar de este inconveniente menor, los resultados obtenidos fueron satisfactorios para los objetivos de esta investigación, demostrando la viabilidad técnica de la propuesta en condiciones experimentales controladas.

Una vez que la mezcla fue vertida correctamente en los moldes, se procedió a esperar el tiempo de fraguado necesario para garantizar un desmoldeo seguro. En este caso, se determinó un periodo mínimo de 48 horas antes de retirar los paneles de sus respectivos moldes. Esta decisión respondió a la consideración de que, al tratarse de elementos de mayor volumen en comparación con las probetas, era fundamental asegurar una adecuada resistencia inicial para evitar la aparición de fisuras o, en el peor de los casos, fracturas durante el proceso de desmoldeo.

Transcurrido el tiempo estipulado, se procedió al retiro cuidadoso del encofrado, obteniendo como resultado paneles en buen estado, sin presencia de agrietamientos ni defectos estructurales visibles. Como se observa

Imagen 24: Moldes con la mezcla incorporada



Fuente: Autoría propia

en las Imagenes 25 y 26, los paneles presentaron un acabado arenado homogéneo, con una porosidad mínima atribuida al adecuado proceso de vibrado de la mezcla.

A pesar de la textura lograda, en ciertas zonas se logra distinguir visualmente la presencia de los residuos cerámicos reciclados, lo cual evidencia su procedencia sin afectar la estética general del elemento. Cabe señalar que estos paneles pueden ser sometidos a procesos de pulido superficial en caso de requerir un acabado más fino, aunque la rugosidad detectada en su estado actual es prácticamente imperceptible al tacto.

En conjunto con el Ing. Miguel Puma, propietario de la empresa Predelca, se realizó una inspección visual técnica preliminar, la cual confirmó la solidez, homogeneidad y compactación adecuada de los paneles. Con estos resultados iniciales, los elementos quedaron listos para su posterior evaluación mediante pruebas de laboratorio, con el objetivo de verificar su desempeño mecánico y su conformidad con la normativa técnica vigente.

Imagen 25: Panel de hormigón (40x40 cm)



Fuente: Autoría propia

Imagen 26: Panel de hormigón (40x60 cm)



Fuente: Autoría propia

## PRUEBAS SEGÚN LA NORMATIVA PARA ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Con los elementos prefabricados de hormigón ya fabricados, el siguiente paso consiste en identificar las normativas técnicas y los estándares de calidad que estos deben cumplir para garantizar su viabilidad y funcionalidad dentro del entorno constructivo. Tras un análisis exhaustivo de la normativa vigente, se constató que no existen regulaciones específicas orientadas exclusivamente a paneles de revestimiento prefabricados de hormigón con agregado cerámico reciclado.

No obstante, sí existe un conjunto amplio de normas técnicas que regulan el comportamiento y la calidad de los elementos prefabricados de hormigón en general. Entre las normativas más relevantes a nivel internacional se encuentran las europeas (UNE/EN), las emitidas por el American Concrete Institute (ACI), así como las normas ASTM (American Society for Testing and Materials).

Para los fines de esta investigación, se optó por regirse principalmente por las Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE INEN), debido a su aplicación directa en el contexto local, y por las normas ASTM, que ofrecen metodologías de ensayo ampliamente reconocidas y validadas internacionalmente. La elección de estas

normativas responde a su complementariedad y rigor técnico, lo que permite establecer un marco de evaluación confiable. En consecuencia, se procederá a desglosar los parámetros técnicos de cada normativa y a organizar las respectivas pruebas en tres grupos principales de evaluación.

Con el propósito de garantizar la calidad de los elementos prefabricados de hormigón desarrollados en esta investigación, es fundamental considerar los estándares normativos que certifiquen su viabilidad estructural y funcional. Para ello, existen diversos ensayos y pruebas de laboratorio que pueden ser aplicados, los cuales se pueden clasificar en tres grandes grupos: ensayos estéticos y de apariencia superficial, ensayos de durabilidad y comportamiento físico, y ensayos mecánicos o de resistencia estructural.

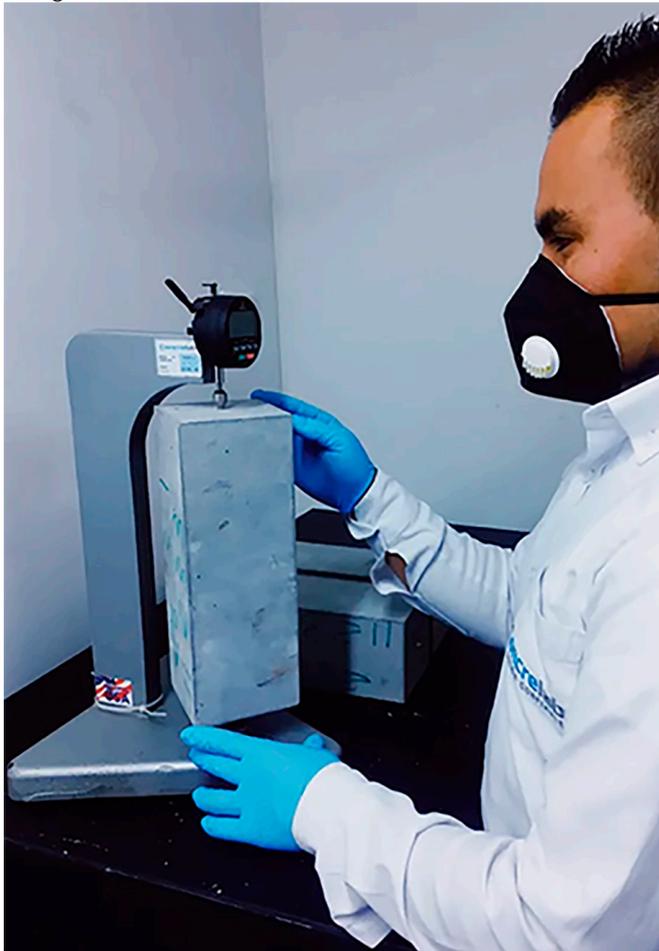
El primer grupo, correspondiente a los ensayos estéticos y de apariencia superficial, tiene como objetivo evaluar características visuales y superficiales del material, tales como la uniformidad de color y textura, la reflectancia o luminancia superficial, y el desprendimiento de partículas o polvo residual. Estos parámetros están especificados en normativas como la

ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (2013). Sin embargo, este tipo de ensayos no serán aplicados en el presente estudio, ya que el objetivo no se enfoca en lograr un acabado específico o una estética particular, sino en comprobar la viabilidad estructural y sostenible del uso de residuos cerámicos en elementos prefabricados.

El segundo grupo comprende los ensayos de durabilidad y comportamiento físico, los cuales analizan la respuesta del material ante condiciones ambientales adversas o exigencias extremas. Dentro de esta categoría se incluyen pruebas como la absorción de agua y porosidad, la retracción y fisuración, la resistencia al ciclo de congelamiento y descongelamiento (heladidad), así como la resistencia frente a agentes químicos o atmosféricos agresivos. Estas pruebas, también contempladas en la normativa ASTM C642, no serán consideradas en esta etapa de la investigación por dos motivos principales.

Primero, su aplicación requiere de una infraestructura técnica especializada y de un nivel de experticia que excede los recursos disponibles para este estudio,

Imagen 27: Pruebas de fisuración



Fuente: Concrelab (2016)

como se muestra en la Imagen 27. Segundo, las condiciones climáticas de la ciudad en la que se desarrolla el proyecto, caracterizada por un clima templado con escasa variabilidad térmica, no justifican la realización de este tipo de ensayos, al menos que los elementos fueran destinados a regiones con condiciones climáticas más extremas. Por tanto, se prioriza la evaluación de criterios estructurales básicos en función del contexto geográfico y técnico del estudio.

De acuerdo con los criterios previamente expuestos, el último grupo de evaluación corresponde a los ensayos de resistencia mecánica, los cuales serán aplicados en esta investigación. Aunque los elementos prefabricados desarrollados no cumplen una función estructural directa, pues están destinados como paneles de revestimiento, es esencial garantizar una resistencia mínima que permita su correcta fabricación, manipulación, transporte, instalación y durabilidad en obra.

Se contemplan cuatro ensayos principales. En primer lugar, el ensayo de resistencia a la compresión, que mide la capacidad del material para soportar cargas axiales sin fallar, siendo un parámetro normativo fundamental, regulado por la ASTM C39/C39M – Stan-

dard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2023). En segundo lugar, el ensayo de resistencia a la flexión, que evalúa la capacidad del panel para soportar momentos flectores sin agrietarse, aspecto relevante dado su uso como revestimiento.

El tercer ensayo corresponde a la resistencia al impacto, con el que se analizará la tenacidad del panel frente a golpes o cargas accidentales, asegurando su integridad en las etapas de transporte e instalación. Finalmente, se incluirá el ensayo de adherencia de elementos embebidos, destinado a comprobar la capacidad del panel para integrar anclajes o insertos metálicos, habituales en aplicaciones constructivas.

El cumplimiento de estos ensayos, conforme a la normativa técnica, permitirá validar el uso de estos elementos tanto para su implementación en obra civil como para su futura comercialización en el ámbito de los prefabricados de hormigón arquitectónico.

## Ensayos de Resistencia Mecánica

Los ensayos de resistencia mecánica, es fundamental señalar que todo elemento prefabricado, independientemente del tipo de material, su dimensionamiento o función dentro de un proyecto constructivo, debe someterse obligatoriamente a pruebas de compresión y flexión. Estas evaluaciones constituyen parámetros que garantizan la calidad, seguridad y durabilidad de los componentes empleados en obra. Dichos ensayos se encuentran debidamente normados tanto a nivel nacional, mediante los estándares establecidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), como a nivel internacional, a través de organismos como la ASTM International, que establecen metodologías precisas y criterios técnicos para verificar el desempeño de los materiales bajo diversas condiciones de carga.

La aplicación rigurosa de estas normativas no solo asegura el cumplimiento de los requerimientos legales, sino que también respalda la confiabilidad del producto en entornos reales. En ese contexto, a continuación se presentan los ensayos de compresión y flexión realizados como parte del proceso experimental desarrollado en esta investigación.

## Ensayo a Compresión

Según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2010), la evaluación de la resistencia a la compresión del hormigón se realiza mediante ensayos aplicados a especímenes cilíndricos, de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma NTE INEN 1573. Esta normativa establece los requisitos técnicos que deben cumplirse a nivel nacional. No obstante, en el marco de la presente investigación se ha considerado también el cumplimiento de normativas internacionales, específicamente las establecidas por la ASTM (American Society for Testing and Materials), que regulan los

métodos de ensayo para determinar la resistencia de elementos prefabricados de hormigón. Cabe señalar que, si bien la ASTM proporciona procedimientos estandarizados, no establece valores mínimos universales de resistencia, ya que estos dependen del tipo de elemento y su función, ya sea estructural o no estructural.

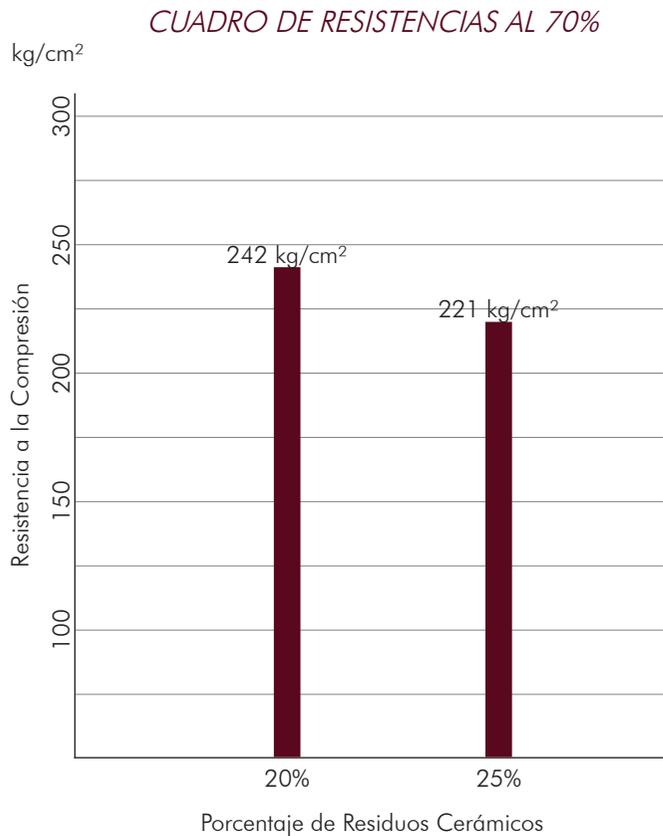
Ambas normativas presentan exigencias técnicas que deben ser consideradas, las cuales se detallan comparativamente en la **Tabla 25**. En este contexto, las pruebas de compresión fueron aplicadas durante la fase experimental en la que se incorporaron residuos cerámicos en la mezcla de hormigón. Este paso fue im-

Tabla 25: Cuadro de resistencias Requeridas

Tipo de Concreto	Normativa	Resistencia Solicitada	Resistencia Alcanzada
Elementos no estructurales	INEN	15 – 20 MPa	21.7 MPa
Concreto de peso normal	ASTM	20 – 35 MPa	21.7 MPa
Concreto ligero estructural	ASTM	17 – 28 MPa	21.7 MPa
Concreto ligero aislante (ASTM C495)	ASTM	0.86 – 2.07 MPa	21.7 MPa

Fuente: Autoría propia

Tabla 26: Tabla de resistencia 4.ª fase:



Fuente: Autoría propia

prescindible, ya que representó la única forma viable de verificar si las distintas dosificaciones desarrolladas eran adecuadas en términos de resistencia mecánica.

Como se evidencia en los resultados presentados en la **Tabla 26**, las mezclas evaluadas alcanzaron niveles de resistencia compatibles con las categorías de concreto definidas por las normativas nacionales e internacionales. Es importante señalar que estas cifras corresponden a los ensayos realizados a los siete días de curado, es decir, aproximadamente al 70 % de la resistencia total que el hormigón adquiere a los 28 días.

Las probetas respondieron de forma satisfactoria, como se observa en la **Imagen 28**, lo que permite concluir que esta fase experimental cumple con los parámetros técnicos requeridos, validando así su viabilidad.

Imagen 28: Pruebas de Compresión



Fuente: Autoría propia

## Ensayo a Flexión

En Ecuador, la normativa NTE INEN 2554 (2011) establece que el método para determinar la resistencia a la flexión del hormigón consiste en ensayos sobre vigas simplemente apoyadas, sometidas a carga en los tercios de su luz libre. Sin embargo, esta norma no define un valor mínimo obligatorio de resistencia a la flexión para elementos prefabricados no estructurales, lo que evidencia un vacío normativo que debe complementarse mediante referencias técnicas internacionales y criterios basados en buenas prácticas constructivas.

Para ejecutar el ensayo, se elaboraron vigas con la misma dosificación utilizada en las probetas analizadas en fases previas. El proceso se realizó en colaboración con la empresa Predelca y el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay. Mientras

los encofrados fueron proporcionados por el laboratorio, la preparación y vaciado de la mezcla se llevó a cabo en la fábrica. Las vigas presentaron una sección de 15 × 15 cm y una longitud de 50 cm.

Transcurridos siete días de curado, se procedió a la rotura de las muestras. Previamente, se marcó la ubicación de los tercios de la luz libre, siguiendo el procedimiento estandarizado para garantizar una correcta colocación de los apoyos. Se trazaron líneas auxiliares a 2,25 cm de cada lado de los tercios, equivalente al 5% de los 45 cm considerados desde la mitad de la viga, distancia reconocida como rango habitual de ruptura en elementos con estas dimensiones. Luego se ejecutaron los ensayos, cuyos resultados se detallan en la Tabla 27.

Dado que la normativa INEN no establece valores

mínimos para elementos no estructurales y que la ASTM solo proporciona métodos estandarizados sin imponer umbrales obligatorios, se recurrió a un análisis comparativo con base en estándares usuales de la industria, recogidos en la Tabla 28. Los resultados obtenidos, ilustrados en la Imagen 29, muestran que las vigas alcanzaron niveles adecuados de resistencia a la flexión, compatibles con los estándares operativos empleados en fábricas de elementos prefabricados.

Durante el ensayo se contó con el acompañamiento del Ing. William Lituma, laboratorista responsable, quien indicó que es común que los resultados de resistencia a la flexión en este tipo de elementos sean inferiores a los obtenidos en compresión, dada su configuración estructural y función específica. Aunque las vigas fueron ensayadas a los siete días de curado, es decir, con aproximadamente el 70% de su resistencia

Tabla 27: Tabla de resultados de pruebas a flexión

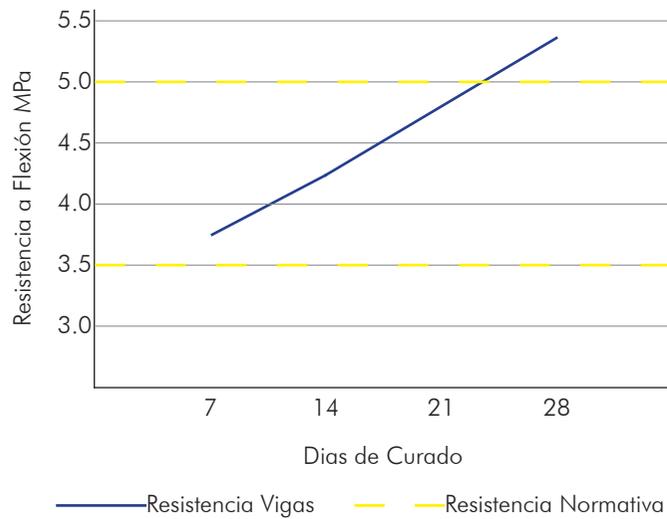
VIGAS DE HORMIGÓN + RESIDUOS CERÁMICOS											
% Residuos	Elaboración	Rotura	Edad (días)	Peso (kg)	Largo (cm)	Altura (cm)	Ancho (cm)	Carga (Kg)	Resistencia	F'c al 70%	Predicción
25%	20/May	27/May	7	29,25	15,00	15,00	15,00	3010	40 kg/cm <sup>2</sup>	37 kg/cm <sup>2</sup>	53 kg/cm <sup>2</sup>
	20/May	27/May	7	28,97	15,00	15,00	15,00	2575	34 kg/cm <sup>2</sup>		

Fuente: Autoría propia

final, los resultados, exhibidos en la Tabla 29, fueron altamente satisfactorios para el tipo de elemento prefabricado no estructural que se busca implementar.

Además, la ejecución de estos ensayos permitió validar de forma práctica la viabilidad del uso de residuos cerámicos reciclados en la fabricación de elementos no estructurales, sin comprometer su desempeño técnico. Estas pruebas no solo aportan solidez a la propuesta, sino que fortalecen el argumento a favor de una producción más sostenible e innovadora en la construcción, alineada con principios de economía circular y responsabilidad ambiental. En este contexto, el estudio constituye un aporte significativo para futuras normativas o lineamientos técnicos que incluyan materiales reciclados como componentes viables en soluciones constructivas contemporáneas.

Tabla 29: Cuadro de resistencia a Flexión



Fuente: Autoría propia

Tabla 28: Cuadro de resistencias Requeridas

Tipo de Concreto	Normativa	Resistencia Solicitada	Resistencia Alcanzada
Elementos no estructurales (recomendación)	INEN	3.5 – 5.0 MPa	3.7 MPa
Elementos no estructurales (recomendación)	ASTM	3.5 – 5.0 MPa	3.7 MPa

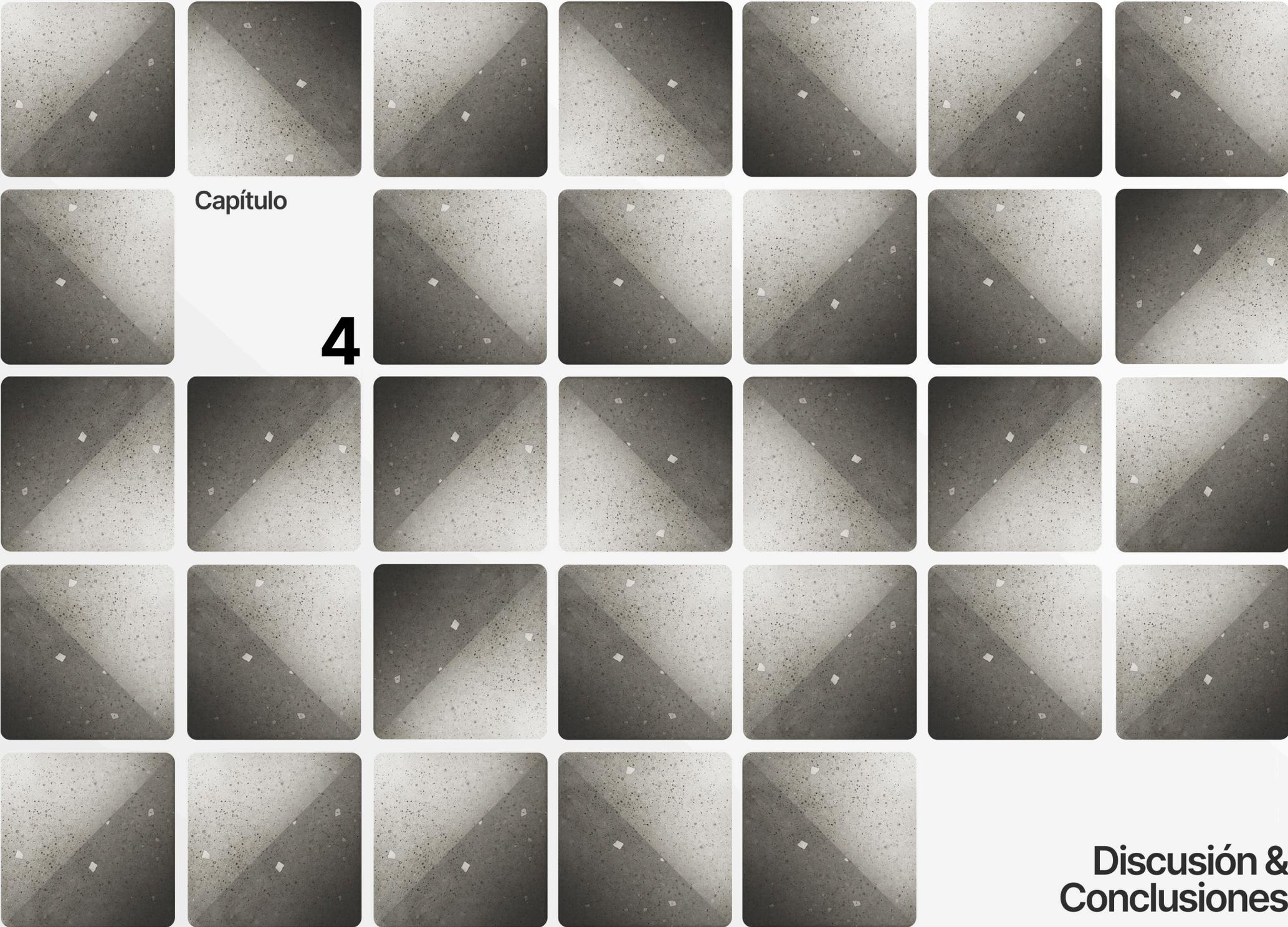
Fuente: Autoría propia

Imagen 29: Prueba a flexión



Fuente: Autoría propia





Capítulo

4

Discusión &  
Conclusiones

## COSTOS DE PRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más relevantes abordados en esta investigación es el análisis económico, cuyo propósito principal es determinar la viabilidad financiera de producir industrialmente los paneles prefabricados propuestos. Este análisis resulta crucial, ya que no basta con que el material cumpla con los estándares técnicos y normativos; además, debe ser competitivo en términos de costos para integrarse eficazmente en el mercado local.

Como punto de partida para establecer un marco comparativo, se tomaron los costos estandarizados de los materiales empleados actualmente por la empresa Predelca, en cuya planta se elaboraron tanto las probetas como los paneles experimentales. Por ejemplo, la arena utilizada en la mezcla es importada desde la región costera del país y tiene un costo fijo de 23,55 dólares por metro cúbico. En cuanto al ripio, proviene de una cantera específica, con un valor de 17 dólares por metro cúbico.

Respecto al cemento, se utilizó un precio promedio del mercado local, equivalente a 7 dólares por saco de 50 kilogramos. Otro insumo clave en la mezcla es el aditivo “Sika Viscoflow”, adquirido al por ma-

yor por Predelca, con un precio de 1.854 dólares por cada 1.000 kilogramos. Con base en estos datos y la dosificación utilizada por la empresa en sus prefabricados convencionales, se establece un costo promedio de 60,35 dólares por metro cúbico de mezcla.

Este valor se constituye como parámetro de referencia, tal como se muestra en la Tabla 30, donde se detallan los costos unitarios de cada componente. En consecuencia, para que esta propuesta sea económicamente viable, los elementos desarrollados deben mantener un costo de producción cercano a este estándar, garantizando su competitividad en el sector de prefabricados de hormigón arquitectónico.

Con estos antecedentes, se procedió al análisis detallado de los costos correspondientes a la tercera y cuarta fase experimental. El objetivo fue evaluar la factibilidad económica del proyecto, identificando si es rentable producir este tipo de elementos a escala industrial y si existe un margen razonable para su comercialización local. Esta evaluación parte de la estructura de costos unitarios proporcionada por Predelca, cuyos valores reflejan condiciones reales del mercado.

Imagen 30: Sika Fiber Force 48



Fuente: Sika

Como empresa que comercializa regularmente productos prefabricados, Predelca debe mantener un precio competitivo por metro cúbico de hormigón frente a otras compañías del sector. Esto no solo asegura el cumplimiento normativo, sino también el equilibrio entre calidad y rentabilidad. El análisis comparativo entre la tercera y cuarta fase permite identificar cuál de las dos propuestas es más favorable desde el punto de vista económico.

En la tercera fase experimental se incorporó el aditivo reforzante “Sikafiber Force 48” (Imagen 30), diseñado para mejorar la resistencia mecánica del hormigón. Este producto fue adquirido en una tienda autorizada de Sika a un costo de 8,60 dólares por kilogramo. Según sus especificaciones técnicas, se requieren entre 2 y 4 kilogramos por metro cúbico, lo cual incrementa significativamente los costos. Adicionalmente, se aplicó un tratamiento a los residuos cerámicos usados como agregado, mediante su remojo en un ligante especial (Imagen 31), cuyo envase de 4 kilogramos tiene un valor de 77 dólares.

Aunque estas estrategias mejoraron notablemente el desempeño estructural del material, generaron un au-

mento de hasta el 70% en el costo total por metro cúbico en comparación con el precio base de Predelca. Por tanto, a pesar de los resultados técnicos satisfactorios, esta alternativa no es económicamente viable para una producción industrial a gran escala, lo que resalta la necesidad de buscar soluciones más equilibradas.

Frente a este escenario, se desarrolló una cuarta fase experimental con el objetivo de optimizar la mezcla, manteniendo un rendimiento técnico aceptable, pero reduciendo considerablemente los costos. En esta fase se aplicó una metodología similar, prescindiendo del uso tanto del aditivo “Sikafiber Force 48” como del ligante para los residuos cerámicos, insumos que encarecieron la mezcla en la tercera fase. Esta modificación permitió trabajar con costos más controlados, buscando una solución técnica funcional y económicamente sostenible.

No obstante, los resultados revelan que, pese a eliminar los componentes más costosos, el costo final de producción de la cuarta fase, detallado en la Tabla 26, sigue siendo superior al de Predelca. Esta diferencia se debe principalmente a la dosificación específica empleada y a la cantidad de

Imagen 31: Sika Ligante



Fuente: Sika

aditivo fluidificante necesario para preservar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón.

La relación directa entre dosificación y costo genera un incremento del 14% respecto al precio base de Predelca. Sin embargo, este margen es considerablemente menor que el 70% observado en la tercera fase, lo que posiciona a esta cuarta propuesta como una opción más factible desde el punto de vista económico para su implementación industrial.

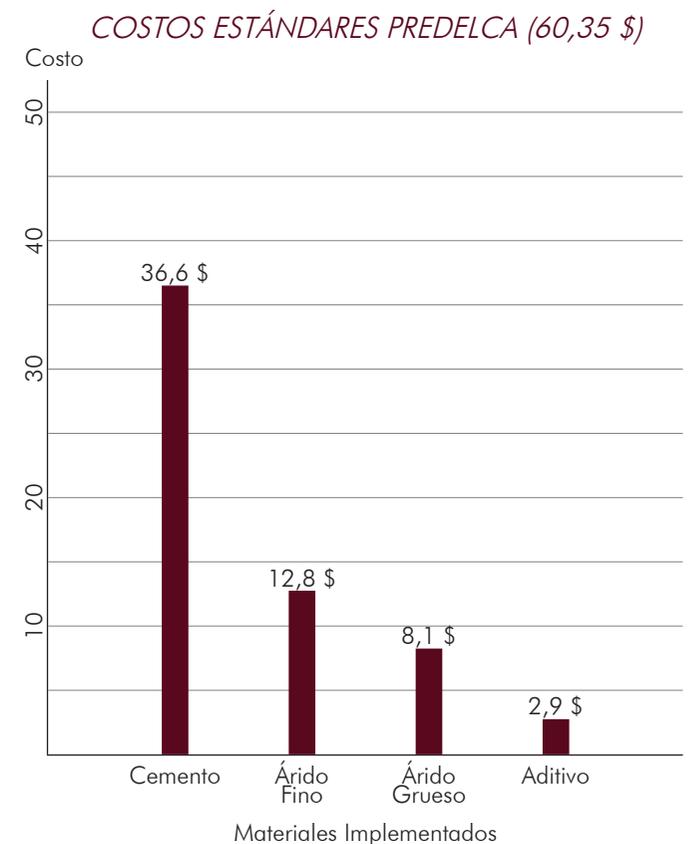
Al comparar los costos de producción de Predelca (Tabla 30) con los de esta investigación (Tabla 31), se evidencia una ligera diferencia a favor de Predelca, atribuible a su dosificación optimizada. Sin embargo, la inclusión de residuos cerámicos en la mezcla propuesta permite alcanzar costos similares por metro cúbico.

Si bien Predelca continuará operando con costos menores, cabe señalar que sus productos no incorporan residuos cerámicos. Por ello, se concluye que la implementación de este tipo de residuos requiere un ajuste en la dosificación que, aunque modifica los costos, sigue siendo competitiva a nivel comercial. A diferen-

cia del sistema de Predelca, esta alternativa es más amigable con el medio ambiente y facilita la inclusión de residuos de construcción y demolición (RCD) en mezclas de hormigón estructural.

En conclusión, se puede afirmar que la incorporación de residuos industriales cerámicos en la producción de elementos prefabricados de hormigón conlleva un incremento moderado en los costos de fabricación. No obstante, dichos costos se mantienen dentro de los márgenes aceptables del mercado, lo que permite conservar la competitividad comercial del producto final. Si bien esta implementación supone una ligera variación en la inversión inicial, aporta beneficios significativos en términos de sostenibilidad. A diferencia de los productos convencionales, esta propuesta resulta más amigable con el medio ambiente y contribuye a la valorización de residuos provenientes de la industria de la construcción.

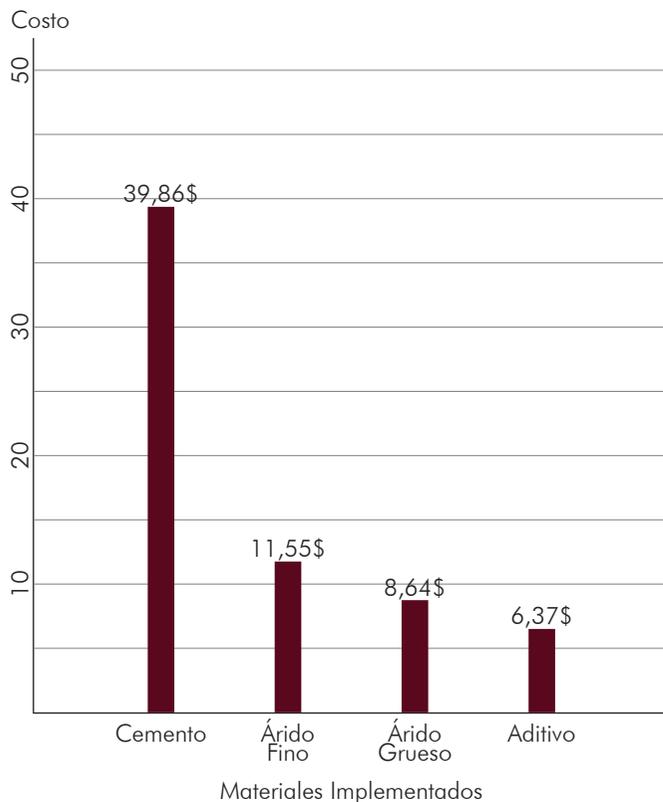
Tabla 30: Cuadro de costos de Predelca



Fuente: Autoría propia

Tabla 31: Cuadro de costos de la Investigación

*COSTOS 4.ª FASE (66,43 \$)  
RESISTENCIA: 322 KG/CM<sup>2</sup>*



Fuente: Autoría propia

## Consideraciones para la colocación del panel como revestimiento de fachada

En caso de que se considere implementar el panel prefabricado elaborado con residuos cerámicos como elemento de revestimiento en fachadas o muros exteriores, es necesario evaluar adecuadamente las alternativas de fijación, tanto desde el punto de vista técnico como normativo. Dado que este tipo de uso aún no ha sido ejecutado en un proyecto real, se plantean dos posibles métodos de colocación: mediante adherencia con mortero no estructural o a través de sistemas de anclaje mecánico.

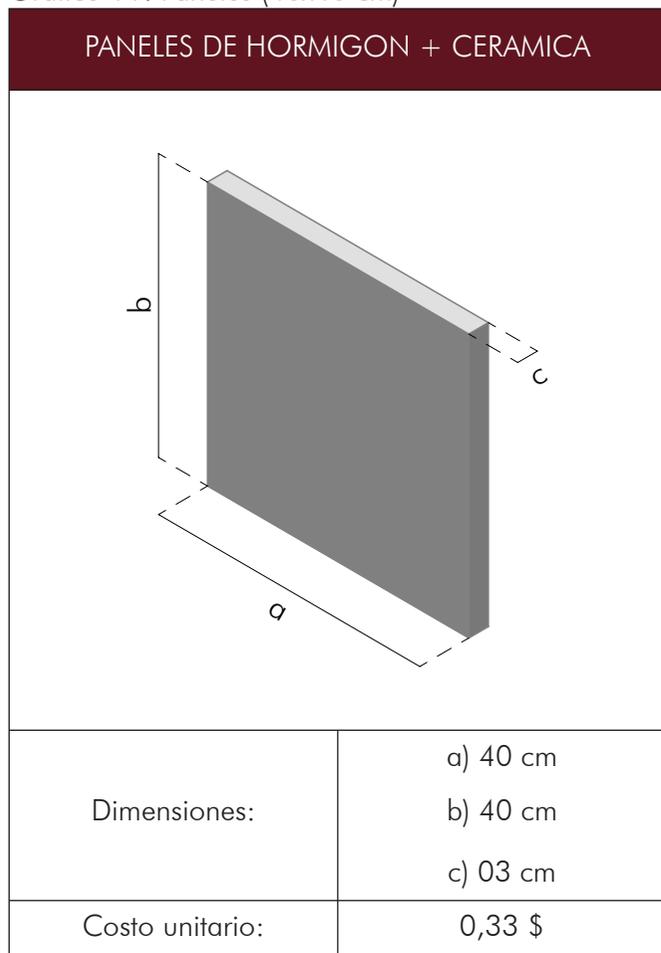
Una primera opción sería el uso de mortero de revestimiento no estructural como medio de adherencia entre el panel y la superficie base. Este método es común en soluciones arquitectónicas tradicionales, particularmente en proyectos de vivienda o rehabilitación. Según la norma ecuatoriana NTE INEN 2518 (2013), estos morteros deben cumplir con requisitos mínimos de resistencia a compresión, adherencia y durabilidad, para garantizar su funcionalidad como acaba-

do exterior, especialmente frente a agentes climáticos (INEN, 2013). Esta técnica implicaría preparar adecuadamente el sustrato (limpieza, humedecimiento, control de planimetría) y aplicar el mortero de manera uniforme, asegurando un espesor compatible con las dimensiones del panel.

Como alternativa, también podría evaluarse la incorporación de un sistema de anclaje mecánico, utilizando pernos, ganchos o perfiles metálicos que conecten el panel a la estructura portante. Esta técnica es ampliamente usada en sistemas de fachadas ventiladas y en el montaje de elementos prefabricados livianos. Fabricantes como Fischer y ULMA Architectural Solutions ofrecen manuales técnicos donde se describen distintos tipos de fijaciones para placas de hormigón, tomando en cuenta esfuerzos de viento, peso propio y dilataciones térmicas (Fischer, 2023; ULMA, 2022). Ambas opciones presentan ventajas y limitaciones.

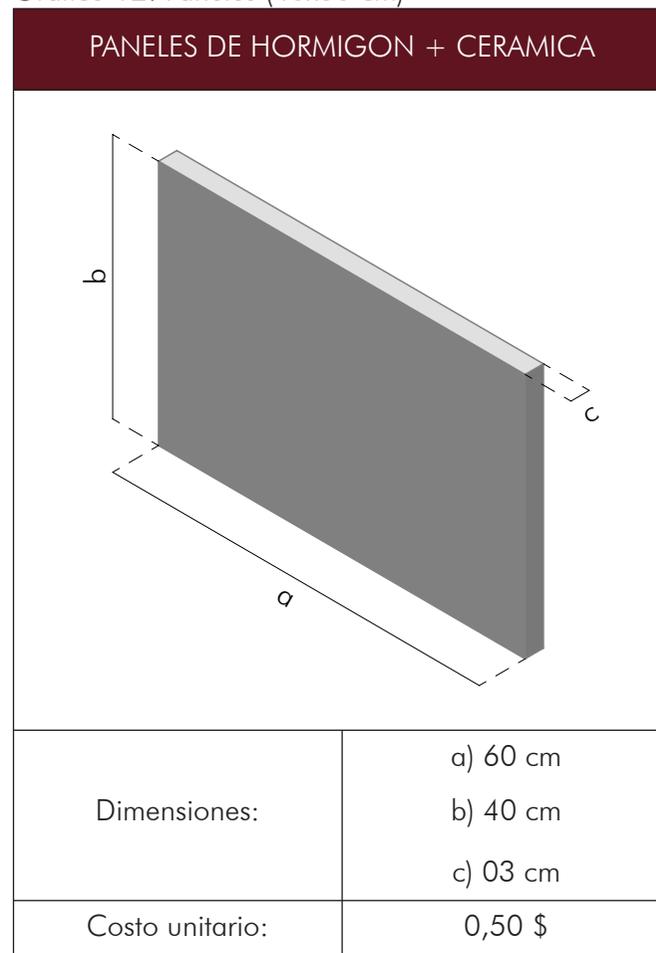
La elección del método más adecuado dependerá del tipo de muro soporte, la zona climática del proyecto, el diseño arquitectónico y la necesidad de mantenimiento futuro. Por tanto, estas propuestas no constituyen una solución definitiva, sino que abren el camino ha-

Gráfico 11: Paneles (40x40 cm)



Fuente: Autoría propia

Gráfico 12: Paneles (40x60 cm)



Fuente: Autoría propia

cia futuras pruebas de validación constructiva, donde se evalúe cuál es la mejor estrategia para implementar este panel reciclado como revestimiento funcional y seguro.



# RESULTADOS

---

El desarrollo experimental de esta investigación se estructuró en cuatro fases progresivas, cada una diseñada para abordar las limitaciones detectadas en la anterior. El objetivo no era únicamente lograr una resistencia estructural adecuada en el hormigón con residuos cerámicos, sino hacerlo bajo condiciones que lo hicieran viable para su producción real, es decir, sin incrementar costos ni modificar significativamente los procesos existentes.

A continuación se presenta un análisis comparativo y crítico de los resultados obtenidos.

## Análisis de la Fase 1: la fragilidad del enfoque directo

En esta primera aproximación, se reemplazó el agregado grueso natural por residuos cerámicos en porcentajes crecientes, sin aplicar tratamiento de saturación ni aditivos. Aunque los resultados no fueron favorables, permitieron comprender mejor las debilidades del material en estado natural.

En la primera fase se reemplazó el agregado grueso natural por residuos cerámicos sin aplicar tratamiento

de saturación ni aditivos. Se experimentó con distintos porcentajes de reemplazo, y la resistencia máxima obtenida fue de  $99 \text{ kg/cm}^2$ , valor que no resulta adecuado ni siquiera para elementos no estructurales.

Las mezclas presentaron baja trabajabilidad, presencia de vacíos y fisuras, y dificultades en la compactación. Estos resultados evidenciaron que el uso del residuo en su estado natural, sin corregir su alta absorción de agua ni su geometría irregular, conduce a un hormigón débil y poco viable para cualquier aplicación práctica.

## Análisis de la Fase 2: mejora superficial sin impacto estructural

En esta fase se introdujeron ajustes en el tratamiento del residuo cerámico, sin embargo, a pesar de este avance visual y práctico, la resistencia a compresión no mostró un incremento significativo.

La resistencia máxima apenas superó los  $99 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual sigue siendo insuficiente incluso para elementos no estructurales, muy por debajo del valor mínimo aceptable de  $260 \text{ kg/cm}^2$  ( $26 \text{ MPa}$ ). Esta falta de me-

jora estructural se atribuye principalmente a una clasificación granulométrica deficiente. Aunque se intentó tamizar el material, el proceso no se ejecutó correctamente, ya que no se aplicó un sistema adecuado de separación con tres tamices que permita obtener una curva granulométrica óptima. Esto resultó en una mezcla desbalanceada, con partículas muy grandes o muy pequeñas, lo que afectó directamente la densidad y cohesión del hormigón.

Este resultado fue clave para el desarrollo del estudio. Si bien la mezcla fue más trabajable, quedó claro que una mejora en estado fresco no garantiza un buen desempeño en estado endurecido. Además, se comprendió que el tratamiento del residuo debe ser más técnico y riguroso si se espera obtener un material que funcione como sustituto real del agregado convencional. Por tanto, esta fase, aunque fallida en términos estructurales, fue útil para detectar errores metodológicos que no debían repetirse en las siguientes etapas.

## Análisis de la Fase 3: se alcanzó la meta técnica, pero no la solución definitiva

En esta fase se retomó el uso del aditivo Sika Viscocrete GL 7952, el mismo que la empresa Predelca emplea regularmente en sus hormigones convencionales. Al aplicarlo junto con un 25% de reemplazo de agregado grueso por residuo cerámico previamente saturado, se logró por primera vez una resistencia a compresión de 248 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, superando el valor mínimo requerido para uso estructural.

Además, la mezcla presentó excelente trabajabilidad, buena cohesión y ausencia de fisuras visibles, lo que marcó un punto de inflexión técnico. Estos resultados demostraban que sí era posible alcanzar un desempeño estructural adecuado utilizando residuos cerámicos, lo cual validaba el potencial del material desde el punto de vista mecánico.

Sin embargo, al momento de evaluar la viabilidad económica, surgieron limitaciones importantes. El aditivo empleado, aunque eficaz, tuvo que aplicarse en mayor cantidad para compensar la alta absorción del

residuo cerámico, lo que elevó considerablemente los costos. A esto se sumó la inclusión de fibras, que incrementaron aún más el presupuesto final.

Según el análisis de costo del metro cúbico de esta mezcla experimental, realizado en tercera fase, alcanzó los 102,7 dólares, frente a los 60,4 dólares del hormigón convencional de Predelca. Este incremento del 70% se explica en gran parte por el costo de las fibras (34,5% del total) y por el aditivo (6,2%), que juntos representaron un impacto significativo en el presupuesto, sin considerar otros gastos indirectos.

A pesar del logro técnico, esta fase dejó en evidencia que el cumplimiento estructural por sí solo no basta si no está acompañado de un modelo de producción eficiente. El alto costo contradice uno de los principios fundamentales de esta investigación: proponer una solución sostenible también en términos económicos. Por ello, los hallazgos de la Fase 3 resultaron fundamentales para redirigir el enfoque hacia un diseño más balanceado, que en la Fase 4 logró mantener el desempeño técnico, reducir los costos y simplificar el proceso productivo sin sacrificar calidad.

Tabla 32: Cuadro resumen de Resultados

FASE	REEMPLAZO	ADITIVO	RESISTENCIA	COSTOS PREDELCA	COSTOS INVESTIGACIÓN
I	30%	Viscoflow 6907	54 Kg/cm <sup>2</sup>	60,37 \$	54,09 \$
II	25%	Viscocrete 7952	15 Kg/cm <sup>2</sup>	60,37 \$	95,45 \$
III	25%	Viscoflow 6907	248 Kg/cm <sup>2</sup>	60,37 \$	102,27 \$
IV	25%	Viscoflow 6907	221 Kg/cm <sup>2</sup>	60,37 \$	66,43 \$

---

## Análisis de la Fase 4: equilibrio entre desempeño y economía

En esta fase se mantuvo la base de la fase anterior, 25% de reemplazo de agregado grueso cerámico previamente saturado, pero se sustituyó el aditivo anterior por Sika Viscoflow 6907, una alternativa más económica y mejor adaptada al tipo de mezcla desarrollada. Este ajuste fue decisivo: se alcanzó una resistencia a compresión de 221 kg/cm<sup>2</sup>, superando ampliamente el mínimo requerido para aplicaciones estructurales.

Lo más destacable es que este resultado no implicó añadir fibras, ligantes adicionales ni ajustes en los procesos tradicionales de producción. La mezcla conservó una trabajabilidad excelente, facilitando su colocación sin requerir cambios logísticos ni técnicos en el proceso constructivo. Esta etapa demostró que, con un ajuste técnico mínimo y un aprovechamiento adecuado del residuo cerámico, es posible obtener un hormigón con alto desempeño estructural.

El verdadero valor de esta fase no radica únicamente en alcanzar la resistencia requerida, sino en haberlo hecho con un diseño simple, reproducible y compa-

tible con los sistemas constructivos existentes, lo que refuerza la propuesta como una alternativa viable y práctica para el sector.

Como complemento a este logro técnico, el análisis económico evidenció que el costo del hormigón elaborado con residuos cerámicos fue de 66,43 dólares por metro cúbico, frente a los 60,35 dólares del hormigón convencional de Predelca. Aunque implica un ligero incremento del 10%, esta diferencia se considera razonable, considerando que se obtuvo una resistencia estructural superior sin alterar la logística ni requerir materiales adicionales.

En otras palabras, se alcanzó más rendimiento con prácticamente el mismo nivel de inversión, reforzando la viabilidad de implementar esta mezcla en contextos reales de producción.

## Análisis del Panel Prefabricado y Ensayo a Flexión

El objetivo de este panel realizado, no era simplemente validar la resistencia mecánica, sino también evaluar la respuesta del material reciclado en una escala real, considerando aspectos como la manipulación, la colocación del hormigón en moldes de gran tamaño y la capacidad de mantener la forma y acabado sin defectos.

Durante el vaciado del panel se observó una excelente fluidez de la mezcla, lo cual facilitó el llenado del molde sin necesidad de vibración excesiva. Además, el fraguado ocurrió de manera homogénea y sin evidencias de fisuras superficiales. Estos indicadores fueron clave para confirmar que el comportamiento del hormigón con residuos cerámicos reciclados no solo es adecuado en condiciones controladas de laboratorio, sino también en un entorno de producción real. Este paso previo permitió validar que el uso del material reciclado podía escalar hacia una aplicación constructiva concreta.

Los resultados del ensayo a flexión sobre vigas prefa-

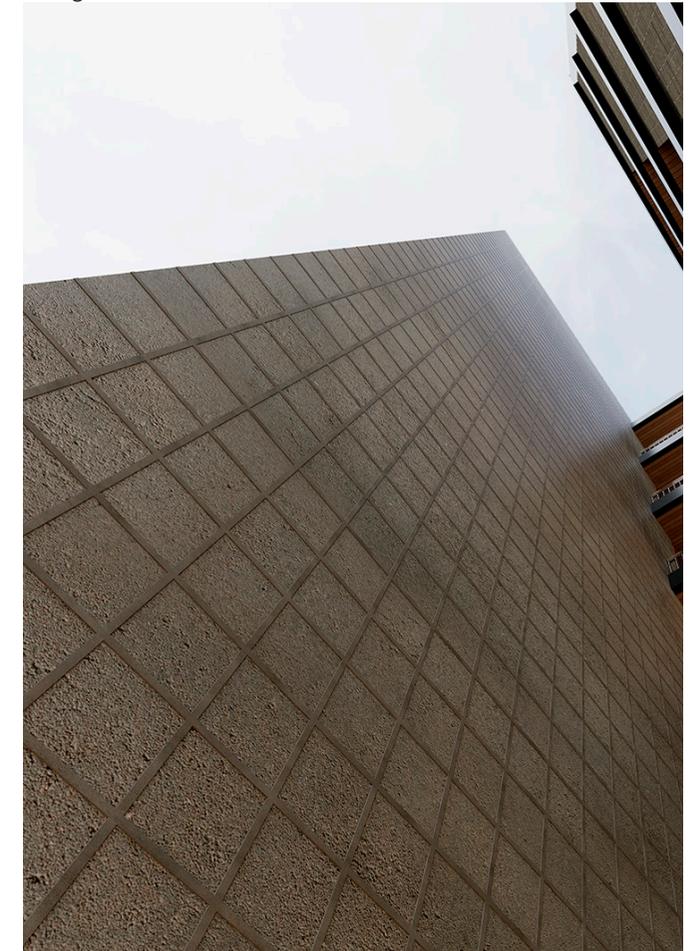
bricadas, Para comprobar que el panel cumple con los requerimientos técnicos, muestran un comportamiento estructural consistente y confiable del hormigón elaborado con residuos cerámicos. Se obtuvo un promedio de resistencia a flexión de  $37 \text{ kg/cm}^2$  a los siete días de curado, lo que representa aproximadamente el 70% de la resistencia esperada a los 28 días. Esta proporción es técnicamente favorable, ya que anticipa una evolución mecánica normal y predecible, propia de un hormigón bien conformado.

Según el ingeniero William Lituma, estos valores no solo se ubican dentro del rango sugerido por recomendaciones industriales para elementos no estructurales ( $35\text{--}50 \text{ kg/cm}^2$ ), sino que también reflejan una adecuada adherencia interna y distribución de esfuerzos, incluso bajo tracción indirecta. El hecho de que durante el ensayo no se hayan observado fallas extrañas ni roturas tempranas sugiere que la mezcla tiene una buena calidad. Esto indica que el hormigón fue bien compactado, que los materiales estuvieron bien integrados y que el comportamiento general fue estable y predecible, lo cual es clave para confiar en su uso en aplicaciones reales.

Este desempeño es relevante porque la flexión es un esfuerzo crítico en elementos prefabricados como vigas, bordillos o paneles delgados, donde las tensiones de tracción pueden generar fallas anticipadas si el material no es estable (Neville & Brooks, 2010). La resistencia obtenida indica que el uso de residuos cerámicos no compromete este comportamiento y, al contrario, puede brindar resultados equiparables a los del hormigón tradicional.

Además, los resultados de flexión complementan positivamente los de compresión obtenidos en la Fase 4, validando que el diseño alcanzado es mecánicamente equilibrado. Esto significa que no solo se logró que el material cumpla con los estándares de resistencia a compresión, sino que también respondió bien frente a otros tipos de esfuerzos, como la flexión. Gracias a ello, se abre la posibilidad de usar este hormigón reciclado en una variedad más amplia de elementos constructivos, sin comprometer su seguridad ni su desempeño.

Imagen 33: Rénder del material



Fuente: Autoría propia

## CONCLUSIONES

---

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito evaluar la viabilidad técnica y económica de incorporar residuos cerámicos como sustituto parcial del agregado grueso en la fabricación de hormigón, con miras a desarrollar un elemento constructivo prefabricado.

Para ello, se trazaron cuatro objetivos específicos que guiaron las fases del estudio, desde la revisión bibliográfica hasta la experimentación práctica. A continuación, se detallan las conclusiones alcanzadas en función de cada uno de estos objetivos.

### Objetivo Específico 1: Estudiar casos de reutilización de material cerámico, a través de la revisión de literatura.

Este objetivo se cumplió al reunir información técnica y experiencias de investigaciones anteriores que han abordado la reutilización de residuos cerámicos en la construcción. Los casos revisados evidenciaron que este material tiene un potencial real como agregado alternativo, siempre que se ajusten los métodos de dosificación y tratamiento. Estas referencias sirvieron como base conceptual para establecer una ruta ex-

perimental válida, destacando la importancia de caracterizar adecuadamente el residuo antes de su uso estructural.

### Objetivo Específico 2: Experimentar las propiedades del material (pasta monoquema), y con ellas realizar una matriz de selección de posibles elementos constructivos

Se realizaron pruebas de granulometría y absorción, revelando que el material reciclado presentaba una curva discontinua y una alta porosidad, debido a su origen no controlado. No obstante, se determinó que sí cumple con las dimensiones establecidas para áridos gruesos según la normativa INEN 1573. Estos análisis permitieron reconocer su viabilidad como agregado, siempre que se implementen medidas como la saturación previa.

Con base en estas propiedades, se elaboró una matriz de selección de elementos constructivos, siendo el panel modular la opción más coherente por su potencial estético, su facilidad de prefabricación y su bajo requerimiento estructural.

### Objetivo Específico 3: Desarrollar un proceso experimental enfocado en la creación de elementos constructivos elaborados a partir de materiales cerámicos reciclados

Este objetivo fue cumplido mediante la ejecución de cuatro fases experimentales. Las dos primeras sirvieron para identificar los principales desafíos del material: alta absorción de agua, baja cohesión y resistencia deficiente (hasta 99 kg/cm<sup>2</sup>). La Fase 3 logró por primera vez una resistencia estructural adecuada (287.7 kg/cm<sup>2</sup>), pero a un costo elevado debido al uso de fibras, lo cual contradijo el enfoque económico.

Finalmente, en la Fase 4 se optimizó el diseño al mantener el 25% de reemplazo y sustituir el aditivo por uno más accesible (Sika Viscoflow 6907), alcanzando una resistencia de 221 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor no solo superó el umbral estructural, sino que se logró sin añadir componentes adicionales ni alterar el proceso constructivo. El costo de producción fue de 66,43 \$/m<sup>3</sup>, apenas un 10% mayor al del hormigón convencional (60,35 \$/m<sup>3</sup>), lo cual se justifica plenamente por el desempeño alcanzado.

## Objetivo Específico 4: Evaluar el elemento constructivo según las pruebas de la normativa para corroborar su calidad

El panel fabricado con el diseño final fue evaluado en condiciones reales de producción y acompañado de ensayos a flexión en vigas. En ambos casos, el comportamiento fue adecuado. Las vigas alcanzaron 37 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a los siete días, sin fallas anómalas, lo que demuestra una buena integración de materiales y una capacidad resistente favorable también frente a esfuerzos de tracción.

Además, se exploraron posibilidades de instalación del panel como revestimiento, considerando tanto adhesión mediante mortero de agarre, como fijaciones mecánicas con anclajes puntuales, de acuerdo a recomendaciones técnicas y normativas especializadas (Mortero INEN 706; sistema de anclaje en fachadas según Martínez & Vidal, 2012).

## Conclusión general

El estudio cumplió su objetivo general al comprobar que es posible reutilizar residuos cerámicos como parte del agregado grueso en hormigones, desarrollando un elemento prefabricado que cumple con requisitos técnicos y económicos. La mezcla final no solo alcanzó resistencias superiores a las exigidas, sino que se integró al proceso constructivo sin complicaciones adicionales.

Desde el punto de vista ambiental, se confirma que esta estrategia permite reducir significativamente el volumen de residuos cerámicos enviados a vertederos, mitigando la contaminación industrial asociada a la producción de materiales de construcción. Al reducir el uso de áridos naturales, también se disminuye el impacto ecológico vinculado a la extracción de materias primas.

En este sentido, la investigación no solo es viable técnicamente, sino que representa un aporte concreto a la sostenibilidad del sector. Como valor agregado, se contribuye al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12: Producción y consumo respon-

sables, al fomentar prácticas constructivas más limpias y conscientes, y al impulsar la reutilización de desechos industriales dentro de una lógica de economía circular.

Además, se demuestra que los residuos cerámicos pueden tener otros usos constructivos, más allá de su incorporación al hormigón, abriendo la puerta a futuras aplicaciones en elementos no estructurales, mobiliario urbano, paneles decorativos o sistemas modulares de bajo impacto ambiental.

## Conclusión general

Se recomienda continuar con estudios de durabilidad a largo plazo, comportamiento en exteriores, resistencia ante ciclos de humedad y validación de métodos de fijación definitivos. Asimismo, se sugiere trabajar con otros residuos de origen cerámico y ampliar las pruebas a elementos de mayor escala.

Con el objetivo de visualizar el potencial del panel prefabricado en un contexto arquitectónico real, se desarrolló un render que simula su aplicación como revestimiento vertical en la fachada de un edificio (Imagen 25). Esta representación permite anticipar cómo el

---

módulo diseñado puede integrarse en proyectos contemporáneos, aportando textura visual mediante su acabado arenado y reforzando la composición formal del edificio a través de su modulación cuadrada.

Más allá del aspecto estético, esta visualización busca demostrar la viabilidad técnica y constructiva del sistema. El uso de paneles prefabricados sugiere eficiencia en la ejecución, posibilidad de mantenimiento y compatibilidad con sistemas de montaje industrializados, como se evidencia en la Imagen 33. Así, el render no solo ilustra una propuesta arquitectónica, sino que también valida el potencial del material reciclado como una solución sostenible, funcional y estéticamente coherente con las demandas contemporáneas.

Este trabajo constituye un paso inicial, pero robusto, hacia una gestión de residuos industriales más consciente y una producción de hormigón más responsable. Fortalecer estas líneas de investigación permitiría consolidar aún más el impacto positivo sobre el ODS 12, y promover políticas técnicas y ambientales que impulsen la reutilización de materiales en el sector constructivo como herramienta clave para combatir la contaminación industrial.

Imagen 33: Rónder de incorporación del elemento en proyectos arquitectónicos

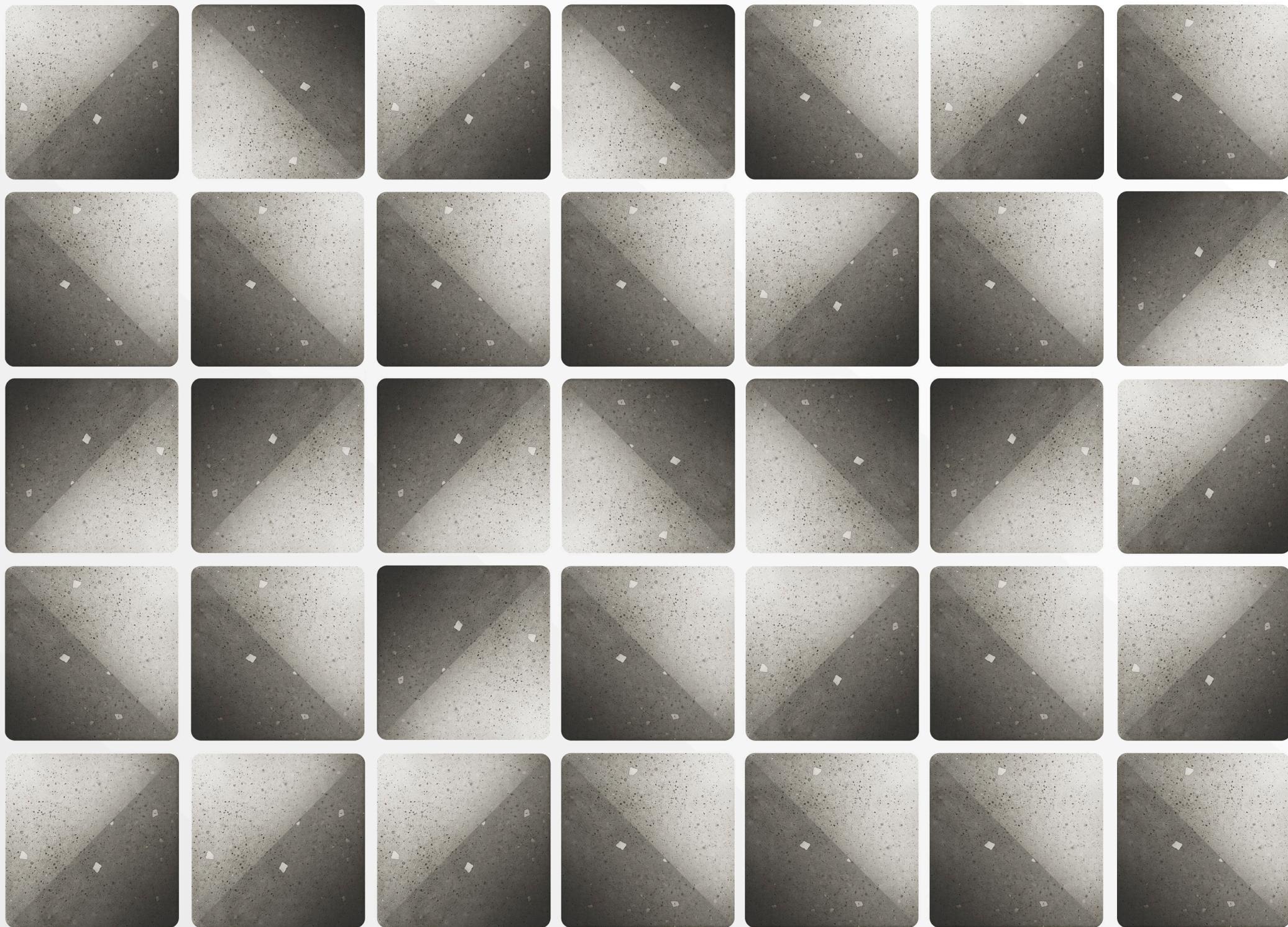


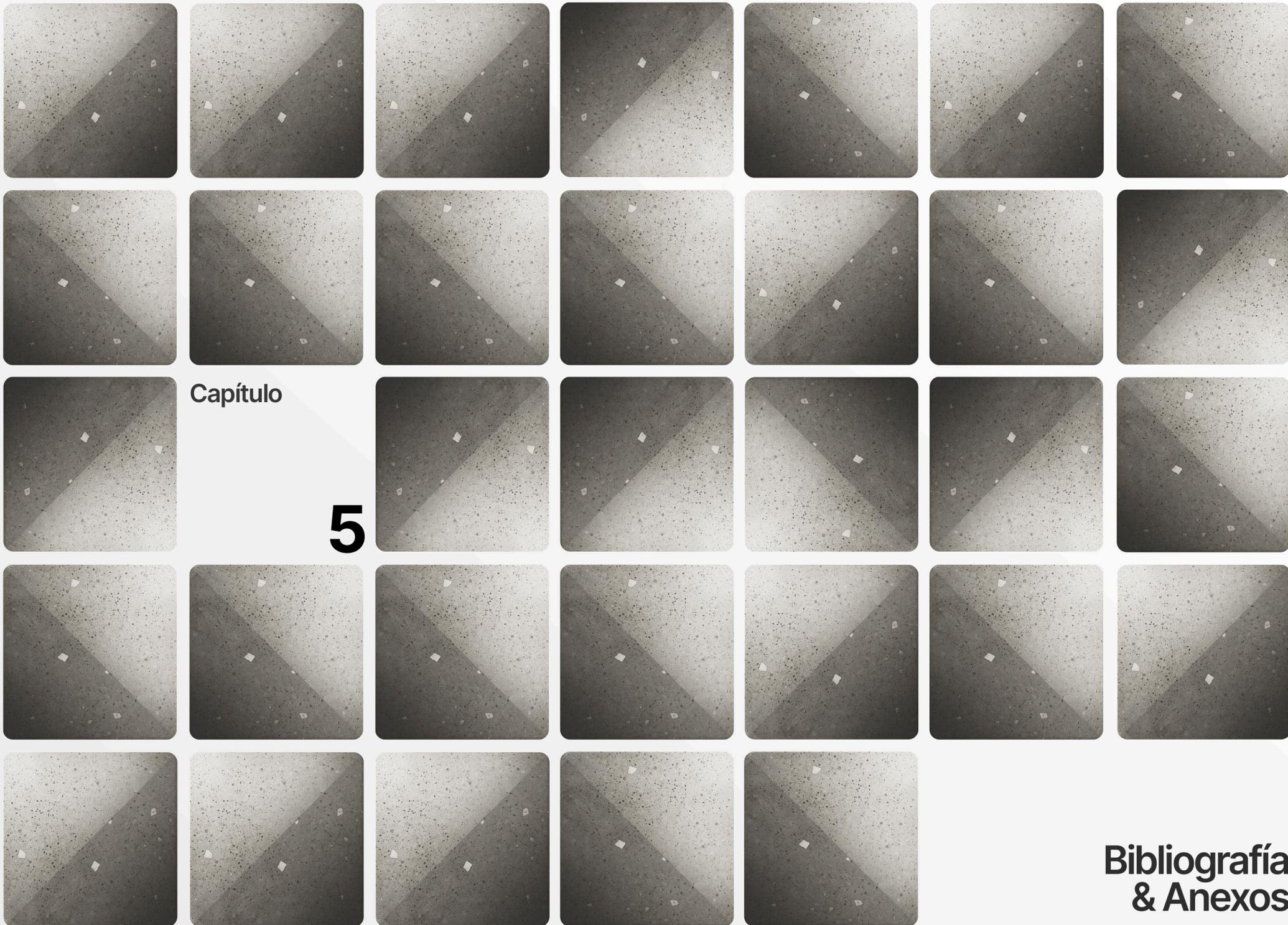
Fuente: Autoría propia

Tabla 33: Cumplimiento de Objetivos y Contribución a la Sostenibilidad

OBJETIVO ESPECIFICO	RESULTADO PRINCIPAL	IMPACTO TECNICO	IMPACTO AMBIENTAL	IMPACTO ECONOMICO
<i>1. ESTUDIAR CASOS DE REUTILIZACIÓN DE CERÁMICOS</i>	Revisión bibliográfica y validación conceptual	Base sólida para el diseño experimental	Identificación de experiencias exitosas	Referentes técnicos para evitar errores costosos
<i>2. CARACTERIZAR EL MATERIAL Y ELABORAR UNA MATRIZ DE SELECCIÓN</i>	Viabilidad como agregado grueso tras pruebas de granulometría y absorción	Panel modular viable técnica y estéticamente	Disminución del uso de materiales vírgenes	Ahorro en materiales tradicionales (reducción de consumo de árido)
<i>3. DESARROLLAR UN PROCESO EXPERIMENTAL</i>	Optimización del diseño con mezcla 25% cerámico + aditivo accesible	Se alcanzaron 221 kg/cm <sup>2</sup> con bajo costo	Menor huella ambiental en el proceso	Producción de hormigón con costo solo 10% mayor al convencional, justificado por el rendimiento
<i>4. EVALUAR EL ELEMENTO SEGÚN NORMATIVA</i>	Cumplimiento de ensayos a flexión y condiciones reales de uso	Integración adecuada en el sistema constructivo	Disminución de residuos finales y mejora en gestión	Aplicabilidad directa en prefabricados sin necesidad de cambios costosos

Fuente: Autoría propia





Capítulo

5

Bibliografía  
& Anexos

## BIBLIOGRAFÍA

---

- American Concrete Institute (ACI). (2003). Guide for precast architectural concrete (ACI 533R-03). ACI.
- Anchatipán Bastidas, D., & Flores Tapia, N. (2022). Actualidad de tratamientos y procesos de reciclaje de los residuos industriales de curtiembres en Ecuador y el mundo. ESPOL. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/844/8444932004/8444932004.pdf>
- ASTM International. (2017). Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete (ASTM C157/C157M-17). ASTM International.
- ASTM International. (2023). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39/C39M-23). ASTM International.
- Castellas, L. (s. f.). Reciclaje de residuos industriales. Google Books. <https://books.google.com.ec/books?id=oA7ndthNMYQC>
- Darmawan, M. S., Soehardjono, A., & Sugianto, E. (2018). The flexural strength of lightweight concrete beam using expanded clay aggregate. *Open Journal of Civil Engineering*, 8(1), 23–37. <https://doi.org/10.4236/ojce.2018.81002>
- Fischer. (2023). Fixing systems for precast concrete panels: Technical manual. Fischer Group. <https://www.fischer.de>
- Fontana, J. (2011). Características geométricas, físicas y mecánicas de mampuestos cerámicos huecos fabricados en Uruguay [Tesis de maestría, Universidad de Entre Ríos]. <https://www.redalyc.org/pdf/145/14518444008.pdf>
- Fu, S., & Lee, J. (2024). Recycling of ceramic tile waste into construction materials: A review. *Developments in the Built Environment*, 18, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100431>
- Hernández Ávila, E. E., & Saravia Zambrano, F. B. (2018). Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con cerámicos reciclados como sustituto del agregado grueso [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15547>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2012). Hormigón. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros (NTE INEN 1577). INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013). NTE INEN 2518: Morteros para revestimiento no estructural. Requisitos. INEN. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Kabirifar, K., Mohammad, M., Wang, C., & Tam, V. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- Kinuthia, J. M., & Nidzam, R. (2011). Towards zero industrial waste: Utilisation of brick dust waste in sustainable construction. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3868623>
- Kolczyk-Tylka, J., & Zych, J. (2023). Investigations concerning improvements of the knock out property of ceramic moulds applied in the investment casting technology. *Archives of Foundry Engineering*. <https://doi.org/10.24425/afe.2023.146676>

---

Mercader, M. P., Marrero, M., Solís, J., Montes, M. V., & Ramírez, A. (2010). Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación. *Informes de la Construcción*, 62(517), 125–132. <https://doi.org/10.3989/ic.2010.v62.i517.238>

Nepomuceno, M. C. S., Isidoro, R. A. S., & Cararino, J. P. G. (2018). Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. *Construction and Building Materials*, 165, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052>

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(7), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>

Pitarch, A., Reig, L., Mira, J., Corrales, J., & Vilalta, L. (2023). Reutilización de residuos de baldosas cerámicas en el desarrollo de baldosas de hormigón [Informe técnico]. Universitat Jaume I. <https://www.qualicer.org>

Ricardo Huete, F., & Begoña Blandón, G. (2004). Caracterización del material obtenido por reciclado de

residuos cerámicos de construcción. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad de Sevilla.

Schützenhofer, S., Kovacic, I., Rechberger, H., & Mack, S. (2022). Improvement of environmental sustainability and circular economy through construction waste management for material reuse. *Sustainability*, 14(17), 11087. <https://doi.org/10.3390/su141711087>

Torres, A., Brandt, J., Lear, K., & Liu, J. (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357(6355), 970–971. <https://doi.org/10.1126/science.aao0503>

ULMA Architectural Solutions. (2022). Technical manual: Ventilated façade systems. ULMA Group. <https://www.ulmaarchitectural.com>

Arenas, C., Vilches, L. F., Leiva, C., Alonso-Fariñas, B., & Rodríguez-Galán, M. (2016). Recycling ceramic industry wastes in sound absorbing materials. *Materiales de Construcción*, 66(324), e106. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.10615>

## IMÁGENES

---

Imagen 02, 03 y 06: Rialto. (s.f.). Imagen de la fábrica de cerámica con paisaje natural [Fotografía]. Recuperado de <https://rialto.ec/somos>

Imagen 27: Concrelab. (2016). Pruebas de fisuración en concreto [Fotografía]. Recuperado de <https://www.concrelab.com/portfolio/ensayos-de-retraccion-para-un-gran-complejo-arquitectonico-en-colombia/>

Imagen 30 y 31: Sika. (s.f.). Sika Fiber Force 48 [Fotografía]. Recuperado de <https://ecu.sika.com/>

Tabla 01: Santos Jiménez, R. (2018). Durabilidad del hormigón mediante la adición de residuos industriales en ambientes agresivos [Tesis de maestría, Universidad de Burgos]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=246099>

Tabla 02: Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>

Tabla 03: Arenas, C., Vilches, L. F., Leiva, C., & Alonso, B. (2016). Development of a new acoustic insulation material from recycled cellulose–ceramic waste. *Materiales de Construcción*, 66(324), e10615. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.10615>

Tabla 04: Pitarch, A., Reig, L., Mira, J., Corrales, J., & Vilalta, L. (2023). Reutilización de residuos de baldosas cerámicas en el desarrollo de baldosas de hormigón [Informe técnico]. Universitat Jaume I. <https://www.qualicer.org>

Tabla 05: Hernández Ávila, É. E., & Saravia Zambrano, F. B. (2018). Análisis de las propiedades físicas

y mecánicas del hormigón elaborado con cerámicos reciclados como sustituto del agregado grueso [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15547>

Tabla 06: Nepomuceno, M. C. S., Isidoro, R. A. S., & Catarino, J. P. G. (2018). Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. *Construction and Building Materials*, 165, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052>

Tabla 07:

