



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Influencia de la inclusión de polvo de cerámica y fibras de coco en un hormigón estructural

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

AUTOR:

Cobos Galarza, Jhair Alexis

Lucio Pérez, Geovany David

TUTOR:

Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Jhair Alexis Cobos Galarza**, con cédula de ciudadanía 0650175177 y **Geovany David Lucio Pérez**, con cédula de ciudadanía 0202038360, autores del trabajo de investigación titulado: **“INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE POLVO DE CERÁMICA Y FIBRAS DE COCO EN UN HORMIGÓN ESTRUCTURAL”**, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 15 de junio de 2026.



Jhair Alexis Cobos Galarza

C.I: 0650175177



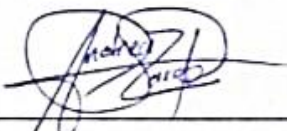
Geovany David Lucio Pérez

C.I: 0202038360

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE POLVO DE CERÁMICA Y FIBRAS DE COCO EN UN HORMIGÓN ESTRUCTURAL”**, bajo la autoría de Jhair Alexis Cobos Galarza y Geovany David Lucio Pérez; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, al 01 día del mes de julio de 2026.



Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés

C.I: 0604079772

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **"INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE POLVO DE CERÁMICA Y FIBRAS DE COCO EN UN HORMIGÓN ESTRUCTURAL"**, presentado por **Jhair Alexis Cobos Galarza** con cédula de identidad número 0650175177 y **Geovany David Lucio Pérez** con cédula de identidad número 0202038360, bajo la tutoría de Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 01 de julio de 2026.

Ing. Cristian Andrés Marcillo Zapata, MGs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Marcelo David Guerra Valladares, MGs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Tito Oswaldo Castillo Campoverde, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **Jhair Alexis Cobos Galarza** con CC: **0650175177** y **Geovany David Lucio Pérez** con CC: **0202038360**, estudiantes de la Carrera **Ingeniería Civil**, Facultad de **Ingeniería**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Influencia de la Inclusión de polvo de cerámica y fibras de coco en un hormigón estructural**", cumple con el 7 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **Compilatio Magister+**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 19 de junio de 2026

Ing. Andrea Zárate
TUTOR(A)

DEDICATORIA

A Dios por regalarme la salud, la vida, la fuerza y perseverancia para finalizar esta etapa, Él jamás me abandonó, cuando pensaba que me rendía me dio los ánimos para seguir adelante.

A mis padres, César y Rosario, por ser el regalo más grande que Dios me dio, gracias por su amor, por su paciencia que me demostraron cada día que formó parte de este proceso, aún en los momentos más difíciles estuvieron para mí, lo que soy y seré es gracias a ellos.

A mis hermanas Antonella y Cayetana, por su apoyo incondicional y por ser también parte de este proceso, por la confianza puesta en mí de que si lo lograra. A toda mi familia, en especial a mi tía Cecy, aunque ahora la distancia nos separa siempre me demostró su amor incondicional como una segunda madre.

Jhair Alexis Cobos Galarza

DEDICATORIA

Este trabajo representa años de esfuerzo, sacrificio, aprendizaje y perseverancia, por lo que quiero dedicarlo, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en los momentos de dificultad. Gracias por bendecirme con salud, sabiduría y la oportunidad de alcanzar esta importante meta, acompañándome en cada paso de este camino.

A mis padres, Geovany y Carmita, quienes son mi mayor apoyo y fortaleza. Gracias por cada sacrificio realizado, por creer en mí cuando las cosas parecían difíciles, por sus consejos, su paciencia y su amor incondicional. Todo lo que soy y todo lo que he logrado tiene raíces en los valores y enseñanzas que me han inculcado. Este logro es tan suyo como mío.

A mis hermanas, Pamela y Scarlet, por acompañarme siempre, por sus palabras de aliento y por estar presentes en cada etapa de mi vida. Gracias por confiar en mí y celebrar cada uno de mis avances.

A toda mi familia, especialmente a mi abuelito Guido, por su cariño y apoyo constante. Y a mi querida abuelita Rita, quien ya no está físicamente conmigo, pero cuya presencia he sentido a lo largo de este proceso. Sé que desde el cielo me ha cuidado, guiado y dado fuerzas para no rendirme. Este logro también es para usted, porque su amor y sus enseñanzas siguen viviendo en mi corazón.

A mis tíos, especialmente a Fabián, quien fue mucho más que un familiar durante mis años de estudio; fue un apoyo incondicional, una compañía constante y una persona en quien siempre pude confiar mientras me encontraba lejos de casa. Asimismo, agradezco profundamente a mis tíos Mercedes, Judith y Fernando, por su cariño, apoyo y por estar siempre dispuestos a ayudarme cuando lo necesité.

A mis amigos de toda la vida, Johan, Jhoel y Alejandro, y a mis amigos de la universidad, Emilio y David, gracias por su amistad, compañía y por compartir conmigo momentos inolvidables durante esta etapa.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a este logro. Cada consejo, palabra de aliento y muestra de confianza fueron fundamentales para llegar hasta aquí.

Geovany David Lucio Pérez

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta este punto, sé que el tendrá preparado mejores cosas.

A mis padres, hermanas, familia, gracias por el apoyo constante y sus palabras de aliento, por enseñarme que antes de ser profesional lo primero es seguir a Dios y ser una buena persona y gracias también por no soltar mi mano cuando sentía que todo se venía abajo.

A los amigos verdaderos que hice en todo este proceso universitario, por no darme la espalda cuando más lo necesitaba, a cada persona importante que de igual forma me acompañó en este proceso.

A mi tutora de tesis Ing. Andrea Zárate, por su paciencia, guía, esfuerzo y por la confianza que puso en mí para lograr esta meta. A mi compañero de tesis y gran amigo Geovany, por haber confiado en este equipo de que lo íbamos a lograr, a todos los docentes de la carrera, quienes me ayudaron en mi formación personal.

Jhair Alexis Cobos Galarza

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por bendecirme con salud, fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar cada desafío y permitirme culminar una de las metas más importantes de mi vida profesional.

A mis padres, Geovany y Carmita por su amor incondicional, sacrificio, esfuerzo y apoyo constante a lo largo de mi formación académica. Gracias por creer siempre en mí, por impulsarme a seguir adelante y por ser el pilar fundamental de cada uno de mis logros. A mis hermanas, Pamela y Scarlet, por su cariño, comprensión y motivación permanente durante este proceso.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutora, la ingeniera Andrea Zárate, por su paciencia, dedicación, orientación y valiosos conocimientos compartidos durante el desarrollo de esta investigación. Su guía fue fundamental para la culminación exitosa de este trabajo.

Asimismo, agradezco a la ingeniera Cristina Polo, por su apoyo y asesoramiento durante la fase experimental de la investigación, así como por su disposición para guiarnos y colaborar en las actividades realizadas en el laboratorio.

A toda mi familia, especialmente a mis abuelitos, tíos y primos, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por su cariño, confianza y apoyo incondicional, así como por acompañarme y motivarme en cada etapa de este camino.

Finalmente, agradezco a mi compañero de tesis, Alexis, por el compromiso, esfuerzo y dedicación compartidos durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por el trabajo en equipo, la responsabilidad y la colaboración que hicieron posible alcanzar juntos esta importante meta académica.

A todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación personal y profesional, les expreso mi más profundo agradecimiento. Este logro también lleva una parte de cada uno de ustedes.

Geovany David Lucio Pérez

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	20
2.1 Incorporación de materiales reciclados en el hormigón	20
2.2 Residuos reciclados en las propiedades mecánicas del hormigón	20
2.3 Polvo de cerámica como agregado fino en el hormigón.....	21
2.4 El hormigón reforzado con fibras	22
CAPITULO III. MARCO CONCEPTUAL.....	24
3.1 Hormigón reciclado	24
3.2 Fibras en el hormigón	24
3.3 Fibras sintéticas.....	24
3.4 Fibras naturales	24
3.5 Polvo de cerámica	24
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	25
4.1 Tipo de investigación	25
4.2 Enfoque	25
4.3 Alcance de la investigación	25
4.4 Población.....	26
4.4.1 Fase 1	27
4.4.2 Fase 2	28

4.4.3	Fase 3	28
4.4.4	Fase 4	29
4.4.5	Fase 5	29
4.5	Procesamiento y análisis	29
4.5.1	Materiales	29
4.6	Diseño experimental	31
4.7	Ensayos realizados	33
4.7.1	Granulometría de agregado fino y agregado grueso.....	33
4.7.2	Ensayo de resistencia a compresión.....	34
4.7.3	Ensayo de revenimiento.....	34
4.7.4	Densidad y absorción de agregado grueso	34
4.7.5	Densidad y absorción de agregado fino	34
4.7.6	Densidad y absorción de polvo de cerámica.....	35
4.7.7	Resistencia a tracción indirecta o ensayo brasileño	36
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		37
5.1	Revisión de la Bibliografía	37
5.2	Toma de decisiones	38
5.2.1	Estudios bibliográficos sobre las fibras de coco en el hormigón	38
5.2.2	Estudios bibliográficos del polvo de cerámica en el hormigón.....	41
5.3	Obtención de materiales.....	43
5.4	Caracterización del polvo de cerámica	43
5.5	Curva granulométrica del agregado grueso	44
5.6	Curva granulométrica del agregado fino.....	46
5.7	Curva granulométrica del polvo de cerámica	47
5.8	Resultados de Caracterización de los Agregados.....	48
5.9	Diseño de hormigón.....	50
5.10	Resultados de resistencia a compresión de hormigones patrones.....	50
5.11	Resultados de resistencia a compresión.....	51
5.12	Compresión 7 días.....	54
5.13	Compresión 14 días.....	55
5.14	Compresión 28 días.....	57
5.15	Evaluación de resistencia de dosificaciones	59
5.16	Resistencia a tracción.....	61
5.17	Resistencia a flexión	63
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.....		65

6.1	Conclusiones	65
6.2	Limitaciones.....	66
6.3	Recomendaciones	67
	Bibliografía	68
	ANEXOS	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Codificación de dosificaciones propuestas	27
Tabla 2	Dosificaciones para elaboración de probetas de fase 1	27
Tabla 3	Porcentajes para cada dosificación con polvo de cerámica y fibra de coco por m3 ..	28
Tabla 4	Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 2	28
Tabla 5	Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 3	29
Tabla 6	Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 4	29
Tabla 7	Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 5	29
Tabla 8	ensayos realizados	33
Tabla 9	Resumen de los estudios analizados en la revisión bibliográfica.....	37
Tabla 10	Matriz de estudios bibliográficos sobre las fibras de coco en el hormigón	39
Tabla 11	Matriz de estudios bibliográficos sobre el polvo de cerámica en el hormigón	42
Tabla 12	Caracterización del polvo de cerámica.....	44
Tabla 13	Caracterización del agregado fino y del polvo de cerámica.....	48
Tabla 14	Caracterización del agregado grueso.....	49
Tabla 15	Dosificación por m3 para un hormigón de 24 mpa	50
Tabla 16	Resultados de ensayo a compresión de los hormigones patrón.	50
Tabla 17	Resistencia de probetas a los 7 y 28 días	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología.	26
Fig. 2. Diagrama de la primera fase del diseño experimental.....	31
Fig. 3. Diagrama de la segunda fase del diseño experimental.	32
Fig. 4. Curva de granulometría del agregado grueso.	45
Fig. 5. Curva de granulometría del agregado fino.	46
Fig. 6. Curva de granulometría del polvo de cerámica.	47
Fig. 7. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 7 días.....	51
Fig. 8. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 3 días.....	53
Fig. 9. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 7 días.....	54
Fig. 10. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 14 días.....	56
Fig. 11. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 28 días.	58
Fig. 12. Resistencia del hormigón respecto al límite de dosificaciones	60
Fig. 13. Resistencia a tracción y densidad de las probetas a los 28 días.	61
Fig. 14. Resistencia a flexión de las vigas a los 28 días.	63
Fig. 15. Matriz de revisión bibliográfica.	80
Fig. 16. Obtención de agregados en la mina “Cerro Negro”	81
Fig. 17. Obtención de cocos.....	81
Fig. 18. Obtención de fibras.....	82
Fig. 19. Curado de fibras.....	82
Fig. 20. Secado de fibras.....	83
Fig. 21. Recorte de fibras.....	83
Fig. 22. Trituración de cerámica.	83
Fig. 23. Granulometría de agregado fino y grueso	84
Fig. 24. Granulometría polvo de cerámica.....	85
Fig. 25. Densidad polvo de cerámica.....	87
Fig. 26. Densidad agregado fino.....	87
Fig. 27. Elaboración de mezcla.....	88
Fig. 28. Desmoldado de probetas.....	88
Fig. 29. Proceso de curado de las probetas.	89
Fig. 30. Ensayo a compresión 7 días.....	89
Fig. 31. Cilindros elaborados para la fase 2.....	91
Fig. 32. Ensayo a compresión 3 días.....	91

Fig. 33. Curado de las probetas.....	93
Fig. 34. Ensayo a compresión 7 días.....	93
Fig. 35. Mezcla en moldes de cilindros y vigas.....	95
Fig. 36. Curado de cilindros y vigas.	95
Fig. 37. Ensayo a compresión 14 días.....	96
Fig. 38. Ensayo a compresión 28 días.....	97
Fig. 39. Toma de medidas de la viga.....	99
Fig. 40. Nivelación de resortes.	99
Fig. 41. Colocación de viga en máquina de ensayo.	99
Fig. 42. Viga ensayada a flexión.	100
Fig. 43. Verificación de dimensiones del cilindro.....	102
Fig. 44. Colocación del cilindro en máquina de ensayo.	102
Fig. 45. Cilindro ensayado a tracción.	102

RESUMEN

La investigación actual tiene como objetivo diseñar un hormigón estructural mediante el uso y adición de polvo de cerámica y fibras de coco, para así evaluar su efecto en las propiedades del material y así desarrollar alternativas sostenibles en la construcción. El estudio se desarrolló con un enfoque cuantitativo y un alcance explicativo. Para lo cual, se elaboraron diferentes mezclas de hormigón con sustituciones parciales del agregado fino por polvo de cerámica de hasta el 20% y con adiciones de fibras de coco de hasta el 1.5% respecto al volumen del hormigón. También, se realizaron ensayos de caracterización de materiales como granulometría, densidad, absorción, asentamiento, resistencia a compresión, tracción indirecta y flexión, conforme a las normas ASTM y NTE INEN. Los resultados obtenidos demostraron que la adición de estos materiales favorece el desempeño mecánico del hormigón. La mezcla con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco tuvo un mejor comportamiento, teniendo una resistencia a compresión de 31.28 MPa a los 28 días, mayor al del hormigón patrón de 24 MPa. Se concluye que el uso de polvo de cerámica y fibras de coco es una alternativa adecuada para la producción de hormigón estructural, es así como se promueve el uso de materiales reciclados y la reducción de residuos sin comprometer las propiedades del hormigón.

Palabras clave: polvo de cerámica, fibras de coco, resistencia a compresión, sostenibilidad.

ABSTRACT

This research aimed to design recycled and reinforced structural concrete by incorporating ceramic powder and coconut fibers, with the goal of evaluating their effect on the material's mechanical properties and contributing to the development of more sustainable construction alternatives. The study employed a quantitative approach and an explanatory scope. To this end, different concrete mixes were prepared with partial substitutions of fine aggregate by ceramic powder (up to 20%) and coconut fiber (up to 1.5%) by volume. Material characterization tests were also performed, including particle size distribution, density, absorption, slump, compressive strength, indirect tensile strength, and flexural strength, in accordance with ASTM and NTE INEN standards. The results obtained demonstrated that the moderate incorporation of these materials improves the concrete's mechanical performance. The mixture with 12% ceramic powder and 1% coconut fiber exhibited the best performance, achieving a compressive strength of 31.28 MPa at 28 days, exceeding that of the control concrete (24 MPa). It is concluded that the use of ceramic powder and coconut fibers constitutes a suitable alternative for producing sustainable structural concrete, promoting the use of recycled materials and reducing waste without compromising its mechanical properties.

Keywords: ceramic powder, coconut fibers, compressive strength, sustainability.



Reviewed by:
Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La construcción es uno de los sectores con mayor consumo de recursos naturales y generación de residuos a nivel mundial. El crecimiento de la infraestructura y la urbanización han incrementado la demanda de materiales como cemento, arena y agregados pétreos, cuya extracción y procesamiento generan impactos ambientales significativos. Además, la producción de hormigón y sus componentes necesitan elevados consumos de energía y producen las emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiendo al sector como un desafío actual relacionados con la sostenibilidad y la reducción de la huella de carbono [1].

Con el objetivo de disminuir la dependencia de nuevas materias primas, las organizaciones internacionales han creado tácticas centradas en la economía circular, fomentando el reciclaje, la valorización de residuos y su reutilización. En este panorama, la Unión Europea considera que los desechos de construcción y demolición son uno de los materiales más relevantes por su gran cantidad. Con este fin, fomentan la reutilización de estos recursos en nuevos ciclos de producción para disminuir el volumen de desechos enviados a vertederos, minimizar el impacto medioambiental de la construcción y optimizar el uso de los recursos.

Por esta razón, varios productos de desecho han llamado la atención por su posible aplicación como materiales de construcción. Residuos agroindustriales como la fibra de coco y residuos cerámicos generados por procesos industriales de renovación y demolición son algunos ejemplos. La aplicación de estos materiales es una opción para disminuir la acumulación de desechos y fomentar soluciones constructivas más sostenibles, siguiendo los principios de la economía circular y del resguardo de los recursos naturales [2].

En Ecuador, esta es una cuestión relevante, dado que la industria de la construcción aún no ha adoptado el reciclaje y la reutilización de desechos como prácticas habituales. Cuando no existe una gestión adecuada de los residuos, se desechan materiales reciclables, como las fibras de coco y el polvo de cerámica, en las disposiciones finales. Contamina el ambiente y, además, gasta recursos que podrían ser reutilizados en los procedimientos de producción. Este problema demuestra que es útil desarrollar opciones que promuevan una gestión de desechos más eficiente y sustentable.

El hormigón es una opción factible para emplear materiales reciclados, ya que tiene un uso de gran duración en la construcción y en la ingeniería civil. No obstante, es imprescindible analizar antes su comportamiento y sus propiedades vinculadas al rendimiento de la estructura para que los residuos puedan emplearse como sustitutos o refuerzos en su composición. Es así como, resulta necesario analizar la influencia que puede tener la inclusión de polvo de cerámica y fibras de coco en las propiedades mecánicas del hormigón, con el fin de determinar su funcionalidad y su aporte a la sostenibilidad del sector de la construcción [3].

De acuerdo con lo dicho, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo afecta la inclusión del polvo de cerámica y fibras de coco a las propiedades mecánicas del hormigón?

1.2 Planteamiento del problema

La Unión Europea determina que el sector de la construcción es responsable del alto consumo de recursos naturales y de la generación de aproximadamente el 35% de los residuos totales producidos en la región [4]. Ante esta situación, sus programas de economía circular establecen que los residuos de construcción deben ser considerados recursos y no desechos, promoviendo su reutilización, reciclaje y valorización. Además, ha definido como objetivo que al menos el 70% de estos residuos sean recuperados para reducir la extracción de materias primas, disminuir la cantidad de materiales enviados a vertederos y contribuir a la reducción de la huella de carbono asociada a la producción de nuevos materiales de construcción, promoviendo un modelo constructivo más sostenible y eficiente en el uso de recursos [5].

En el ámbito local, la situación es distinta ya que el reciclaje de residuos de la construcción no se considera una necesidad ni prioridad, la falta de sistemas estructurados para la gestión provoca que materiales como el polvo de cerámica proveniente de procesos industriales, así como desechos agroindustriales como las fibras de coco terminan en vertederos, generando contaminación del suelo, agua y aire, sin aprovechar su potencial como materiales reciclados.

La problemática central radica en la falta de soluciones sostenibles para reducir la huella de carbono del hormigón, disminuir el consumo de recursos naturales y aprovechar residuos como el polvo de cerámica y fibras de coco. Además, se desconoce cómo la inclusión combinada de estos materiales afecta en las propiedades mecánicas del hormigón estructural y cuáles son las proporciones óptimas para garantizar un adecuado desempeño.

Con el propósito de aportar a la solución de esta problemática, la presente investigación busca desarrollar y evaluar un hormigón estructural elaborado con materiales reciclados que permita valorizar residuos y reducir el impacto ambiental. En un futuro, se espera que los resultados sirvan como base para promover el uso de materiales sostenibles en la industria de la construcción, desarrollar nuevas investigaciones y fomentar prácticas constructivas más responsables con el medio ambiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un hormigón estructural reciclado y reforzado con la inclusión de polvo de cerámica y fibras de coco.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el material polvo de cerámica como sustituto del agregado fino y acondicionar las fibras de coco mediante un tratamiento previo, como material de refuerzo en el hormigón estructural.
- Determinar la dosificación óptima considerando la resistencia y densidad del hormigón estructural.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Incorporación de materiales reciclados en el hormigón

El hormigón es un material de cual sus propiedades dependen de la calidad de los materiales. De acuerdo con la norma ASTM C33/C33M, los agregados empleados en la fabricación de hormigón tienen que satisfacer criterios de limpieza, resistencia y, granulometría, asegurando que estén libres de materiales perjudiciales para su funcionamiento. Los progresos en la tecnología de materiales han posibilitado examinar la utilización de materiales reciclados tratados como sustitutos parciales de los elementos de hormigón.

Los desechos cerámicos generados durante las actividades de construcción son uno de los materiales alternativos que se estudian con mayor frecuencia. Tras ser triturados, clasificados y caracterizados, estos materiales pueden añadirse a la mezcla de concreto como reemplazo parcial de los agregados finos, haciendo uso de sus características físicas [5]. Su utilización no corresponde a la inclusión directa de desechos, sino al empleo de materiales seleccionados para cumplir funciones determinadas dentro de la matriz cementicia.

Diversos estudios han demostrado que la adición de materiales reciclados en cantidades adecuadas puede mantener e incluso mejorar determinadas propiedades del hormigón, especialmente cuando se controla la dosificación y se verifican características como la densidad, absorción y distribución granulométrica [5], [12]. Por eso, el aprovechamiento de residuos cerámicos procesados representa una opción que aporta a la optimización de recursos y a la reducción del consumo de agregados naturales sin afectar el comportamiento mecánico del material [17].

Por lo tanto, la evaluación de materiales reciclados como componentes del hormigón representa una investigación de interés para la ingeniería civil, ya que permite analizar nuevas alternativas de sustitución de materiales tradicionales, garantizando el cumplimiento de los requisitos exigidos para la producción de mezclas de hormigón de calidad.

2.2 Residuos reciclados en las propiedades mecánicas del hormigón

El empleo de residuos reciclados en la elaboración del hormigón ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas, para reducir el impacto ambiental del sector de la construcción como por el interés en evaluar el comportamiento mecánico de materiales alternativos. Dado que el hormigón es un material compuesto, sus propiedades mecánicas dependen de la naturaleza y proporción de sus componentes, así como la unión entre la pasta de cemento y los agregados.

Se han realizado varias investigaciones que muestran su efecto en las propiedades mecánicas como son resistencia a compresión, resistencia a tracción y el módulo de elasticidad del hormigón. Los cambios son distintos en todos los casos y dependen de características como el tipo de residuo que se utilice, cómo se trate previamente, la granulometría y la cantidad de material convencional que se reemplace. Según el estudio de Thomson *et al.* [3], estos factores son fundamentales para entender cómo los residuos reciclados afectan al hormigón.

En el caso de los residuos de origen industrial, como las escorias, las cenizas y los subproductos cerámicos, se ha analizado que cuando se utiliza para reemplazar parte del

cemento, esto puede afectar directamente cómo se desarrolla la resistencia mecánica. Ciertos materiales tienen actividad puzolánica, lo que significa que ayudan a crear más productos de hidratación, esto hace que la matriz cementicia sea más densa. Los estudios experimentales muestran que hacer reemplazos moderados puede mantener la resistencia a compresión del hormigón a medida que envejece, e incluso puede mejorarla en algunas etapas [6].

Por otro lado, cuando se usan materiales reciclados de construcción y demolición, la resistencia puede reducirse en ciertos porcentajes. Esto es porque los materiales tienen más poros y absorben más agua. Sin embargo, estudios recientes muestran que, si se controla bien la mezcla y el tratamiento de los materiales reciclados, es posible lograr resistencias que sean adecuadas para estructuras, especialmente si se limita el porcentaje de material reciclado que se utiliza [7].

La resistencia a tracción y cómo se comporta el material cuando se fisura también cambian cuando se agregan residuos reciclados. Agregar fibras, ya sean artificiales o de origen natural, es una buena forma de mejorar cómo se comporta el hormigón después de que se forma una fisura. Las fibras ayudan a unir las partes separadas por la fisura, evitando que se aumente y permitiendo que el material se comporte de manera más suave cuando se aplica una carga. Esto es muy importante en hormigones que contienen residuos, donde el material puede volverse más frágil, si no se incluyen procesos de refuerzo adecuados [13].

El hormigón puede perder resistencia cuando se utilizan materiales reciclados, esto pasa con materiales que no son resistentes como los que se encuentran de forma natural. Esto significa que el hormigón se puede deformar fácilmente y eso es importante cuando se diseña una estructura. Sin embargo, algunos estudios muestran que esto puede ser beneficioso en ciertos casos, ya que permite que el hormigón pueda absorber más energía [9].

Varios estudios plantean que cuando se agregan residuos reciclados al hormigón, es necesario hacer experimentos y ensayos previos. El objetivo es encontrar la cantidad adecuada de residuos que se pueden agregar para que el hormigón siga teniendo la misma resistencia y no afecte el medio ambiente. Los desechos pueden ser muy diversos, por lo que es relevante garantizar que posean las propiedades químicas y físicas apropiadas y examinar la manera en que influyen en las características del hormigón final.

2.3 Polvo de cerámica como agregado fino en el hormigón

Emplear materiales reciclados en la construcción ha sido fomentado como un método de sostenibilidad, en términos de cómo se gestionan los desechos. Un subproducto de la industria cerámica, el polvo de cerámica ha surgido como una opción para sustituir parcialmente los agregados finos en el proceso de producción del hormigón. El polvo de cerámica se genera durante la fabricación de productos cerámicos, como baldosas y ladrillos y es considerado un residuo de difícil disposición, que en muchos casos acaba siendo desechado en disposiciones finales [4].

El polvo de cerámica presenta características químicas y físicas que favorecen en el hormigón. En la composición, este material está principalmente compuesto por compuestos químicos como: sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), que son componentes típicos del cemento. Gracias a su composición, el polvo de cerámica tiene un

efecto puzolánico, es decir, la capacidad de reaccionar con la cal generada durante la hidratación del cemento para formar productos de hidratación adicionales que contribuyen a la resistencia y durabilidad del hormigón [5].

Diversos estudios han mostrado que la inclusión de polvo de cerámica como agregado fino en el hormigón puede afectar tanto las propiedades frescas como las propiedades mecánicas del material. En estado fresco, la incorporación de polvo de cerámica aumenta la consistencia de la mezcla, debido a la mayor absorción de agua de este material en comparación con los agregados tradicionales [12]. Este aumento en la absorción puede ser un factor crítico a la hora de determinar la dosificación del agua, ya que puede afectar en la trabajabilidad y la relación agua cemento de la mezcla.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los estudios han demostrado que la sustitución parcial de los agregados finos convencionales por polvo de cerámica puede mantener o incluso mejorar la resistencia a compresión del hormigón, especialmente cuando se utilizan proporciones moderadas hasta el 15% de reemplazo. Esta mejora es el resultado de la acción puzolánica del polvo de cerámica, que ayuda a crear una estructura más compacta y uniforme, disminuyendo la porosidad y mejorando la adherencia de los agregados con cerámica [13].

Por otro lado, la reacción ante la fisuración y la resistencia a tracción también podrían verse alteradas. Según algunos estudios, el polvo de cerámica tiene la capacidad de disminuir la resistencia a tracción indirecta por las características quebradizas de las partículas cerámicas, lo cual puede dar lugar a zonas vulnerables en el material [12]. No obstante, esta reducción tiene la posibilidad de ser rectificada con el empleo de refuerzos suplementarios, como fibras sintéticas o naturales, que mejoran la conducta después de la fisuración del concreto.

A pesar de los avances que se han visto en la resistencia a compresión, es relevante subrayar que el empleo del polvo de cerámica tiene limitaciones. La fluctuación en las propiedades del polvo, que puede variar de acuerdo con el tipo de desecho cerámico empleado, su tratamiento anterior y las condiciones de molienda, es la mayor inquietud. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis detallado de las características del polvo de cerámica antes de su inclusión en la mezcla, para garantizar su eficacia como sustituto de los agregados finos [14].

En las últimas dos décadas, ha aumentado en gran volumen el uso de cerámica en las construcciones, que es un material utilizado en la decoración de pisos y paredes, entre otros. La cerámica se comercializa en función del color, modelo que requiera el cliente, lo cual es relevante porque esta alta variabilidad estética incrementa la diversidad de productos fabricados, lo que a su vez puede generar mayores residuos por recortes, piezas defectuosas o cambios de diseño en obra y en producción, según un estudio realizado por Ceramica World Review, la producción a nivel mundial de baldosas cerámicas fue de aproximadamente 13.550 millones de metros cuadrados en 2017, siendo China e India los países que producen la mayor cantidad de este material [15].

2.4 El hormigón reforzado con fibras

El hormigón reforzado con fibras se constituye como un hormigón de alto desempeño donde la inclusión de fibras cortas distribuidas de diferente manera contribuye a propiedades importantes como control de formación de fisuras [16].

El uso del hormigón reforzado con fibras en la industria de la construcción tiene su origen desde los años 70. La construcción de contrapisos de pisos industriales constituye una de las aplicaciones tradicionales e importantes de este material donde la adición de fibras contribuye en el espaciamiento de juntas, disminución de espesores, la construcción sobre sustratos de menor calidad y la probabilidad de reemplazar las barras de acero convencionales. Se logra una optimización de recursos como en el ámbito económico, simplificación de mantenimiento y reparación, prolongación de duración, promoviendo un uso más eficiente de estos recursos naturales [16].

Las fibras naturales normalmente usadas son de coco, caña de azúcar, bambú, etc. Los diámetros de las fibras varían entre 0.5 y 0.2 mm, teniendo una absorción normalmente mayor al 12%. La alta capacidad de absorción afecta directamente en el comportamiento del hormigón, ya que puede reducir la trabajabilidad de la mezcla debido a la mayor demanda de agua. Sin embargo, en porcentajes controlados, las fibras naturales contribuyen al control de fisuración, mejoran la tenacidad y aumentan la capacidad de absorción del hormigón, especialmente frente a esfuerzos de tracción y flexión [16].

CAPITULO III. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Hormigón reciclado

Hormigón que incluye agregados reciclados obtenidos a partir de la trituración y procesamiento de hormigón endurecido proveniente de demoliciones o residuos de construcción, los cuales pueden sustituir parcial o totalmente a los agregados naturales [17].

3.2 Fibras en el hormigón

Las fibras son materiales extensos y no continuos que se añaden al hormigón con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico y la durabilidad del hormigón. Su inclusión permite controlar el aumento de fisuras, aumentar la tenacidad y mejorar la resistencia, actuando como un refuerzo distribuido en todo el volumen del material [18].

De acuerdo con su origen, las fibras empleadas en hormigón pueden clasificarse principalmente en fibras sintéticas y fibras naturales.

3.3 Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas son aquellas fabricadas a partir de polímeros industriales, siendo las más utilizadas las fibras de polipropileno, polietileno y nylon. Estas fibras son compatibles con el cemento, ya que tienen una densidad reducida, una elevada estabilidad frente a ambientes alcalinos y una gran resistencia química [19].

Las fibras sintéticas contribuyen a controlar la fisuración plástica y térmica por retracción en el hormigón. Esto mejora la cohesión de la mezcla en estado fresco y reduce el surgimiento de micro fisuras a edades tempranas. Esto, en comparación con otras clases de refuerzo, su aporte a la resistencia mecánica final suele ser limitado. Por eso, se utiliza para mejorar el comportamiento ante fisuras más que para aumentar la resistencia de manera directa.

3.4 Fibras naturales

Las fibras naturales provienen de vegetales, animales o minerales y han ganado interés en los últimos años debido a su bajo impacto ambiental y posibilidad de reutilización. Entre ellas destacan fibras vegetales como coco, bagazo de caña, cáscaras y fibras derivadas de residuos alimentarios, las cuales representan una alternativa sostenible para el refuerzo del hormigón [20].

En particular, las fibras provenientes de sobras de alimentos, como cáscaras de frutas, fibras de frutas, han sido analizadas por su capacidad para mejorar la resistencia a la fisuración y la absorción de energía del hormigón. El uso de fibras naturales presenta problemas, como su alta absorción de agua por lo que estudios recomiendan la aplicación de tratamientos físicos o químicos para mejorar su durabilidad y unión con el cemento. Aun así, su aprovechamiento a partir de residuos alimentarios contribuye a la economía circular y a la reducción de impactos ambientales asociados a la disposición de desechos orgánicos [20].

3.5 Polvo de cerámica

Material obtenido mediante la trituración de residuos cerámicos, utilizado en el hormigón como sustituto parcial del agregado fino. Su inclusión permite aprovechar desechos de construcción y contribuir a la elaboración de mezclas más sostenibles [4].

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación se realiza en campo y es de alcance explicativo, ya que se basa en la obtención de datos con la elaboración y ensayo de probetas en laboratorio, utilizando fibras de coco y polvo de cerámica. Con la facilidad de trabajar con muestras físicas, analizando sus características se puede examinar los resultados al tener diferentes composiciones entre los materiales.

4.2 Enfoque

La presente investigación experimental tiene un enfoque cuantitativo ya que permite la recopilación y análisis de datos requeridos para determinar las propiedades mecánicas del hormigón elaborado con fibras de coco y polvo de cerámica.

Este análisis permite evaluar resultados y realizar una comparación de estos entre las distintas proporciones, con el objetivo de identificar la dosificación óptima a partir del comportamiento del material sometido a ensayos como es el de compresión.

4.3 Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación es de tipo explicativo ya que busca analizar las propiedades mecánicas del hormigón reciclado, centrándose en analizar dosificaciones óptimas, y escoger la mejor mediante el análisis de agregado grueso, agregado fino, fibras de coco y polvo de cerámica. El objetivo es determinar el comportamiento del material obtenido con base a resultados obtenidos, comprendiendo que combinaciones son más eficientes y los motivos de su funcionalidad.

Se presenta en la Fig. 1, la metodología usada en la investigación.

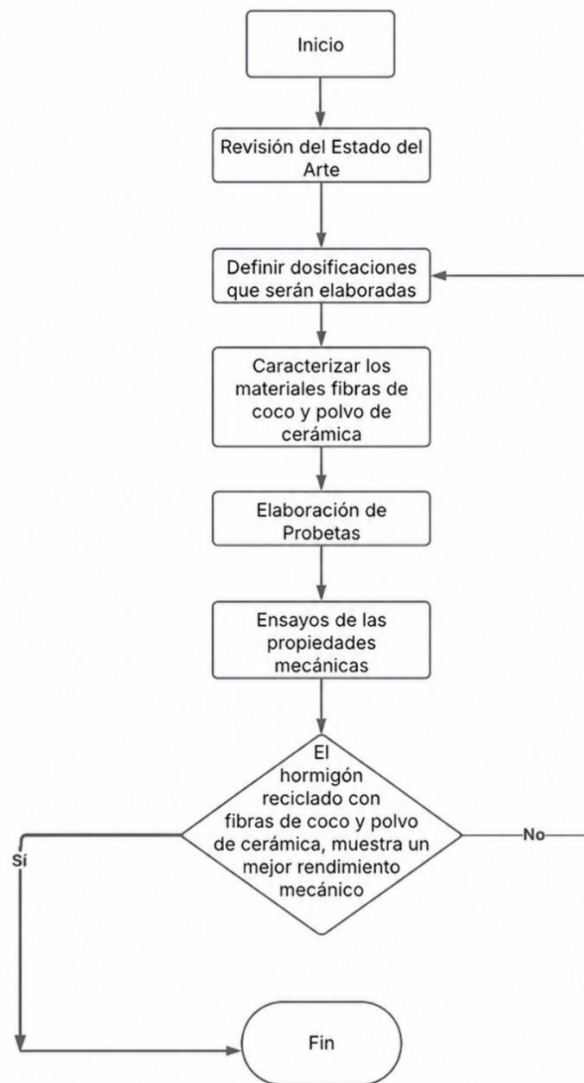


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología.

4.4 Población

La población de esta investigación son todas las probetas de hormigón elaboradas, tanto las probetas patrón como las que incluyen el polvo de cerámica y fibras de coco. Se fabricaron cilindros para cada dosificación en las diferentes etapas y fueron sometidos a ensayos de resistencia a los 3,7,14,21 y 28 días.

Para identificar de mejor manera las probetas elaboradas durante la investigación, se realiza una codificación que se presenta en la Tabla 1, la cual facilita la identificación de cada dosificación realizada, considerando los porcentajes de polvo de cerámica, fibra de coco y la fase que corresponde. Todas las mezclas fueron diseñadas para una resistencia a compresión de 24 MPa, utilizando como referencia un hormigón obtenido mediante el proceso de diseño adoptado para el estudio.

Tabla 1

Codificación de dosificaciones propuestas

Abreviatura	Descripción
HP	Hormigón patrón diseñado para 24 MPa
PC	Polvo de cerámica
FC	Fibra de coco
F1-F5	Fase experimental
C	Ensayo de compresión
T	Ensayo de tracción indirecta
FL	Ensayo de flexión

4.4.1 Fase 1

La población experimental de esta fase son 12 probetas, utilizadas para la evaluación de la resistencia a compresión a los 7 días de curado. En la Tabla 2 se presenta la codificación establecida, la descripción de cada dosificación y la cantidad de probetas fabricadas para esta etapa. Es necesario tener en cuenta que todas las probetas que se realizan para los ensayos a compresión fueron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, para los ensayos a tracción indirecta se usaron cilindros de 15 cm x 30 cm; y para los ensayos a flexión se ocuparon vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.

En esta fase se trabajó con un porcentaje de reemplazo para la fibra de coco hasta el 1.5% y para el polvo de cerámica hasta el 20%, la dosificación (PC12-FC1-F1) que se presenta en la Tabla 2 fue asignada a partir de la comparación de los estudios bibliográficos, en los cuales se analizaron diferentes porcentajes de reemplazo y adición de estos materiales. Considerando los rangos más utilizados en estudios previos, se seleccionó una dosificación intermedia que permitiera obtener una mezcla representativa para evaluar el comportamiento mecánico del hormigón.

Tabla 2

Dosificaciones para elaboración de probetas de fase 1

Código	Descripción	Cantidad de probetas
HP-F1	Hormigón patrón diseñado para 24 MPa	2
PC20-F1	Hormigón con 20% de polvo de cerámica	2
FC1.5-F1	Hormigón con 1.5% de fibra de coco	2
PC5-FC0.5-F1	Hormigón con 5% de polvo de cerámica y 0.5% de fibra de coco	2
PC12-FC1-F1	Hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco	2
PC20-FC1.5-F1	Hormigón con 20% de polvo de cerámica y 1.5% de fibra de coco	2

Una vez definidas las dosificaciones a evaluar en la fase inicial, se procede a determinar las cantidades de materiales requeridas para la elaboración de cada mezcla. En la Tabla 3 se presentan los porcentajes de sustitución de polvo de cerámica y adición de fibra de coco considerados en la investigación, así como las cantidades de agua, cemento, agregados y materiales incorporados por metro cúbico de hormigón.

Tabla 3

Porcentajes para cada dosificación con polvo de cerámica y fibra de coco por m³

% Reemplazo de polvo de cerámica	% Adición de fibra de coco	Agua (L)	Cemento (kg)	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	Polvo de cerámica (kg)	Fibra de coco (cm ³)
0	0	190	380	983.71	804.85	0	0
20	0	190	380	983.71	643.88	160.97	0
0	1.5	190	380	983.71	804.85	0	15000
5	0.5	190	380	983.71	764.61	40.24	5000
12	1	190	380	983.71	708.27	96.58	10000
20	1.5	190	380	983.71	643.88	160.97	15000

4.4.2 Fase 2

Con los resultados obtenidos en la fase anterior, se seleccionaron las dosificaciones con mejor desempeño para continuar con la evaluación experimental. En la Tabla 4 se presenta la codificación utilizada, así como las dosificaciones y cantidades de probetas consideradas para los ensayos de resistencia a compresión a los 3 días.

Tabla 4

Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 2

Código	Descripción	Cantidad de probetas
HP-F2	Hormigón patrón diseñado para 24 MPa	2
PC5-FC0.5-F2	Hormigón con 5% de polvo de cerámica y 0.5% de fibra de coco	2
PC12-FC1-F2	Hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco	2

4.4.3 Fase 3

La población experimental de esta fase al igual que la fase 2, son 6 cilindros de hormigón, fabricados para evaluar la resistencia a compresión para 7 días con los mismos porcentajes de reemplazo y adición que se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 3

Código	Descripción	Cantidad de probetas
HP-F3	Hormigón patrón diseñado para 24 MPa	2
PC5-FC0.5-F3	Hormigón con 5% de polvo de cerámica y 0.5% de fibra de coco	2
PC12-FC1-F3	Hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco	2

4.4.4 Fase 4

Se elaboraron las probetas necesarias para evaluar la resistencia a compresión a los 14 días. La Tabla 6 presenta la codificación y cantidad de probetas realizadas en esta fase.

Tabla 6

Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 4

Código	Descripción	Cantidad de probetas
PC12-FC1-F4	Hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco	2

4.4.5 Fase 5

Finalmente, en la fase 5 se elaboraron las probetas correspondientes a la dosificación seleccionada, para analizar resistencias a 28 días mediante ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión. En la Tabla 7 se presenta la codificación empleada, el tipo de probeta y la cantidad para cada ensayo.

Tabla 7

Dosificaciones para elaboración de probetas para la fase 5

Código	Descripción	Cantidad
PC12-FC1-C	Hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco para compresión a 28 días	2
PC12-FC1-T	Hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco para tracción a 28 días	2
PC12-FC1-FL	Vigas de hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco para flexión a 28 días	2

4.5 Procesamiento y análisis

4.5.1 Materiales

4.5.1.1 Agregado fino y grueso

El agregado fino se obtuvo de la mina "Cerro Negro" en la ciudad de Riobamba. De igual manera, el agregado grueso se obtuvo de la misma mina que es un ripio triturado de 3/4".

Para la elaboración del hormigón no se tomaron en cuenta partículas mayores a 3/4” para así asegurar un material representativo en cada dosificación.

4.5.1.2 Cemento

En esta investigación se utilizó el Cemento de Alta Resistencia Inicial (Tipo HE). Según el fabricante, este material cumple con la norma NTE INEN 2380 para cementos Portland.

4.5.1.3 Polvo de cerámica

El polvo de cerámica utilizado en la investigación fue obtenido a partir de residuos cerámicos reciclados provenientes de materiales descartados y sobrantes de obras de construcción, los cuales ya no servían para su uso original.

Inicialmente, los residuos cerámicos fueron seleccionados y limpiados para eliminar impurezas superficiales. Se llevo a cabo un proceso de trituración manual para obtener partículas más pequeñas ver Anexo 4.

El material triturado se tamiza de acuerdo con la norma ASTM C136, seleccionando la fracción que atraviesa el tamiz número 200 y que fue vista como polvo de cerámica para sustituir parcialmente el agregado fino.

Para la elaboración de probetas, se incorporó polvo de cerámica en la mezcla de concreto reemplazando parcialmente el agregado fino según su peso, usando diversos porcentajes.

4.5.1.4 Fibra de coco

Una vez adquiridos los cocos, se los somete al tratamiento y acondicionamiento de la fibra de coco (véase Anexo 3) siguiendo el procedimiento que se presenta a continuación:

1. Se realizó la selección de 10 cocos, verificando que se encontraron en buen estado, que no contenga fisuras o daños que puedan afectar la calidad de las fibras que se van a obtener.
2. Los cocos seleccionados en el paso 1, fueron lavados con agua normal para eliminar impurezas.
3. Se procedió al corte y separación de la cáscara, obteniéndose únicamente las fibras de coco.
4. Las fibras extraídas fueron sumergidas en agua con cal, con una concentración de 10 g/L, durante un período de 48 horas, para así reducir su capacidad de absorción durante la elaboración de las probetas de hormigón.
5. Las fibras fueron enjuagadas tres veces con agua limpia, con el fin de remover los residuos de cal presentes en su superficie.
6. Las fibras se secaron a temperatura ambiente durante 24 horas.
7. Por último, las fibras secas fueron cortadas manualmente con tijeras hasta alcanzar una longitud aproximada de 2 cm.

4.5.1.5 Agua

El agua utilizada de acuerdo con las dosificaciones obtenidas a través de cálculos según la norma se obtuvo de la red de distribución, siendo agua potable que cumple con los requisitos de la norma NTE INEN 1108.

4.6 Diseño experimental

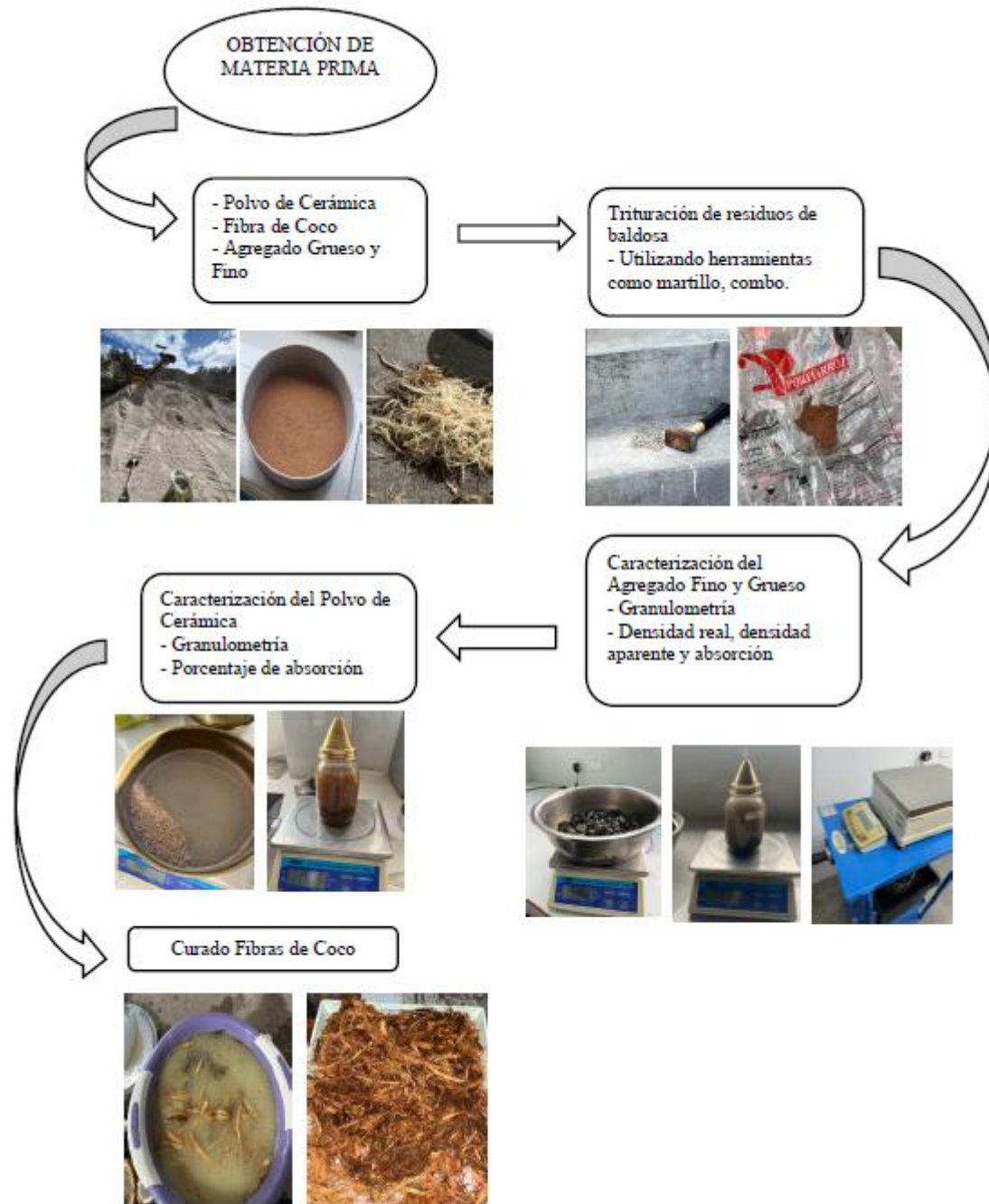


Fig. 2. Diagrama de la primera fase del diseño experimental.

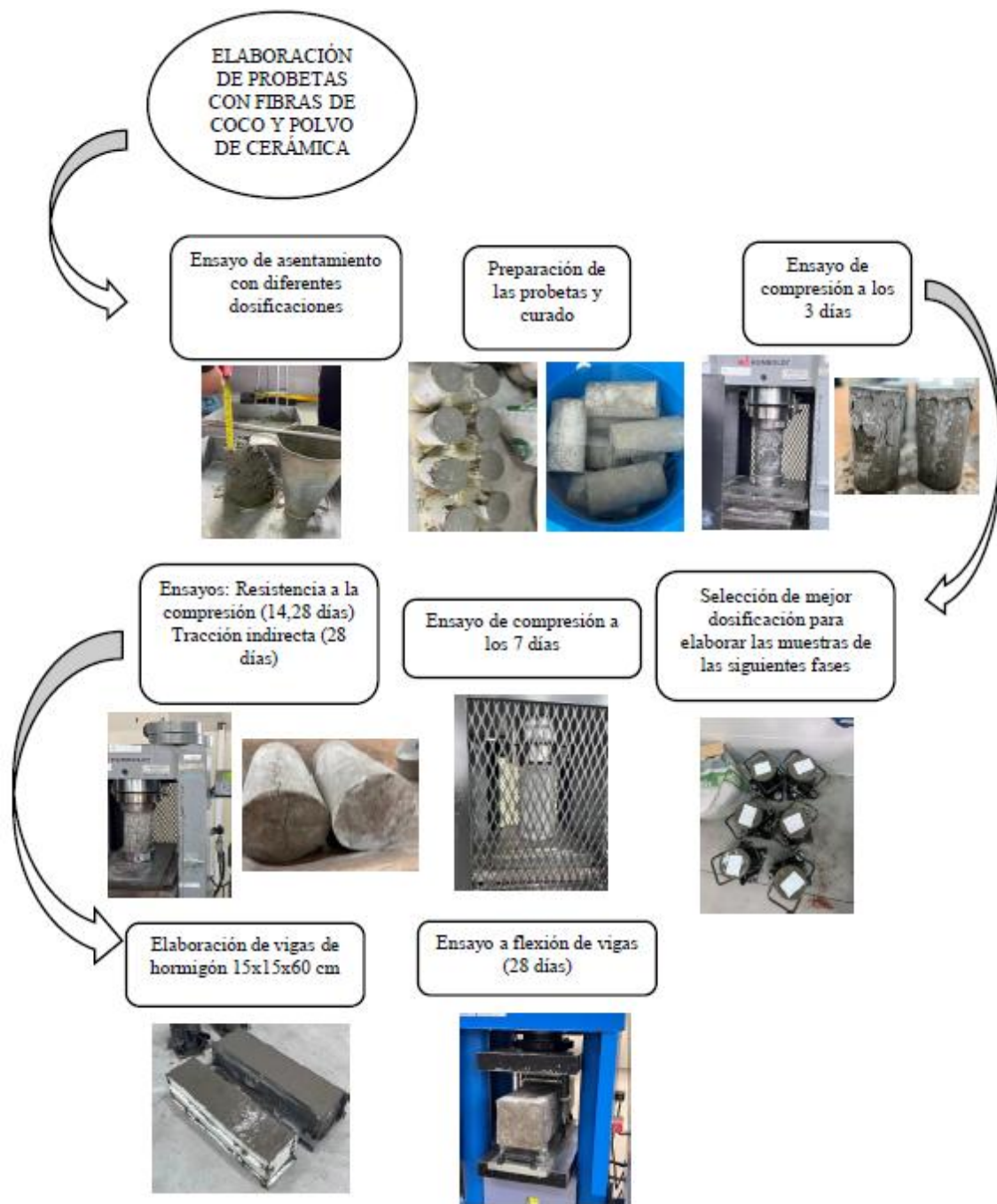


Fig. 3. Diagrama de la segunda fase del diseño experimental.

4.7 Ensayos realizados

Se detalla en la Tabla 8, los ensayos que fueron realizados para cada agregado.

Tabla 8
ensayos realizados

	Ensayos	Normas
Agregado Fino		
Agregado Grueso	Granulometría	ASTM C136 / C136M
Polvo de Cerámica		
Agregado Grueso	Densidades y Absorción	ASTM C127
Agregado Fino		ASTM C128
Polvo de Cerámica		ASTM C128
Mezcla de Hormigón	Revenimiento del hormigón (Asentamiento)	ASTM C143
Probetas Patrón	Resistencia a compresión	ASTM C39
Probetas con Inclusión de Polvo de Cerámica y Fibras de Coco	Resistencia a compresión	ASTM C39, NTE INEN
Probetas con Inclusión de Polvo de Cerámica y Fibras de Coco	Resistencia a tracción indirecta (Ensayo brasileño)	NTE INEN 2648
Vigas de hormigón	Resistencia a flexión	ASTM C78

4.7.1 Granulometría de agregado fino y agregado grueso

Procedimiento:

- 1) Secar el material en el horno.
- 2) Tamizado: Utilizar una serie de tamices tanto de serie fina como de serie gruesa.
- 3) Peso: Registrar de cada tamiz la masa que se retiene.

Cálculos:

- Porcentaje retenido acumulado:
$$\% \text{ Material retenido acumulado} = \left(\frac{\text{Material retenido acumulado}}{\text{Masa total}} \right) * 100$$

- Porcentaje pasante:

$$\% \text{ Porcentaje pasante} = 100 - \% \text{ Material retenido acumulado}$$

4.7.2 Ensayo de resistencia a compresión

Procedimiento:

- 1) Preparación: Probetas cilíndricas curadas a diferentes edades.
- 2) Carga: Aplicar carga axial constante hasta que se produzca la falla.

4.7.3 Ensayo de revenimiento

Procedimiento:

- 1) Llenado: Molde cónico (Altura 30 cm, Diámetro Inf. 20 cm, Diámetro Sup. 10 cm) en 3 capas estimando un volumen proporcional en cada una, compactando cada una con 25 golpes.
- 2) Medición: Alzar el cono en un tiempo aproximado de 3 segundos y medir la diferencia de altura entre el molde y el hormigón.

4.7.4 Densidad y absorción de agregado grueso

Procedimiento:

Saturación: Dejar sumergido el material durante 24 horas.

Pesado:

- (A) Masa seca (g).
- (B) Masa saturada superficialmente seca del agregado (g).
- (C) Masa sumergida (g).

Fórmulas:

- Densidad aparente seca

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{A}{B - C}$$

- Densidad real (SSS)

$$\rho_{\text{real}} = \frac{B}{B - C}$$

- Capacidad de absorción

$$\text{Capacidad de absorción} = \left(\frac{B - A}{A} \right) * 100$$

4.7.5 Densidad y absorción de agregado fino

Procedimiento:

Pesado:

- (A) Masa seca (g).
- (B) Masa del picnómetro más agua (g).
- (C) Masa del picnómetro más agua más agregado (g).
- (S) Masa saturada superficialmente seca del agregado (g).

Fórmulas:

- Densidad real

$$\rho_{\text{real}} = \frac{A}{B + A - C}$$

- Densidad relativa (SSS)

$$\rho_{\text{relativa}} = \frac{S}{B + S - C}$$

- Capacidad de absorción

$$\text{Capacidad de absorción} = \left(\frac{S - A}{A} \right) * 100$$

4.7.6 Densidad y absorción de polvo de cerámica

Procedimiento:

Pesado:

- (A) Masa seca (g).
- (B) Masa del picnómetro más agua (g).
- (C) Masa del picnómetro más agua más agregado (g).
- (S) Masa saturada superficialmente seca del agregado (g).

Fórmulas:

- Densidad real

$$\rho_{\text{real}} = \frac{A}{B + A - C}$$

- Densidad relativa (SSS)

$$\rho_{\text{relativa}} = \frac{S}{B + S - C}$$

- Capacidad de absorción

$$\text{Capacidad de absorción} = \left(\frac{S - A}{A} \right) * 100$$

4.7.7 Resistencia a tracción indirecta o ensayo brasileño

Procedimiento:

Preparación: Se utilizan cilindros de hormigón una vez curados.

Colocación: El cilindro a ser ensayado se dispone de forma horizontal entre las placas de carga de la máquina.

Resistencia: Se aplica una carga constante y uniforme a una cierta velocidad, hasta que se produce la falla de la probeta, generalmente por una fisura vertical.

Fórmula:

$$T = \frac{2 * P}{\pi * L * D} \text{ (MPa)}$$

T = resistencia a tracción indirecta (MPa)

P = carga máxima (N)

L = longitud de la probeta (mm)

D = diámetro de la probeta (mm)

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Revisión de la Bibliografía

La revisión de la bibliografía permite analizar que la incorporación de fibra de coco y polvo de cerámica en el hormigón, en cuanto a la resistencia mecánica está directamente afectada por el porcentaje de sustitución y adición de materiales reciclados. Estudios dicen que porcentajes moderados de sustitución (entre 5% y 15%) mantienen o incluso mejoran la resistencia a compresión, mientras que reemplazos mayores pueden generar reducciones en el desempeño mecánico [13], [21].

La Tabla 9 presenta un resumen de los estudios analizados en la revisión bibliográfica, agrupados según el material empleado, el número de investigaciones identificadas y los rangos de dosificación reportados, esta forma de análisis permite establecer los porcentajes de inclusión más utilizados para el polvo de cerámica y las fibras de coco en el hormigón, para así realizar la selección de las dosificaciones evaluadas en la presente investigación.

Tabla 9

Resumen de los estudios analizados en la revisión bibliográfica

Material	Número de estudios analizados	Porcentajes de adición o reemplazo
Fibra de coco	11	0.5% - 2% (Incorporación respecto al volumen del hormigón)
Polvo de cerámica	7	5% - 30% (Reemplazo agregado fino)
Fibra de coco y polvo de cerámica	0	No se encontraron estudios

La revisión bibliográfica permite identificar investigaciones relacionadas con la adición de materiales reciclados y naturales en mezclas de hormigón. Se revisan 18 documentos, entre los cuales se incluían estudios, artículos y tesis. De estos, 11 se centraron en la utilización de fibra de coco como material de refuerzo y 7 más en el uso de polvo cerámico para sustituir parcialmente el agregado fino.

Los estudios revisados indican que el modo de dosificación y la clase de material agregado son variables claves en la conducta mecánica del hormigón. De acuerdo con investigaciones coincidentes, si se conservan porcentajes apropiados de reemplazo o adición, la incorporación de materiales alternativos puede mejorar ciertos atributos. La literatura empleada reporta que tanto las fibras naturales como los residuos cerámicos poseen características que pueden contribuir al desempeño del hormigón cuando son empleados de manera controlada [4], [10].

Respecto a las fibras de coco, la mayor parte de las investigaciones analizadas se enfocan en evaluar su influencia sobre la resistencia a compresión. Se indica que la fibra de

coco favorece el control de grietas y mejora la capacidad de absorción de energía del material, debido al efecto de puenteo que ejercen las fibras dentro de la matriz cementicia. Sin embargo, varios autores señalan que una gran cantidad de fibra pueden reducir la trabajabilidad de la mezcla y generar dificultades en la compactación, afectando negativamente algunas propiedades mecánicas [13], [19].

Por otra parte, las investigaciones relacionadas con el polvo de cerámica se basan principalmente para ser utilizado como sustituto parcial del agregado fino. Se evidencia que este material posee propiedades físicas y químicas que permiten su incorporación en mezclas de hormigón sin afectar su desempeño cuando se emplean porcentajes moderados. Algunos autores reportan incluso mejoras en la resistencia a compresión debido al efecto de relleno y a la posible actividad puzolánica que presentan las partículas cerámicas finamente molidas, contribuyendo a la densificación de la matriz cementicia y a una mejor adherencia entre sus componentes [5], [13].

Se observó un bajo número de investigaciones que incluyan la fibra de coco y polvo de cerámica dentro de una misma mezcla de hormigón. La mayoría de los estudios analizan solamente uno de los materiales, enfocándose en determinar sus porcentajes óptimos de utilización y su influencia sobre propiedades específicas del hormigón. Esta situación dificulta conocer realmente el comportamiento que podría generarse al combinar ambos recursos en una sola dosificación.

En consecuencia, se desconoce como la unión de fibra de coco y el polvo de cerámica afecta a las propiedades mecánicas del hormigón. Considerando que los dos materiales presentan una actuación diferente, es necesario evaluar experimentalmente su comportamiento combinado. Por eso, la presente investigación busca aportar información que permita comprender la respuesta mecánica del hormigón elaborado con la incorporación de estos materiales.

5.2 Toma de decisiones

5.2.1 Estudios bibliográficos sobre las fibras de coco en el hormigón

Para la toma de decisiones es necesario realizar un amplio estudio bibliográfico (véase Anexo), para la fibra de coco se analizaron 11 estudios, en la Tabla 10 se indican los resultados que se obtuvieron en cada estudio.

Tabla 10

Matriz de estudios bibliográficos sobre las fibras de coco en el hormigón

N° y ref.	Resistencia		
	Compresión	Flexión	Características
1 [23]	A los 28 días: 205.73 kg/cm2.	No se realizó este ensayo.	Longitud de 2 a 5 cm, no se especifica el diámetro.
2 [27]	Para porcentajes de fibra de coco 0 %, 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % se obtuvieron valores de compresión: 218.33, 230.67, 248.60, 273.50, 249.17 kg/cm2 respectivamente.	Las resistencias a la flexión para esas mismas mezclas fueron: 50.19, 51.49, 52.77, 55.20, 52.77 kg/cm2 respectivamente.	Longitud de 15 cm, no se especifica el diámetro.
3 [20]	Hormigón 21 MPa 0% de fibra 26.98 MPa, 2% de fibra 24.71 MPa, 4% de fibra 23 MPa. Hormigón 240 0% de fibra 31.02 MPa, 2% de fibra 28.99 MPa, 4% de fibra 26.48 MPa.	Hormigón 21 MPa 0% de fibra 4.48 MPa, 2% de fibra 4.96 MPa, 4% de fibra 4.65 MPa. Hormigón 240 0% de fibra 4.79 MPa, 2% de fibra 4.98 MPa, 4% de fibra 4.81 MPa.	1.5 in de longitud y 0.83 mm de diámetro.
4 [18]	Convencional 275 kg/cm2; con 0.5 % fibra: 269.33; 0.7 %: 248.00; 0.9 %: 233.67 kg/cm2 (28 días).	Para 0.9 % de fibra se obtiene 43.78 kg/cm2 a los 28 días.	No se obtuvieron datos.
5 [29]	Sin mufla 29.79 MPa, con mufla 20,44 MPa, con fibras del coco al 10% 15.32 MPa, 20% 10.26 MPa.	No se realizó este ensayo.	Longitud de 10 cm, no se especifica el diámetro.
6 [11]	Aumento del 0.5%.	No se realizó este ensayo.	0.1 a 0.5 mm.
7 [19]	Hormigón 210 kg/cm2 ensayos a 7 días resistencia probeta 1: 147.74 kg/cm2, resistencia probeta 2: 177.35 kg/cm2. Hormigón 210 kg/cm2 ensayos a 14 días resistencia probeta 1: 191.35 kg/cm2, resistencia probeta 2: 196.39 kg/cm2. Hormigón 210 kg/cm2 ensayos a 28 días resistencia probeta 1: 236.54 kg/cm2, resistencia probeta 2: 236.94 kg/cm2.	No se realizó este ensayo.	Longitud que va de 15 a 30 cm y un diámetro que va de 0.1 y 0.5 milímetros.

		Ensayos a 14 días.	
	Ensayos a 14 días.	Hormigón 210 kg/cm ² con fibra	
	Hormigón 210 kg/cm ² con fibra al	al 0.5 % resistencia 16.79	
	0.5 % resistencia 152.66 kg/cm ² ,	kg/cm ² , con fibra al 1.5 %	
	con fibra al 1.5 % resistencia 173.71	resistencia 20.84 kg/cm ² , fibra al	
	kg/cm ² , fibra al 2 % resistencia	2 % resistencia 12.12 kg/cm ² .	
	134.65 kg/cm ² .	Hormigón 270 kg/cm ² con fibra	
	Hormigón 270 kg/cm ² con fibra al	al 0.5 % resistencia 19.36	
	0.5 % resistencia 193.56 kg/cm ² ,	kg/cm ² , con fibra al 1.5 %	
	con fibra al 1.5 % resistencia 205.21	resistencia 26.68 kg/cm ² , con	
	kg/cm ² , con fibra al 2% resistencia	fibra al 2% resistencia 16.18	
	179.77 kg/cm ² .	kg/cm ² .	
	Hormigón 350 kg/cm ² con fibra al	Hormigón 350 kg/cm ² con fibra	
	0.5 % resistencia 245.88 kg/cm ² ,	al 0.5 % resistencia 27.05	
	con fibra al 1.5 % resistencia 254.08	kg/cm ² , con fibra al 1.5 %	
	kg/cm ² , con fibra al 2 % resistencia	resistencia 31.76 kg/cm ² , con	
	236.90 kg/cm ² .	fibra al 2 % resistencia 20.85	
		kg/cm ² .	
8	Ensayos a 28 días.	Ensayos a 28 días.	
[21]	Hormigón 210 kg/cm ² con fibra al	Hormigón 210 kg/cm ² con fibra	1.5 cm
	0.5 % resistencia 218.09 kg/cm ² ,	al 0.5 % resistencia 23.99	
	con fibra al 1.5 % resistencia 248.15	kg/cm ² , con fibra al 1.5 %	
	kg/cm ² , fibra al 2 % resistencia	resistencia 29.78 kg/cm ² , fibra al	
	192.36 kg/cm ² .	2 % resistencia 17.31 kg/cm ² .	
	Hormigón 270 kg/cm ² con fibra al	Hormigón 270 kg/cm ² con fibra	
	0.5 % resistencia 276.52 kg/cm ² ,	al 0.5 % resistencia 27.65	
	con fibra al 1.5 % resistencia 293.16	kg/cm ² , con fibra al 1.5 %	
	kg/cm ² , con fibra al 2% resistencia	resistencia 38.11 kg/cm ² , con	
	246.82 kg/cm ² .	fibra al 2% resistencia 23.11	
	Hormigón 350 kg/cm ² con fibra al	kg/cm ² .	
	0.5 % resistencia 351.25 kg/cm ² ,	Hormigón 350 kg/cm ² con fibra	
	con fibra al 1.5 % resistencia 362.97	al 0.5 % resistencia 38.64	
	kg/cm ² , con fibra al 2 % resistencia	kg/cm ² , con fibra al 1.5 %	
	338.43 kg/cm ² .	resistencia 45.37 kg/cm ² , con	
		fibra al 2 % resistencia 29.78	
		kg/cm ² .	

9	Hormigón ensayo 7 días 0% fibra: 11.23 kN, 0.5% fibra: 10.16 kN, 1% fibra: 11.26 kN, 1.5% fibra: 12.76 kN.	Hormigón ensayo 7 días: 0% fibra 2 kN, 0.5% fibra: 1.9 kN, 1% fibra: 2.2 kN, 1.5% fibra: 2.2 kN.	6 cm
[10]	Hormigón ensayo 28 días 0% fibra: 21.20 kN, 0.5% fibra: 17.30 kN, 1% fibra: 19.50 kN, 1.5% fibra: 21.73 kN.	Hormigón ensayo 28 días 0% fibra: 3.40 kN, 0.5% fibra: 3.30 kN, 1% fibra: 3.73 kN, 1.5% fibra: 3.74 kN.	
10	29.8 N/mm2, 25.4 N/mm2, 20.9 N/mm2.	No se realizó este ensayo.	1.25, 2.5 y 5 cm de longitud.
[14]			
11	Incremento del 10% con 1 % de fibras y 5% con el 0.5 % de fibras de coco.	Incremento en un 15% con 10% de fibras de coco.	No se especifica.
[24]			

La alternativa 8 del estudio [21], correspondiente a un contenido de fibra de coco cercano al 1%, presentó el comportamiento más favorable entre las dosificaciones analizadas. Los resultados evidencian que este porcentaje permite obtener mejoras en las propiedades del hormigón, destacándose frente a otras alternativas con menores o mayores contenidos de fibra.

En el estudio de Lara [21], se evaluó experimentalmente el comportamiento de hormigones con fibra de estopa de coco en un rango de 0.5% a 2% del volumen total de mezcla, encontrando que el incremento proporcional de la resistencia a compresión y flexión se estabiliza en relación la cantidad de fibra incluida, mientras que porcentajes superiores tienden a disminuir la trabajabilidad y generar vacíos por mala compactación.

Estos resultados se relacionan con los datos experimentales, en los que las mezclas con porcentajes superiores a 1% presentaron disminuciones en la resistencia a compresión debido a problemas de distribución de las fibras y menor densificación de la mezcla, lo que comprueba la selección de esta alternativa, ya que corresponde a un contenido de fibra controlado que mostró un desempeño favorable en los estudios analizados.

5.2.2 Estudios bibliográficos del polvo de cerámica en el hormigón

De igual forma, para el polvo de cerámica se analizaron 7 estudios (véase Anexo), en la Tabla 11 se presentan los resultados que se obtuvieron en cada estudio.

Tabla 11

Matriz de estudios bibliográficos sobre el polvo de cerámica en el hormigón

N° y ref.	Resistencia	
	Compresión	Flexión
1 [28]	La resistencia a compresión con agregado cerámico completo disminuye 70% respecto al hormigón convencional. 0% a los 7 días 49 MPa y a los 28 días 66 MPa, 10% a los 7 días 45 MPa y a los 28 días 65 MPa, 20% a los 7 días 40 MPa y a los 28 días 59 MPa, 30% a los 7 días 38 MPa y a los 28 días 56 MPa, 40 % a los 7 días 27 MPa y a los 28 días 46 MPa.	La resistencia a flexión disminuye 44% respecto al convencional. 0% a los 7 días 7 MPa y a los 28 días 8.6 MPa, 10% a los 7 días 7 MPa y a los 28 días 8.9 MPa, 20% a los 7 días 6.8 MPa y a los 28 días 8.6 MPa, 30% a los 7 días 5.6 MPa y a los 28 días 7.1 MPa, 40 % a los 7 días 5.1 MPa y a los 28 días 6.9 MPa.
3 [17]	Los resultados mostraron que la trabajabilidad no se ve comprometida hasta el 1.9% de adición; sin embargo, a 2.9% disminuye la resistencia a la compresión.	No se realizó este ensayo.
4 [25]	Se determinó que la resistencia a compresión experimenta incremento a medida que aumentan las dosificaciones de residuos de cerámica y porcelanato, demostrando un comportamiento directamente proporcional.	No se realizó este ensayo.
5 [30]	0 % 7 días 20.40 N/mm ² y 28 días 32.55 N/mm ² ; 5 % 7 días 16.24 N/mm ² y 28 días 28.33 N/mm ² ; 10 % 7 días 17.50 N/mm ² y 28 días 29.53 N/mm ² ; 15 % 7 días 15.48 N/mm ² y 28 días 27.08 N/mm ² ; 20 % 7 días 14.36 N/mm ² y 28 días 26.11 N/mm ² .	0 % 7 días 3.87 N/mm ² y 28 días 7.5 N/mm ² ; 5 % 7 días 4.24 N/mm ² y 28 días 6.2N/mm ² ; 10 % 7 días 4.76 N/mm ² y 28 días 7 N/mm ² ; 15 % 7 días 4.33 N/mm ² y 28 días 5.1 N/mm ² ; 20 % 7 días 3.43 N/mm ² y 28 días 4.3 N/mm ² .
6 [31]	0 % 7 días 27 N/mm ² y 28 días 30 N/mm ² ; 10 % 7 días 21 N/mm ² y 28 días 28 N/mm ² ; 20 % 7 días 20 N/mm ² y 28 días 31 N/mm ² ; 30 % 7 días 28 N/mm ² y 28 días 34 N/mm ² ; 40 % 7 días 20 N/mm ² y 28 días 27 N/mm ² .	0 % 7 días 2.7 N/mm ² y 28 días 3.3 N/mm ² ; 10 % 7 días 2.9 N/mm ² y 28 días 3.2 N/mm ² ; 20 % 7 días 3 N/mm ² y 28 días 3.5 N/mm ² ; 30 % 7 días 3.1 N/mm ² y 28 días 3.8 N/mm ² ; 40 % 7 días 2.4 N/mm ² y 28 días 2.5 N/mm ² .

7 [15]	0 % de cerámica y 1.5 % fibra de vidrio a los 7 días 10.1 MPa y a los 28 días 14 MPa, 25	1.75 MPa a 7 días y 2 MPa 28 días.
	% de cerámica y 1.5 % fibra de vidrio a los 7 días 11 MPa y 28 días 15 MP, 30 % de cerámica y 1.5 % fibra de vidrio a los 7 días 11.5 MPa y a los 28 días 16 MPa.	

Se tiene que el estudio número 7 de Meena [15], que consiste en un reemplazo parcial del 20% del agregado fino por polvo de cerámica, presentó los resultados más favorables entre las dosificaciones evaluadas, evidenciando que dicho porcentaje constituye una opción para mejorar el comportamiento del hormigón sin afectar sus características generales.

El análisis de los mejores resultados se realiza tanto de fibras de coco como de polvo de cerámica, ya que no se encontraron estudios que incluyan los dos tipos de materiales.

Para la fibra de coco, según Lara [21] los mejores porcentajes para la adición de fibra de coco es 0.5%, 1.0%, 1.5%, si se trabaja con un porcentaje mayor se pierde trabajabilidad el hormigón, la resistencia a compresión comienza a disminuir y crea una mayor absorción de agua. Para el polvo de cerámica, según Johnson [22] los mejores porcentajes para el reemplazo de polvo de cerámica por agregado fino más adecuados son 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, porque si se elabora los cilindros con mayor porcentaje puede crearse un efecto puzolánico.

5.3 Obtención de materiales

Se obtuvo 150 kg de agregado fino y 150 kg de agregado grueso aproximadamente (piedra triturada de 3/4"), ambos extraídos de la mina Cerro Negro en Riobamba (véase Anexo 2). Para el polvo de cerámica se obtuvo aproximadamente 10 kg, y para las fibras de coco aproximadamente 1000 cm³ (véase Anexo 2). Todo el material se utilizó tanto como la realizar las probetas de hormigón como para la caracterización.

5.4 Caracterización del polvo de cerámica

Para elaborar las probetas, se necesita una adecuada caracterización de este material que puede usarse como material alternativo parcial o total a los agregados naturales, en este caso al agregado fino.

Los ensayos respectivos que determinan la granulometría, la densidad y la absorción, nos proporcionan el comportamiento de los materiales al momento de someterlos con agua. Estos datos son importantes para poder realizar cálculos de manera más precisa en la dosificación del hormigón y garantizar que la mezcla cumpla el asentamiento, así como la relación agua cemento.

Los resultados para las muestras de polvo de cerámica se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12

Caracterización del polvo de cerámica

	Densidad real (kg/m ³)	% Absorción
1	2561.728	20.48
2	2554.878	19.33

La densidad promedio del polvo de cerámica fue de 2558,303 kg/m³, valor que indica que este material reciclado posee una masa volumétrica elevada debido a su composición mineral y al proceso de cocción de las arcillas a grandes temperaturas, lo que le proporciona una estructura compacta y estable. Además, la densidad obtenida en la presente investigación, correspondiente a 2692.01 kg/m³, presentó un comportamiento similar al de los agregados convencionales, evidenciando que el polvo de cerámica posee características físicas adecuadas para su utilización como material de sustitución parcial en mezclas de hormigón.

La absorción promedio de 19.91% evidencia una alta capacidad de retención de agua, debido a la porosidad y rugosidad generadas tanto en la cocción como en el proceso de trituración del material, características que incrementan la absorción de agua del polvo cerámico [21]. Este porcentaje de absorción requiere una mayor demanda de agua durante el mezclado, ya que parte del agua fue absorbida por las partículas cerámicas, reduciendo la trabajabilidad de la mezcla. Por eso fue necesario incrementar el contenido de agua para obtener una consistencia adecuada.

5.5 Curva granulométrica del agregado grueso

El análisis granulométrico tiene como principal objetivo caracterizar las propiedades físicas de los agregados que formaran parte del diseño del hormigón. La granulometría es un parámetro que influye en la trabajabilidad y en la resistencia del concreto. Los resultados que se obtuvieron del ensayo de granulometría de laboratorio del agregado grueso de la cantera de Cerro Negro se observan en la Fig. 4. Para un detalle de los datos y cálculos efectuados véase Anexo 5.

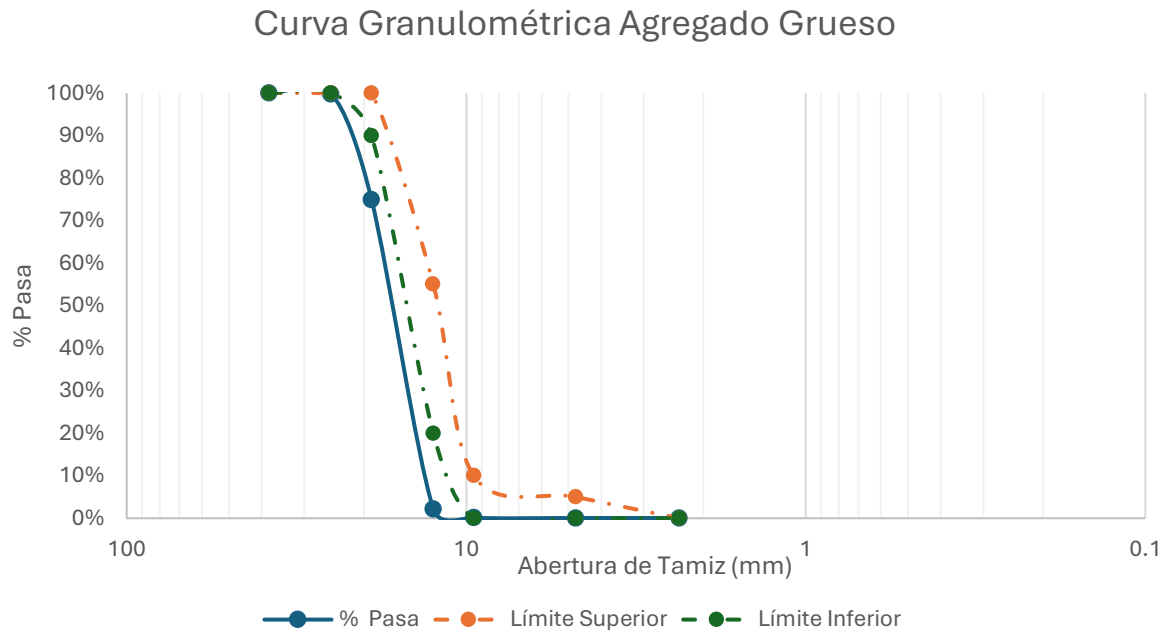


Fig. 4. Curva de granulometría del agregado grueso.

La curva de granulometría del agregado grueso presenta una variación importante entre los tamices principales, el tamiz 1/2" (12.5 mm) y 3/8" (9.5 mm), que tienen en cuenta el tamaño del agregado que se adquiere de 3/4". Esta fluctuación en la curva indica que el material no presenta una gradación continua, sino que existe una concentración de partículas dentro de un rango específico de tamaños y escasa presencia de fracciones intermedias. Es por esto, el agregado presenta un comportamiento más discontinuo, lo que puede limitar la habilidad de las partículas para organizarse de manera eficiente en la mezcla de hormigón. De acuerdo con Lara [21], la durabilidad y el comportamiento mecánico del hormigón dependen de las propiedades granulométricas del agregado grueso, ya que una gradación no uniforme puede provocar más vacíos internos y perjudicar la compactación. Coronel [20] señala que una distribución granulométrica apropiada beneficia el llenado de los espacios vacíos entre partículas, lo cual mejora la cohesión y la trabajabilidad de la mezcla.

Esta característica granulométrica puede generar una estructura interna con mayor cantidad de vacíos, razón por la que se requiere una mayor participación de la pasta cementante para rellenar estos espacios, favoreciendo así una matriz más densa y homogénea, tal como señala Zhang [13], sobre materiales reciclados incorporados en el hormigón. Por ende, aunque el agregado posee dimensiones adecuadas para su uso en hormigón, su distribución granulométrica presenta ciertas variaciones con respecto a los límites sugeridos por la normativa, lo que señala que es imprescindible realizar un control más minucioso de la dosificación para evitar impactos negativos.

5.6 Curva granulométrica del agregado fino

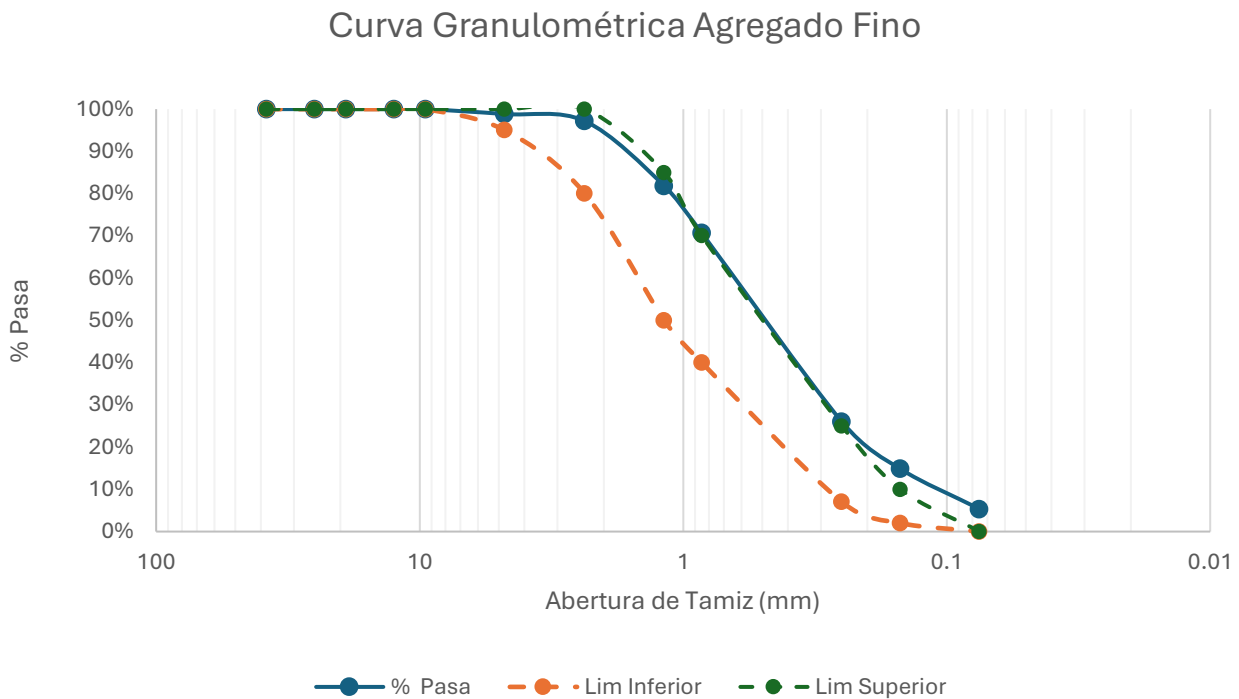


Fig. 5. Curva de granulometría del agregado fino.

La curva granulométrica del agregado fino indica ciertos cambios en la repartición de las partículas, puesto que no se ajusta por completo a todos los límites propuestos, pero sí se acerca a los rangos normativos fijados. Sin embargo, se evidencia un cambio continuo entre los distintos tamices, mostrando una adecuada proporción entre partículas gruesas, medias y finas, condición buena para lograr mezclas homogéneas y con buena compacidad. Los registros y cálculos correspondientes pueden verse en el Anexo 5.

Sin embargo, se observa que la curva se aproxima al límite superior en la fracción de tamices finos, especialmente a partir del tamiz número 20, esto indica una alta presencia de partículas finas en este material. Esto puede ayudar a la cohesión y uniformidad de la mezcla, reduciendo el riesgo de segregación durante el proceso de mezclado y colocación del hormigón. De acuerdo con Lara [21], el agregado fino cumple una función importante en el llenado de vacíos entre las partículas del agregado grueso, favoreciendo la trabajabilidad y cohesión de la mezcla, pero teniendo en cuenta que un contenido excesivo de finos también puede incrementar la demanda de agua y afectar la relación agua cemento, por lo que es importante controlar la dosificación del material para evitar alteraciones en las propiedades mecánicas del hormigón.

El agregado fino tiene un módulo de finura de 2.11, valor que lo determina como una arena fina. Este resultado coincide con la curva granulométrica obtenida, donde se comprueba una mayor proporción de partículas de menor tamaño.

5.7 Curva granulométrica del polvo de cerámica

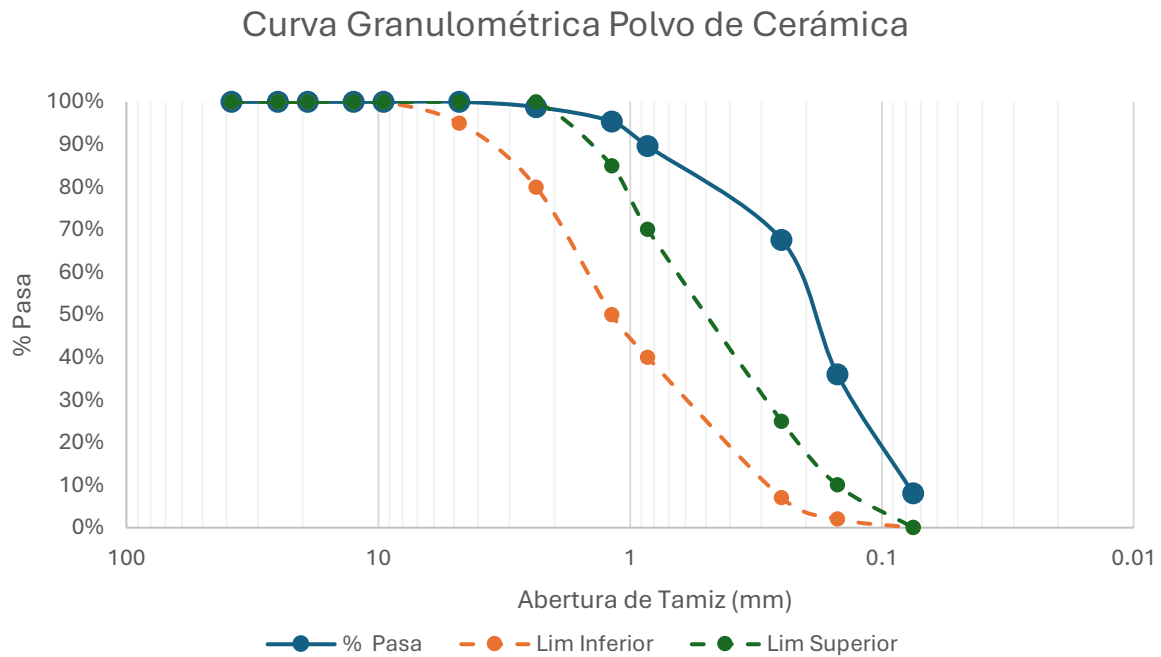


Fig. 6. Curva de granulometría del polvo de cerámica.

La curva granulométrica del polvo de cerámica presenta una distribución diferente del agregado fino, que contiene una gran concentración de partículas finas, comprobada por el elevado porcentaje de material que pasa los tamices con mayor abertura y la pronunciada disminución de la curva en los tamices más finos. Este comportamiento evidencia que la cerámica molida es pulverulenta y tiene una granulometría en la que predominan las partículas pequeñas. Para conseguir información precisa acerca de los datos y las operaciones llevadas a cabo consulte el Anexo 5

El polvo de cerámica no presenta una distribución uniforme, a diferencia del agregado fino; el material está más concentrado en las fracciones finas, especialmente en los tamices N°60, N°100 y N°200. Esta particularidad puede asociarse con el procedimiento de trituration manual, que genera partículas con formas y tamaños desiguales, lo que da lugar a una gran cantidad de finos y a una menor uniformidad granulométrica.

La finura en gran porcentaje de este material requiere una mayor demanda de agua durante el proceso de mezcla para mantener la consistencia requerida. Debido a que las partículas finas presentan una mayor capacidad de absorción de agua, incrementando la fricción interna entre los componentes de la mezcla y afectando la trabajabilidad del hormigón [12]. Este comportamiento coincide con el elevado porcentaje de absorción registrado experimentalmente para el polvo cerámico que se presentó en la Tabla 12, confirmando que se trata de un material con alta capacidad de retención de agua.

Por lo tanto, el alto contenido de finos también puede generar efectos favorables dentro de la matriz cementante. Las partículas del polvo de cerámica pueden actuar como material de relleno, ocupando los vacíos entre los agregados y contribuyendo a una mejor compactación interna del hormigón. Este comportamiento puede favorecer ciertas propiedades mecánicas y de durabilidad, siempre que el porcentaje de sustitución sea adecuado y que el contenido de agua se controle correctamente durante el diseño de mezcla. Resultados similares fueron reportados por Lara [21], donde se observó que porcentajes moderados de reemplazo con polvo cerámico mejoraron el comportamiento mecánico del hormigón debido al efecto filler y al mejor empaquetamiento de las partículas finas.

El polvo de cerámica tiene un módulo de finura de 1.13, valor significativamente inferior al del agregado fino natural, lo que comprueba la presencia predominante de partículas muy finas. Esta condición ayuda el efecto de relleno dentro de la matriz cementante, permitiendo ocupar vacíos entre los agregados y mejorar la densificación de la mezcla. Sin embargo, por la finura obtenida, al momento de realizar la mezcla puede requerir un porcentaje más de agua.

5.8 Resultados de Caracterización de los Agregados

A continuación, en la Tabla 13, se presentan los resultados que se obtuvieron de los ensayos realizados de los diferentes materiales que se utilizaron para la elaboración de los cilindros de hormigón (véase

Tabla 13

Caracterización del agregado fino y del polvo de cerámica

	Unidad	Agregado fino	Polvo de cerámica
Densidad relativa SSS	g/cm ³	2.59	2.03
Densidad real	g/cm ³	2.69	2.56
Capacidad de absorción	%	2.35	19.91

El agregado fino presentó una densidad relativa SSS de 2.59 g/cm³ y una densidad real de 2.69 g/cm³, valores que se encuentran dentro de los estándares para arenas utilizadas en la elaboración de hormigón, lo cual indica que el material posee una composición mineral adecuada y características físicas favorables para su utilización en mezclas convencionales [21]. La diferencia entre la densidad relativa SSS y la densidad real se da debido a la presencia de poros permeables en las partículas del agregado, los cuales influyen en la absorción de agua.

La capacidad de absorción del agregado fino fue de 2.35 %, valor que se encuentra dentro de los rangos para agregados finos utilizados en hormigón, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C128 y la NTE INEN 856, lo que indica una absorción moderada y una porosidad controlada.

Por su parte, el polvo de cerámica presentó una densidad relativa SSS de 2.03 g/cm³ y una densidad real de 2.56 g/cm³, valores inferiores a los obtenidos para el agregado fino natural. Esta diferencia se presenta gracias a la naturaleza del material cerámico reciclado, cuya estructura interna presenta una mayor cantidad de poros y vacíos, producto tanto del proceso de cocción de las arcillas como de la trituración del material que se lo realizó de forma manual, por eso, el polvo de cerámica es un material más liviano y con mayor porosidad en comparación con el agregado fino.

En cuanto a la capacidad de absorción, el polvo de cerámica registró un valor de 19.91%, un número superior al del agregado fino, lo cual comprueba su alta capacidad de retención de agua. Este comportamiento se atribuye a la elevada porosidad y a la gran área superficial específica generada por la finura del material triturado. Debido a esta característica, durante la elaboración de la mezcla fue necesario aumentar agua para compensar la absorción del polvo cerámico y mantener la trabajabilidad requerida.

Así es como los resultados obtenidos muestran que el polvo de cerámica posee características físicas compatibles para su incorporación parcial como reemplazo del agregado fino, aunque requiere un control más riguroso debido a su alta absorción. Este comportamiento coincide con lo reportado Correira [11] el cual indica que los residuos cerámicos presentan propiedades físicas favorables para su reutilización en hormigón, especialmente por su capacidad de actuar

como material de relleno dentro de la matriz cementante, contribuyendo a una mejor compactación de la mezcla.

En la Tabla 14 se presenta la caracterización del agregado grueso.

Tabla 14

Caracterización del agregado grueso

	Unidad	Resultado
Densidad aparente seca	g/cm ³	2.35
Densidad real SSS	g/cm ³	2.42
Capacidad de absorción	%	2.91

El agregado grueso mostró una densidad aparente seca de 2.35 g/cm³ y una densidad relativa SSS de 2.42 g/cm³, valores que se hallan dentro del rango previsto para los agregados gruesos empleados en la fabricación de hormigón. Estos valores señalan que la estructura del material es adecuada para emplearse en mezclas de concreto. La existencia de poros permeables en las partículas, que facilitan la absorción de agua cuando el agregado está en estado SSS, es la causa de la variación entre estos parámetros.

La capacidad de absorción obtenida fue de 2.91%, valor que evidencia la presencia de cierta porosidad superficial en el agregado. Aunque este porcentaje es ligeramente superior al reportado en agregados gruesos con baja absorción, sigue siendo apto para su utilización en hormigón, siempre que se realice la verificación en el contenido de agua durante el diseño de mezcla, tal como se analizó en la caracterización del polvo de cerámica y conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM C127.

Esta capacidad de absorción significa que el agregado grueso retendrá una parte del agua de amasado, lo que podría disminuir la trabajabilidad de la mezcla si no se hacen las correcciones pertinentes. No obstante, dado que es un valor manejable, el agregado puede incluirse sin inconvenientes en la elaboración de hormigón, asegurando así un rendimiento apropiado tanto en estado fresco como endurecido.

5.9 Diseño de hormigón

Se diseñó el hormigón para que tuviera una resistencia a la compresión de 24 MPa, con el fin de llevar a cabo esta investigación. El cemento utilizado fue tipo HE y la dosificación presentada en la Tabla 15 se obtuvo siguiendo el procedimiento establecido en la metodología ACI 211.1, la cual considera diferentes parámetros como las propiedades de los agregados, contenido de humedad, relación agua cemento y resultados de ensayos de laboratorio, con el fin de obtener una mezcla con adecuada trabajabilidad y buen desempeño mecánico. Se adoptó una relación agua cemento de 0.50, esta mezcla base no incorpora materiales reciclados, debido

a que fue utilizada como patrón de referencia para comparar posteriormente las mezclas elaboradas con polvo de cerámica y fibras de coco.

Tabla 15

Dosificación por m³ para un hormigón de 24 MPa

Componentes				
Agua (l)	Cemento (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Tipo de cemento
190.00	380.00	804.85	983.71	HE

5.10 Resultados de resistencia a compresión de hormigones patrones

En la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos de resistencia a compresión del hormigón patrón con sus respectivas codificaciones que representa a las edades de curado.

Tabla 16

Resultados de ensayo a compresión de los hormigones patrón.

Código	Esfuerzo promedio	Densidad promedio
	MPa	(kg/m ³)
HP-F2	6.04	2240
HP-F4	17.73	2280
HP-F5	24	2300-2400

Los resultados obtenidos a los 7 días mostraron un comportamiento conforme a lo esperado, considerando que en edades tempranas el hormigón suele desarrollar aproximadamente entre el 60% y 70% de su resistencia final a los 28 días, dependiendo de factores como el tipo de cemento, condiciones de curado y relación agua-cemento [21]. Sin embargo, a los 3 días se observan resistencias menores a las necesarias, lo que podría estar relacionado con el proceso inicial de hidratación del cemento y con el tiempo requerido para que la mezcla alcance una mayor consolidación y desarrollo de resistencia, especialmente en hormigones elaborados con relaciones agua cemento moderadas y materiales con cierta capacidad de absorción.

5.11 Resultados de resistencia a compresión

Una vez realizados los ensayos de resistencia a compresión a los 7 días, se obtuvieron los resultados correspondientes a las diferentes dosificaciones evaluadas en la Fase 1 presentadas en la Tabla 2. En la Fig. 7 se muestran las resistencias obtenidas por cada mezcla, lo cual hace posible determinar cómo afecta la incorporación de polvo de cerámica y fibra de coco al hormigón patrón. Para obtener información detallada sobre los datos y cálculos realizados, consulte el Anexo 7.

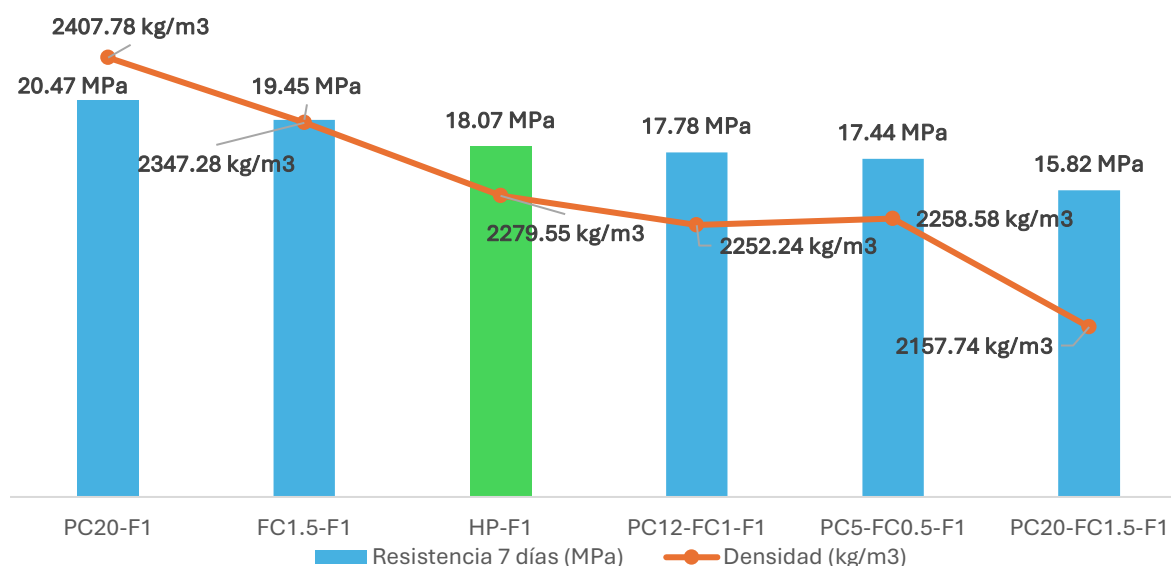


Fig. 7. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 7 días.

La Fig. 7 muestra cómo cambia la resistencia a la compresión a los siete días dependiendo de las distintas dosificaciones de fibra de coco y polvo cerámico que se añaden en la mezcla de hormigón. Al comparar los resultados con la mezcla patrón, se nota que algunas combinaciones incrementaron la resistencia inicial y otras la disminuyen. La mezcla que incluía un 20% de polvo de cerámica sin fibra de coco alcanzó la resistencia máxima, que fue 20.24 MPa, lo cual es más que la resistencia del hormigón patrón, que era de 18.07 MPa. Esta conducta podría estar relacionada con el efecto de relleno que produce el polvo cerámico en la matriz, ya que mejora la compactación y reduce los espacios vacíos en el material. Este fenómeno coincide con lo planteado por Chalan [25], quien sostiene que el polvo de cerámica actúa como un material de relleno que mejora la distribución de partículas, aumentando la densidad de la matriz y la resistencia en edades tempranas.

En cambio, la mezcla de un 20% de polvo cerámico y un 1.5% de fibra de coco demostró la menor resistencia con 15.82 MPa. Es posible que esta reducción sea producto de que el incremento del polvo de cerámica y la fibra de coco afecta la trabajabilidad del concreto fresco, lo cual dificulta una distribución adecuada de los materiales y genera más vacíos internos. Además, una gran cantidad de fibra puede limitar la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados, lo cual afecta directamente en la resistencia mecánica, especialmente en edades tempranas donde el proceso de hidratación aún no se ha desarrollado por completo. Al respecto, Lara [21] y Cristiano [14] advierten que una dosificación excesiva de fibras naturales tiende a disminuir la fluidez de la mezcla, provocando una distribución heterogénea y la formación de aglomeraciones que interrumpen la continuidad de la matriz de hormigón, reduciendo su capacidad de carga.

Los resultados, en lo que respecta a la densidad, muestran una tendencia coherente con la resistencia de las mezclas. La dosificación con mayor resistencia tuvo la densidad más alta, que fue 2407.78 kg/cm³. Esto indica que una mezcla más densa optimiza el desempeño

mecánico del concreto. La densidad más baja, de 2157.74 kg/cm³, se observó cuando se combinó con una resistencia inferior. Esto evidencia que una disminución de la compacidad tiene un efecto adverso en la resistencia del material. Esto evidencia que la densidad es una medida significativa del nivel de consolidación interna de la mezcla y de la calidad estructural lograda. Esta teoría es validada por Correira [11], quien señala que la inclusión de materiales reciclados debe igualarse para evitar un aumento de la porosidad; una densidad elevada es sinónimo de una estructura más cerrada, lo cual es fundamental para garantizar tanto la resistencia a compresión como la durabilidad del hormigón modificado.

Los resultados que se lograron después de 7 días muestran que el polvo de cerámica puede proporcionar ventajas al hormigón si se usa en proporciones apropiadas, a la vez que la fibra de coco tiene que agregarse con control para prevenir efectos negativos en la mezcla. Según indican los datos, la mezcla más propicia en este primer momento fue la que contenía un 20% de polvo cerámico sin fibra de coco. Esto se debe a que aumentó la resistencia.

Al elaborar las probetas descritas en la Tabla 4, y haber pasado por el proceso de curación, se ensayan a los 3 días para verificar su resistencia a compresión y obtenemos los resultados presentados en la Fig. 8.

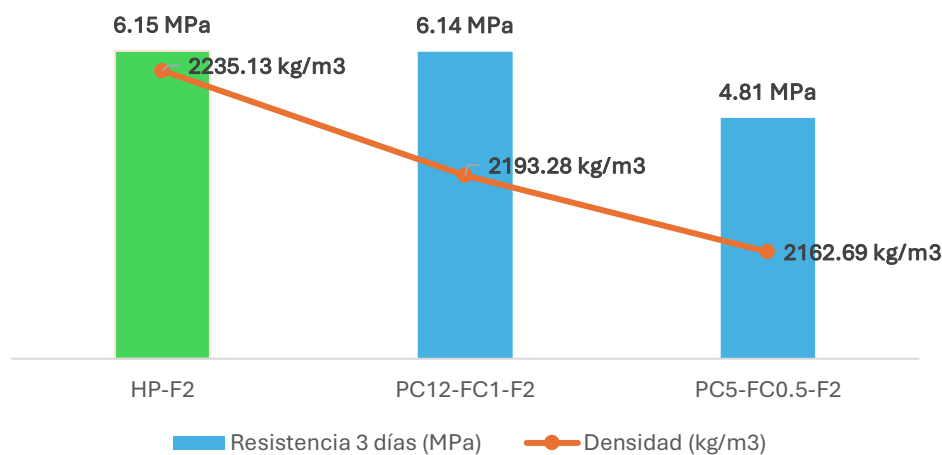


Fig. 8. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 3 días.

En el estudio realizado Vera et al. [24], los ensayos a 3 días el concreto presenta un incremento inicial de resistencia influenciada principalmente por la hidratación del cemento, y las condiciones de la matriz. La incorporación de fibra de coco tiende a generar una ligera disminución en la resistencia a compresión, debido a la formación de vacíos y a la posible interferencia en el proceso de compactación del material, en particular cuando la fibra no ha sido tratada previamente de manera apropiada.

En este estudio, los resultados obtenidos a los 3 días indican que el hormigón patrón llegó a una resistencia de 6.16 MPa, pero la combinación con un 5% de polvo cerámico y un 0.5% de fibra de coco experimentó una disminución considerable hasta llegar a 4.81 MPa; esto

demuestra que hubo un impacto negativo en la resistencia durante las primeras etapas. Por otro lado, la mezcla con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco alcanzó un valor de 6.14 MPa, prácticamente igual al patrón, lo que sugiere un comportamiento más favorable cuando se combinan porcentajes adecuados de reemplazo y refuerzo (véase Anexo 8).

Estas diferencias en el comportamiento se relacionan a la relación agua cemento efectiva, la eficiencia de la compactación y la distribución de la fase de refuerzo en la matriz. Al respecto, Pacheco [10] y Ikponmwosa [12] explican que la incorporación de fibras naturales en porcentajes reducidos puede resultar insuficiente para contrarrestar la porosidad inducida por adición de residuos, lo que explica la caída de resistencia en la mezcla de 5%. Huamani [27] y Bolaños [28], sostienen que el empaquetamiento granular se optimiza cuando se combinan de manera precisa fibras vegetales y residuos de cerámica. De acuerdo con estos autores, el material de cerámica funciona como un refinador de poros que potencia la adherencia entre la matriz y las fibras, lo que posibilita que el compuesto desarrolle su capacidad mecánica más rápidamente. Ospina [29] también lo constata, asegurando que la estabilidad del hormigón en edades tempranas está sujeta a prevenir el incremento de vacíos por medio de un equilibrio en relación de reemplazo.

De acuerdo con estudios realizados por Chandrasekaran [30], la inclusión de polvo de cerámica actúa como un agente de densificación que optimiza la estructura interna del hormigón, este material compensa parcialmente las deficiencias mecánicas provocadas por la presencia de fibras, logrando un equilibrio en el desempeño estructural del compuesto. Esto se ve reflejado en los ensayos realizados donde la dosificación con un 12% de polvo de cerámica permitió recuperar la resistencia a niveles similares al hormigón patrón, incluso en una etapa temprana de curado como son los 3 días. Dicha recuperación sugiere que la finura del polvo de cerámica promueve una mejor distribución granular, reduciendo la porosidad capilar y fortaleciendo la estructura interna del material desde sus primeras edades, un comportamiento que también ha sido validado por [31].

Sin embargo, la mezcla con menor contenido de polvo de cerámica 5% no logró este efecto, lo que resultó en una menor resistencia, posiblemente debido a una insuficiente mejora en la compacidad de la matriz. Estas variaciones pueden explicarse por factores determinantes como la diferencia en la finura del polvo de cerámica usado, el método de trituración empleado para su obtención y el rigor en el control granulométrico del material,

Los resultados obtenidos a los 3 días indican que existe un contenido óptimo de polvo de cerámica es decir 12% que permite equilibrar los efectos negativos de la fibra de coco, logrando resistencias comparables al hormigón convencional. Esto confirma la tendencia reportada por Lara [21], donde el comportamiento mecánico del concreto modificado depende directamente de la dosificación y de la interacción entre sus componentes.

5.12 Compresión 7 días

De las dosificaciones que se presentan en la Tabla 13, que fueron utilizadas para realizar el ensayo de compresión a los 3 días, a continuación, en la Fig. 9 se presentan los resultados de compresión a los 7 días, donde se realizaron probetas con la misma dosificación.

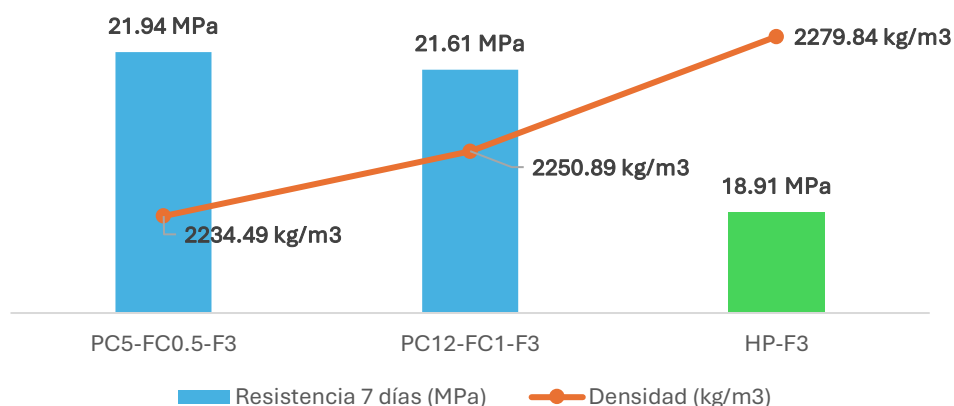


Fig. 9. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 7 días.

Los resultados presentados en la Fig. 9, muestran una adecuada capacidad para desarrollar la resistencia estándar requerida. La dosificación de 5% de polvo de cerámica y 0.5% de fibra de coco presenta una resistencia a compresión (21.94 MPa) muy similar a la siguiente dosificación (12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco) que dio como resultado 21.61 MPa, son resultados que a los 7 días se aproximan a los 24 MPa que es la resistencia de diseño, por lo tanto, las probetas para los ensayos a 14 y 28 días se elaboraron a partir de las dosificaciones que evidenciaron el mejor desempeño durante la evaluación inicial, seleccionándose aquellas que presentaron una respuesta más favorable respecto a las propiedades analizadas. El procedimiento y los resultados completos se muestran en el Anexo 9.

Así, se tiene que la mejor dosificación es de 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco, al momento de analizar los resultados entre las dos dosificaciones, tienen una resistencia a compresión muy similar por eso es necesario indicar que como el presente trabajo de investigación se trata de reemplazo y adición de los diferentes materiales en el hormigón, lo óptimo es la opción que permite una mayor incorporación de estos materiales sin que se vean afectadas las propiedades del hormigón.

5.13 Compresión 14 días

La resistencia a compresión del hormigón convencional a los 14 días se determina aplicando $f'c(14) = 0.90 \times f'c(28)$ del ACI 209R. La cual dice que a los 14 días el hormigón alcanza aproximadamente el 90 % de su resistencia final. Bajo este criterio, la resistencia estimada del hormigón patrón fue de 21.6 MPa.

Al comparar este valor con la resistencia obtenida experimentalmente en la mezcla con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco, que alcanzó 27.15 MPa, se obtuvo un incremento del 25.69%, lo que evidencia una mejora en la resistencia a compresión en edades tempranas. Este incremento está respaldado en las investigaciones de Ospina [29] y Huamani [27], quienes sostienen que la interacción entre el polvo de cerámica actuando como agente de refinamiento estructural y las fibras de coco que limitan la propagación de micro fisuras hace que se acelere el desarrollo resistente. Asimismo, Ikponmwosa [12] afirma que la naturaleza puzolánica de ciertos residuos cerámicos contribuye a la formación de una matriz más densa en fases iniciales, lo que justifica el incremento de la resistencia a compresión.

De igual forma, fue necesario establecer un valor referencial basados en criterios normativos para realizar la comparación con la mezcla modificada. De acuerdo con la norma ACI 211.1, la densidad del hormigón convencional de peso normal se encuentra generalmente en un rango entre 2200 y 2400 kg/m³. En esta investigación, se utilizó 2400 kg/m³ como densidad de referencia del hormigón patrón.

La mezcla con un 12% de polvo de cerámica y un 1% de fibra de coco tuvo una densidad promedio de 2189.34 kg/m³ a los catorce días, según los resultados experimentales. Se observó una disminución de alrededor de 8.78% al cotejar este valor con la densidad de referencia del hormigón patrón.

La adición de fibra de coco en la mezcla puede ser la razón de esta disminución, debido a que la densidad de este componente es inferior a la de los agregados empleados en las mezclas. Esto repercute directamente en el peso unitario del hormigón, haciéndolo más bajo. Sin embargo, la densidad obtenida se mantiene dentro del rango aceptable para hormigones de peso normal, lo que indica que la mezcla conserva propiedades físicas adecuadas a los 14 días de curado. Al respecto Correira [11] y Johnson y Sangeetha [31] explican que la sustitución de materiales densos por fibras orgánicas de baja densidad disminuye el peso del compuesto, factor que beneficia para reducir las cargas muertas en una estructura. A pesar de esta reducción, el hecho de que la densidad se mantenga cercana al rango normal corrobora las observaciones de Ospina [29] quien sugiere que el polvo de cerámica compensa parte del volumen de vacíos introducido por fibras, logrando un equilibrio entre la ligereza del material y su integridad física a los 14 días de curado.

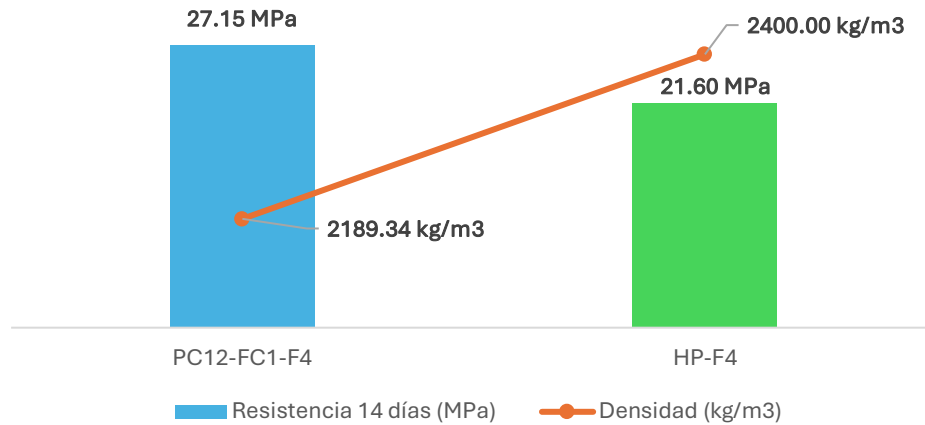


Fig. 10. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 14 días.

A los 14 días, en la Fig. 10 se evidencia una mejora significativa en la resistencia a compresión de la mezcla modificada con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco, alcanzando un valor de 27.15 MPa, superior al hormigón patrón, el cual presenta 21.6 MPa.

Este resultado coincide con Vera et al. [24] quien establece que la incorporación de residuos cerámicos en proporciones del 10% al 15% puede mejorar la resistencia a compresión debido al efecto filler ya la mejora en la distribución granulométrica. De igual manera Chalan [25] concluye que el polvo de cerámica contribuye a la densificación de la matriz, lo cual favorece el desarrollo de resistencia en edades temprana e intermedias.

Esta posible reducción en la densidad es consistente con lo reportado por Hamad [26], quien indica que la incorporación de materiales reciclados puede generar matrices ligeramente menos densas debido a diferencias en absorción y textura superficial, sin que esto implique necesariamente una disminución en la resistencia mecánica.

Asimismo, la presencia de fibra de coco en un 1% contribuye al control de microfisuración y mejora de la cohesión interna, lo cual coincide con lo dicho por Rojas [23] y Huamani [27], quienes establecen que porcentajes moderados de fibra permiten mantener o mejorar el comportamiento mecánico del concreto sin afectar negativamente su resistencia a compresión.

Los resultados evidencian que la dosificación 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco, presenta un comportamiento eficiente, logrando una mayor resistencia con menor densidad, lo cual implica una mejora en la relación resistencia peso.

5.14 Compresión 28 días

De igual forma que para los ensayos de 14 días, la resistencia a compresión de estos a los 28 días fue considerada a partir de la resistencia de diseño establecida para la mezcla patrón, correspondiente a 24 MPa.

Al comparar este valor con la resistencia a compresión obtenida experimentalmente en la mezcla con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco, que alcanzó 31.28 MPa a los 28 días, se determinó un incremento del 30.33%, lo que demuestra que la capacidad resistente de hormigón modificado ha mejorado notablemente en comparación con el hormigón convencional, véase Anexo 10.

Este aumento puede ser debido a que el polvo de cerámica, al ser un material fino de relleno en la matriz del cemento, ayuda a compactar mejor y reducir los espacios vacíos internos, lo cual propicia un aumento de la resistencia mecánica. Este fenómeno es corroborado por Chandrasekran y Rajathi [30], quien sostiene que la incorporación de residuos cerámicos de alta finura actúa como un micro relleno que optimiza el empaquetamiento granular de la mezcla.

Además, se empleó un valor de referencia apoyado en la norma ACI 211.1, que determina que la densidad del hormigón convencional de peso normal varía entre los 2200 y los 2400 kg/m³. Para realizar la comparación, se utilizó un valor de 2400 kg/m³ para la densidad del hormigón patrón como referencia.

Los datos experimentales obtenidos a los 28 días para la mezcla con 12% de polvo cerámico y 1% de fibra de coco indicaron que la densidad media era de 2213.08 kg/m³. Al comparar este valor con la densidad referencial estimada del hormigón patrón, se obtuvo una reducción aproximada del 7.79%.

Esta disminución puede atribuirse a la incorporación de fibra de coco en la mezcla, ya que este material presenta una densidad inferior a la de los agregados convencionales empleados en el hormigón, lo que reduce ligeramente el peso unitario del material endurecido [28]. El valor obtenido permanece dentro de los rangos aceptables para hormigones de peso normal, lo que muestra que la mezcla mantiene propiedades físicas apropiadas después de 28 días de curado.

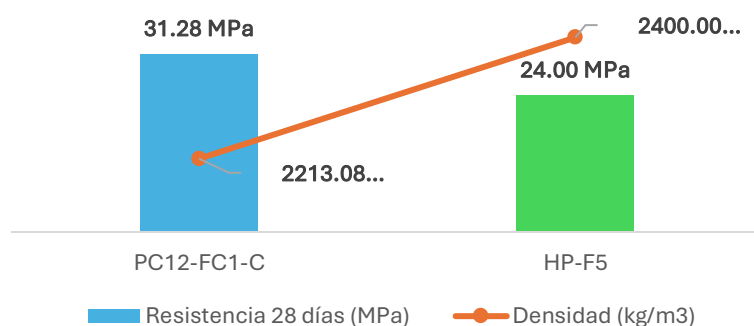


Fig. 11. Resistencia a compresión y densidad de las probetas a los 28 días.

A los 28 días, se observan resultados que indican una conducta consistente y uniforme entre la resistencia a la compresión, la densidad y el uso de materiales reciclados. En esta etapa, la influencia del tiempo de curado es determinante, permitiendo que la mezcla modificada

desarrolle plenamente su capacidad mecánica, este proceso asegura que el cemento y el polvo cerámico reaccionen completamente con el agua, cerrando los poros internos y sujetando con firmeza las fibras de coco para que trabajen como refuerzo. Sobre este punto Bolaños [28] explica que mantener una humedad adecuada es vital para que el hormigón gane su resistencia máxima y no se agriete, garantizando que el material sea más compacto y duradero. La dosificación 12% de polvo de cerámica y 1% fibra de coco, alcanza una resistencia de 31.28 MPa, superando al hormigón patrón 24 MPa, mientras que la densidad disminuye de 2400 kg/m³ a 2213.08 kg/m³.

Este comportamiento es similar a lo que estudios hechos por Chalan [25] y Bolaños [28] quienes indican que la incorporación de polvo cerámico en porcentajes entre el 10% y 15% permite alcanzar resistencias similares o superiores al hormigón convencional, debido a la mejora en la compacidad y a la distribución granulométrica.

Vera *et al*, [24] señala que el efecto del material cerámico se vuelve más evidente a los 28 días, ya que actúa como material de relleno fino (filler), reduciendo vacíos, lo que coincide con el incremento a la resistencia de las probetas ensayadas.

En cuanto a la fibra de coco, la dosificación del 1% utilizada en esta investigación demuestra ser adecuada, lo cual coincide con lo dicho por Ospina [29], quien indica que contenidos moderados de fibra no incrementan la resistencia a compresión, pero permite mantener valores adecuados, mejorando la cohesión interna y el comportamiento de la mezcla.

En cuanto a la densidad, la disminución observada en la mezcla modificada frente al hormigón patrón no representa una desventaja estructural, sino una mejora en la relación resistencia peso. Este comportamiento es coherente con lo indicado por los autores analizados Johnson [31], Bolaños [28], Ospina [29], Chandrasekaran [30] y Hamad [26], quienes destacan que la incorporación de materiales reciclados puede reducir la densidad sin comprometer el desempeño mecánico, siempre que se mantenga una dosificación adecuada.

5.15 Evaluación de resistencia de dosificaciones

Para estimar la resistencia a compresión a los 28 días de las mezclas que no contaban con probetas para ensayar, se tomó como referencia la mezcla HP, debido a que fue diseñada para alcanzar una resistencia máxima de 24 MPa, constituyendo el valor base de diseño de la investigación.

La proyección se realizó a partir de la relación de crecimiento entre la resistencia obtenida a los 7 días y la resistencia alcanzada a los 28 días de la mezcla patrón HP. Para ello, se calculó un factor de incremento con la división entre la resistencia a los 28 días de diseño y la resistencia temprana obtenida experimentalmente, tal como se muestra a continuación:

Factor de proyección = Resistencia 28 días / Resistencia 7 días

En el caso de la dosificación HP: el factor de proyección = $24 / 18.07 = 1.33$

El valor obtenido representa el incremento de resistencia del hormigón entre los 7 y 28 días de curado, por lo que fue adoptado como coeficiente de proyección para estimar las resistencias faltantes de las demás mezclas. De esta manera, la resistencia proyectada a los 28 días se obtuvo multiplicando la resistencia experimental de 7 días por el factor determinado, conforme a la siguiente expresión:

$$f'_c(28) = 1.33 \cdot f'_c(7)$$

A partir de este procedimiento, se estimaron las resistencias faltantes las cuales se describen en la Tabla 17, que se presenta a continuación:

Tabla 17

Resistencia de probetas a los 7 y 28 días

Código	Resistencia 7 días (MPa)	Resistencia 28 días (MPa)
HP	18.07	24
PC20	20.47	27.23
FC1.5	19.45	25.87
PC5-FC0.5	17.44	23.20
PC12-FC1	17.78	31.28
PC20-FC1.5	15.82	21.04

La Fig. 12 muestra la comparación de la resistencia a compresión proyectada a los 28 días de las distintas dosificaciones analizadas, usando como punto de referencia el hormigón (HP) diseñado para tener una resistencia de 24 MPa. Además, se incorpora el límite mínimo de 21MPa, que se ha determinado para el hormigón estructural. La gráfica posibilita la detección del comportamiento resistente de las dosificaciones en relación con el valor de diseño y la evaluación de su tendencia general a los 28 días de curado.

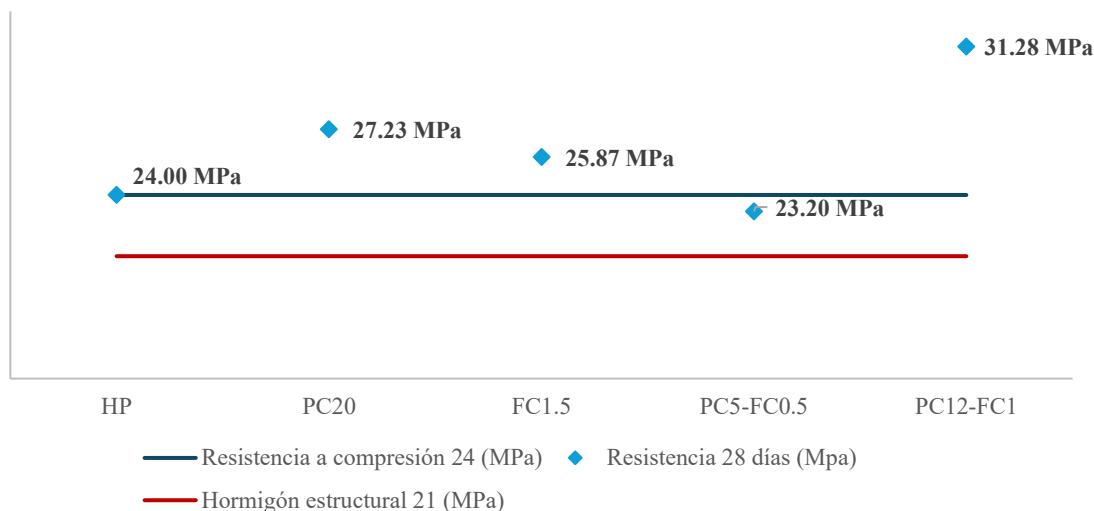


Fig. 12. Resistencia del hormigón respecto al límite de dosificaciones

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento variable entre las dosificaciones evaluadas respecto al hormigón patrón (HP), diseñado para una resistencia de 24 MPa a los 28 días. Para el análisis presentado en la Fig. 12 se excluyó la dosificación PC12-FC1, la cual registró una resistencia a compresión de 31.28 MPa, valor que se muestra en la Tabla 17. Se consideró un valor atípico la resistencia, ya que fue mayor que el resto de los resultados alcanzados en el análisis de datos. Si su inclusión hubiera sido posible, habría distorsionado la interpretación comparativa del desempeño general de las otras dosificaciones y la escala de representación gráfica.

Las dosificaciones PC20 (27.23 MPa) y FC1.5 (25.87 MPa) rebasaron la resistencia de diseño de 24 MPa, en contraste con el hormigón patrón, lo que demuestra un rendimiento mecánico superior. Por otro lado, la mezcla PC5-FC0.5 alcanzó una resistencia de 23.20 MPa, valor ligeramente inferior al hormigón patrón. Asimismo, la dosificación PC20-FC1.5 registró la menor resistencia a compresión, con 21.04 MPa, situándose próxima al límite mínimo establecido para hormigón estructural.

Según la NEC-SE-HM, el hormigón estructural debe tener al menos 21 MPa de resistencia. Siguiendo este criterio, todas las dosificaciones que se han evaluado satisfacen el requerimiento normativo, pues logran resistencias que son iguales o superior a dicho valor. No obstante, dado que el diseño de la investigación se fundamentó en un hormigón patrón de 24 MPa, solo las mezclas de PC20 y FC1.5 logran exitosamente la meta de diseño propuesta, porque sobrepasan la resistencia fijada para el hormigón de referencia.

5.16 Resistencia a tracción

Para el ensayo a tracción, fue necesario estimar un valor referencial a partir de la resistencia a compresión de diseño del hormigón convencional. Para ello, se aplicó la relación empírica establecida por el ACI 318, que permite estimar la resistencia a tracción mediante la

expresión $f_t = 0.56 \sqrt{f'_c}$, se calculó una resistencia a tracción de 2.74 MPa en el hormigón patrón, teniendo en cuenta una resistencia de diseño a la compresión de 24 MPa.

Se notó un descenso de aproximadamente de 38.32% cuando se comparó este valor con la resistencia a la tracción que se obtuvo en experimentos con una mezcla que incluía un 12% de polvo cerámico y un 1% de fibra de coco, que era de 1.69 MPa. Revise el Anexo 10 para obtener información adicional.

La reducción podría estar relacionada con una distribución no uniforme de las fibras de coco en el cemento y con la presencia de más espacios vacíos internos, factores que afectan la capacidad del material para resistir esfuerzos a tracción. Este fenómeno es indicado por Lara [21], quien señala que una deficiente dispersión de las fibras naturales genera puntos de debilidad estructural que interrumpen la continuidad de la matriz. Sin embargo, la mezcla mantiene un comportamiento mecánico aceptable considerando la incorporación de materiales alternativos en su composición. Este desempeño se califica como aceptable debido a que, a pesar de la ligera disminución respecto al patrón, la resistencia obtenida supera los valores del mínimos requeridos y mantiene la integridad de la probeta sin presentar fallas frágiles repentinas, cumpliendo así con los criterios de serviciabilidad para hormigones modificados.

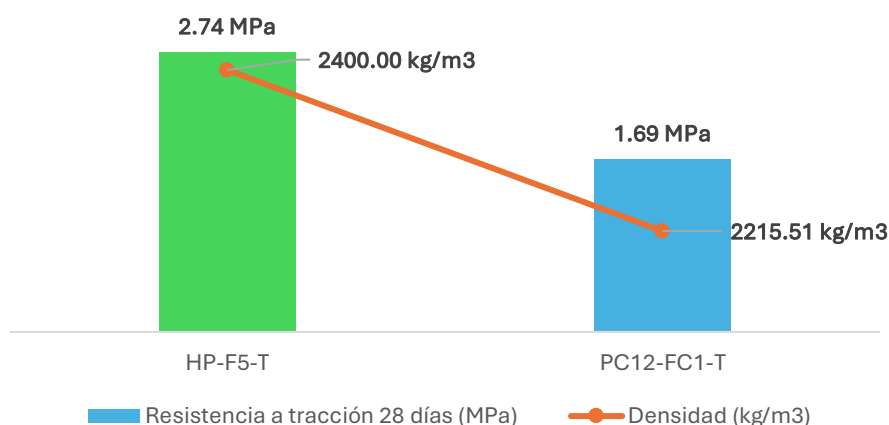


Fig. 13. Resistencia a tracción y densidad de las probetas a los 28 días.

A los 28 días los resultados del ensayo a tracción indirecta evidencian una diferencia significativa entre el valor del hormigón patrón y el hormigón con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco. Al tener una resistencia a tracción de 2.74 MPa a partir de una resistencia a compresión de 24 MPa. En contraste, la resistencia fue de 1.69 MPa, lo que representa una disminución aproximada de 38.32%.

Respecto a la densidad, la dosificación PC12-FC1-T presentó un valor de 2215.51 kg/m³, inferior al valor de referencia de 2400 kg/m³ comúnmente asociado a un hormigón convencional. Esta reducción del 7.7 % evidencia que la incorporación de polvo de cerámica y fibras de coco contribuye a disminuir el peso volumétrico del material, manteniendo una tendencia similar a la observada en los análisis previos.

Esta variación es uno de los principales obstáculos que presenta el empleo de materiales alternativos en el concreto, sobre todo en características vinculadas a la tracción. La reducción detectada puede explicarse por la creación de vacíos internos durante el proceso de mezcla y por la distribución irregular de la fibra de coco. Este comportamiento coincide con lo dicho por Vera et al. [24], quien indica que las fibras naturales pueden mejorar ciertas propiedades del concreto, su mala dispersión puede generar zonas débiles que afectan negativamente la resistencia a tracción.

Por otro lado, el efecto del polvo de cerámica también influye en este comportamiento. Aunque este material mejora la compacidad y la resistencia a compresión, su aporte en tracción es más limitado. Según Chandrasekaran [30] los materiales cerámicos actúan como filler, mejorando la densificación, pero no contribuyen a la capacidad del material para resistir esfuerzos de tracción.

Además, investigaciones como las de Chalan [25] y Bolaños [28] indican que los concretos con reemplazo de agregados por materiales cerámicos tienen la capacidad de conservar o incrementar la resistencia a compresión; sin embargo, si no se optimiza la distribución de los componentes y la adherencia interna, se produce una disminución en las propiedades de tensión.

Sobre la utilización de fibras autores como Rojas [23], Ospina [29] señalan que el uso de fibras de coco puede mejorar la tenacidad del concreto y el comportamiento posterior a la fisuración. Sin embargo, no siempre aumenta la resistencia a tracción indirecta, en particular cuanto hay dificultades con la trabajabilidad. Esto concuerda con los resultados obtenidos donde a pesar de la disminución en la resistencia, la mezcla mantiene un comportamiento mecánico aceptable.

Además, según señala Hamad [26], el uso de materiales reciclados puede cambiar la microestructura del concreto, creando una matriz menos densa o más heterogénea, lo que tiene un impacto negativo en la resistencia a tracción, aunque la resistencia a compresión mejore.

Por lo general, la combinación de 1% de fibra de coco y 12% de polvo cerámico tiene una disminución en la resistencia a tracción; sin embargo, los valores se mantienen dentro de un rango tolerable si se considera el uso de materiales reciclados

5.17 Resistencia a flexión

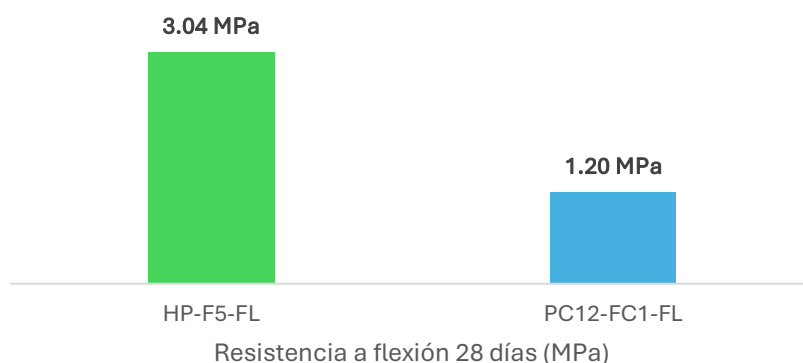


Fig. 14. Resistencia a flexión de las vigas a los 28 días.

A los 28 días los resultados presentados en la Fig. 14, evidencian una diferencia marcada entre el valor referencial del hormigón patrón y la mezcla modificada con 12% de polvo de cerámica y 1% de fibra de coco. Al igual que en el ensayo de tracción se considera un valor referencial de 3.04 MPa, el cual fue obtenido a partir de la resistencia a compresión de diseño del hormigón patrón mediante la relación empírica establecida en la norma ACI 318.19.2.3.1, donde la resistencia a tracción del hormigón se estima con la expresión $f_t = 0.62\sqrt{f'_c}$, mientras que la resistencia a flexión obtenida experimentalmente para la mezcla modificada fue de 1.20 MPa, lo que representa una reducción significativa en la capacidad del material para resistir esfuerzos de flexión. Para mayor detalle de los datos y cálculos efectuados, véase el Anexo 10.

Este comportamiento puede explicarse considerando que la resistencia a flexión, al igual que la tracción, es altamente dependiente de la continuidad interna del concreto, la adherencia entre sus componentes y la presencia de discontinuidades o vacíos. Según lo planteado por Bolaños [28], la irregularidad en la distribución de fibras naturales puede generar porosidad, limitando la capacidad del hormigón para reducir las fisuras y transmitir las cargas de flexión de manera uniforme, es así como la disminución observada se relaciona con posibles problemas de dispersión de la fibra de coco, así como con la formación de vacíos internos, los cuales actúan como puntos de concentración de esfuerzos y facilitan la propagación de fisuras.

Este resultado coincide con lo dicho por Vera [24] que indica que, aunque las fibras naturales pueden mejorar la capacidad de deformación y el control de fisuración, su distribución inadecuada puede afectar negativamente las propiedades mecánicas, especialmente en sollicitaciones de flexión.

Por otro lado, el aporte del polvo de cerámica en este tipo de esfuerzo es limitado. De acuerdo con Johnson [31] los materiales cerámicos finos contribuyen al relleno de vacíos y a la mejora de la compactación, pero no incrementan de manera significativa la resistencia a flexión, ya que no aporta mecanismos efectivos para resistir la apertura de fisuras.

De igual manera, investigaciones como las de Chalan [25] y Bolaños [28] indican que la utilización de materiales cerámicos reciclados puede preservar el rendimiento global del concreto; sin embargo, cómo se comporta ante esfuerzos de flexión depende de la calidad en la compactación y la correcta interacción entre los componentes.

Sobre el uso de fibras, Ospina [29] señala que las fibras de coco ayudan a optimizar la absorción de energía y la conducta después de la fisuración; sin embargo, no aumentan obligatoriamente la resistencia máxima a flexión, en particular si hay problemas con la trabajabilidad o con la distribución unitaria del material.

Por su parte Hamad [26] señala que la introducción de materiales reciclados puede crear una estructura interna no uniforme, lo que impacta en cómo se transmiten las tensiones dentro del concreto y, por ende, disminuye su capacidad para resistir cargas de flexión.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se diseñó un hormigón estructural reciclado y fortalecido a través de la adición de polvo cerámico y fibras de coco, lo que prueba que estos componentes son aptos para ser empleados en elementos con propósitos estructurales.
- La caracterización del polvo de cerámica reveló que puede usarse como sustituto parcial del agregado fino, siempre y cuando se controle su tamaño de partícula, contenido de humedad y absorción.
- El análisis de las distintas dosificaciones posibilitó determinar que la mezcla con 1% de fibra de coco y 12% de polvo de cerámica tuvo el rendimiento más destacado, superando la resistencia a compresión del hormigón patrón.
- Después de 7 días, se observan resultados que demuestran un aumento de la resistencia en las mezclas analizadas, lo cual sugiere que el uso de polvo de cerámica y fibras de coco en porcentajes correctos favorece el desarrollo temprano de la resistencia.
- La dosificación con fibra de coco y polvo de cerámica demostró ser más eficiente que el hormigón patrón, según los datos obtenidos a los 28 días, lo cual posibilitó una evaluación del comportamiento del hormigón. Esto indica que la matriz se vuelve más compactada y menos porosa cuando estos materiales se incorporan en las proporciones correctas, y, además, la adherencia interna del concreto sin afectar su resistencia a la compresión.
- La dosificación adecuada logró disminuir la densidad del hormigón sin que ello impactara de manera negativa en sus características mecánicas, lo cual evidenció que es factible producir un material más liviano y resistente a través de la adición de materiales reciclados.
- El cumplimiento de la resistencia de 24 MPa para la mayoría de las dosificaciones analizadas sugiere un comportamiento mecánico favorable. Las dosificaciones denominadas PC20 y PC20-FC1.5 no logran la resistencia especificada, pero sí alcanzan un valor que clasifica a los hormigones obtenidos como hormigones estructurales.

6.2 Limitaciones

- La investigación se desarrolló utilizando polvo de cerámica proveniente de retazos de cerámica, por lo que los resultados obtenidos pueden variar si se emplea cerámica reciclada de pisos o paredes.
- Las fibras de coco empleadas pertenecen a una muestra concreta y han sido tratadas de una manera precisa antes de ser añadidas al hormigón. Por lo tanto, los resultados podrían variar si se utilizan fibras de diferentes tamaños, edades, condiciones de almacenamiento o tratamientos superficiales.
- El análisis se restringió a examinar las propiedades mecánicas de densidad del concreto, resistencia a compresión, resistencia a flexión y resistencia a tracción indirecta. No se examinaron propiedades de durabilidad a largo plazo, como la resistencia a los ciclos medioambientales, la absorción, la permeabilidad o la resistencia a sustancias químicas.
- Las dosificaciones investigadas se eligieron en función de porcentajes determinados de sustitución del polvo cerámico y la adición de fibras de coco. Así pues, la dosificación óptima identificada es propia del rango experimental investigado y no necesariamente refleja el mejor comportamiento para porcentajes distintos a los examinados.
- La población experimental estuvo conformada por las probetas y vigas elaboradas para los ensayos establecidos en la metodología. Aunque la cantidad de especímenes fue suficiente para cumplir los procedimientos normativos y obtener resultados comparables, no permite abarcar la totalidad de los posibles comportamientos del hormigón.
- La investigación posee un alcance experimental y comparativo, por lo que sus conclusiones son válidas para las condiciones de materiales, dosificaciones, procedimientos de elaboración y curado empleados durante el estudio. Por lo tanto, los resultados tienen que ser considerados como una referencia técnica y no como valores absolutos que puedan aplicarse a cualquier tipo de hormigón o situación de construcción

6.3 Recomendaciones

- Utilizar polvo de cerámica reciclado de los residuos de la construcción como reemplazo parcial del agregado fino, pasando antes por una caracterización adecuada de sus propiedades físicas, sobre todo la capacidad de absorción, el contenido de humedad y la granulometría con el fin de asegurar un comportamiento homogéneo en la mezcla.
- Tratar las fibras de coco antes de incorporarlas al hormigón para que la absorción del agua no genere problemas y para mejorar la compatibilidad con el cemento. Este procedimiento comprende el corte regulado, además del secado y la limpieza.
- Tomar como referencia técnica para futuras investigaciones y aplicaciones experimentales la dosificación que consta de un 12% de polvo de cerámica y un 1% de fibra de coco, ya que mostró el mejor rendimiento en cuanto a densidad y resistencia en el rango evaluado.
- Examinar las propiedades de las fibras de coco con longitudes, tratamientos superficiales y porcentajes de incorporación, con el objetivo de reconocer configuraciones que posibiliten mejorar aún más las características mecánicas del concreto.
- Llevar a cabo pruebas de durabilidad en futuras investigaciones, tales como absorción, permeabilidad, resistencia a sustancias químicas, retracción y comportamiento ante ciclos de humedad y temperatura, con el fin de analizar el rendimiento del material a largo plazo.
- Ampliar el rango de dosificaciones estudiadas e incrementar el número de especímenes ensayados, con el fin de obtener una mayor base estadística y analizar otros posibles comportamientos del hormigón reciclado y reforzado.
- Promover el aprovechamiento de residuos cerámicos y fibras naturales dentro del sector de la construcción como una estrategia para reducir la disposición de residuos en vertederos, disminuir el consumo de recursos naturales y fomentar prácticas alineadas con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Bibliografía

- [1] A. Ramírez, “La Construcción Sostenible,” Construcción Verde. Accessed: Jun. 08, 2026. Available: https://www.cofis.es/old/pdf/fys/fys13/fys13_30-33.pdf
- [2] C. Antonio et al., “Use of Recycled Materials in Sustainable Construction”, doi: 10.59814/resofro.2025.5(2) e638.
- [3] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, and M. Sánchez De Juan, “Durability of recycled aggregate concrete,” Constr. Build. Mater., vol. 40, pp. 1054–1065, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.11.106.
- [4] W. F. D. European Commission, “Waste Framework Directive - Environment - European Commission.” Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en
- [5] C. and D. W. European Commission, “Construction and demolition waste - Environment - European Commission.” Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en
- [6] M. C. G. Juenger, F. Winnefeld, J. L. Provis, and J. H. Ideker, “Advances in alternative cementitious binders,” Cem. Concr. Res., vol. 41, no. 12, pp. 1232–1243, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.012.
- [7] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production,” Constr. Build. Mater., vol. 65, pp. 201–217, Aug. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.04.117.
- [8] Arnon. Bentur and Sidney. Mindess, Fibre reinforced cementitious composites. CRC Press, 2014.
- [9] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, and X. Huang, “An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011),” Constr. Build. Mater., vol. 31, pp. 364–383, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.074.
- [10] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Reusing ceramic wastes in concrete,” Constr. Build. Mater., vol. 24, no. 5, pp. 832–838, May 2010, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.10.023.
- [11] J. R. Correia, J. De Brito, and A. S. Pereira, “Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates,” Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 39, no. 2, pp. 169–177, 2006, doi: 10.1617/s11527-005-9014-7.
- [12] E. Ikponmwosa and S. Ehikhuenmen, “The effect of ceramic waste as coarse aggregate on strength properties of concrete,” Nigerian Journal of Technology, vol. 36, no. 3, pp. 691–696, Jun. 2017, doi: 10.4314/njt.v36i3.5.

- [13] Y. Zhang, T. Zhang, Z. Liu, and C. Ma, “Effect of Recycled Powder on Properties of Cement Mortar,” in E3S Web of Conferences, EDP Sciences, Aug. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202129902009.
- [14] M. Cristiano, “Concrete 2014-Progetto e Tecnologia per il Costruito Tra XX e XXI secolo Concrete 2014 progetto e tecnologia per il costruito Tra XX e XXI secolo The use of ceramic waste aggregates in concrete: a literary review.”
- [15] R. V. Meena, J. K. Jain, H. S. Chouhan, and A. S. Beniwal, “Use of waste ceramics to produce sustainable concrete: A review,” Jun. 01, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.clema.2022.100085.
- [16] R. Zerbino, “El hormigón reforzado con fibras y sus proyecciones dentro de la industria de la construcción.” *Revista de Ingeniería*, no. 153, pp. 14–18, nov. 2020.
- [17] ACI Committee 555, Removal and Reuse of Hardened Concrete (ACI 555R-01). Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute (ACI), 2001.
- [18] A. Bentur and S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [19] D. A. Chavarría Gutiérrez, “Evaluación de la sustitución de fibras sintéticas por fibras vegetales en vigas huecas sometidas a cargas de cubierta”. Trabajo de pregrado, Ingeniería Civil, Universidad EIA, Envigado, Colombia, 2016.
- [20] Y. C. Coronel Sánchez, L. F. Altamirano Tocto, and S. P. Muñoz Pérez, “Cenizas y fibras utilizadas en la elaboración de concreto ecológico: una revisión de la literatura,” *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, vol. 25, no. 49, pp. 321–329, jun. 2022, doi: 10.15381/iigeo.v25i49.20814.
- [21] G. Lara, Determinación de los porcentajes óptimos de fibra de coco en hormigones hidráulicos. Trabajo de titulación de pregrado, Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil, Universidad de Especialidades Espíritu Santo, Samborondón, Ecuador, 2017.
- [22] R. Johnson Daniel and S. P. Sangeetha, “Experimental study on concrete using waste ceramic as partial replacement of aggregate,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 6603–6608, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.772.
- [23] A. M. Rojas Torres, “Adición de la fibra de coco en el hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión”. Trabajo de titulación de pregrado, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2015.
- [24] D. Vera-Sánchez, H. I. Navarro-Gómez, C. Rodríguez-Álvarez, and J. E. Cerón-Carballo, “Mejora del Concreto Estructural con Fibras de Coco: Enfoque Sostenible,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 12, pp. 1–7, nov. 2024, doi: 10.29057/icbi.v12iespecial3.13451.
- [25] C. A. Chalan Pisco, Resistencia a compresión $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ adicionando residuos con cerámica y porcelanato para uso con fines estructurales, Cajamarca 2023.

Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2024.

[26] A. J. Hamad, R. J. A. Sldozian, and Z. A. Mikhaleva, "Effect of ceramic waste powder as partial fine aggregate replacement on properties of fiber-reinforced aerated concrete," *Engineering Reports*, vol. 2, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.1002/eng2.12134.

[27] B. P. Huamani Prado, "Influencia de la adición de la fibra de coco en la impermeabilización y resistencia del concreto para reservorios de agua potable, Ayacucho". Tesis de pregrado, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú, 2023.

[28] J. S. Bolaños Noboa, "Estudio del uso de materiales reciclados como hormigones, cerámicas y otros productos de derrocamiento o desperdicio de obra como agregados para un hormigón", Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador, 2015.

[29] L. David and O. Saldaña, "Adición de fibra de coco en probetas de concreto para mejorar la resistencia a la compresión y mejorar los cambios de temperatura", Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia, 2024.

[30] R. P. K. R. Chandrasekaran and P. P. Rajathi, "Experimental Analysis on Concrete by Partial Replacement of Fine Aggregate with Powdered Ceramic Tile," 2018. [Online]. Available: www.IJARIIIT.com

[31] R. J. Daniel and S. P. Sangeetha, "Experimental study on concrete using waste ceramic as partial replacement of aggregate," *Mater. Today, Proc.*, vol. 45, pp. 6603–6608, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.11.772.

ANEXOS

Anexo 1

Revisión bibliográfica para el desarrollo del trabajo de investigación

Como etapa inicial del desarrollo del presente trabajo de investigación, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva de estudios previos relacionados con el uso de los materiales seleccionados. Esta revisión permitió identificar antecedentes relevantes, metodologías empleadas, resultados obtenidos y criterios fundamentales, los cuales sirvieron como base teórica para sustentar el enfoque del estudio y orientar la toma de decisiones en fases posteriores. Asimismo, facilitó la determinación de rangos de dosificación, procedimientos experimentales y parámetros de evaluación reportados en investigaciones similares. En la Fig. 15 se presenta la matriz de revisión bibliográfica elaborada, en la que se encuentran los principales estudios analizados, permitiendo establecer el estado actual del conocimiento y la pertinencia de la presente investigación.

N	Material	Titulo	Autor	Resistencia			
				Dosificación	Compresión	Flexión	Longitud y diámetro
1	Fibra de coco	Adición de la fibra de coco en el hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión	Ángel Modesto Rojas Torres, UTA	0 a 1.5%, Agua 4.96 kg, Cemento 8 kg, Arena 15.8 kg, Ripio 27.8 kg	A los 28 días: 205.73 kg/cm ²	No se realizó este ensayo	Longitud de 2 a 5 cm, no se especifica el diámetro

2	Fibra de coco	Influencia de la adición de la fibra de coco en la impermeabilización y resistencia del concreto para reservorios de agua potable, Ayacucho	Pether Huamani Prado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (Perú)	0 %, 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % - Agua 28.12 kg, Cemento 50 kg, Arena 75.06 kg, Ripio 94.40 kg	Para porcentajes de fibra de coco 0 %, 0.5 %, 0.75 %, 1.0 %, 1.5 % se obtuvieron valores de compresión: 218.33, 230.67, 248.60, 273.50, 249.17 kg/cm ² respectivamente	Las resistencias a la flexión para esas mismas mezclas fueron: 50.19, 51.49, 52.77, 55.20, 52.77 kg/cm ² respectivamente.	Longitud de 15 cm, no se especifica el diámetro
3	Fibra de coco	Caracterización del hormigón con fibras naturales del raquis de la palma africana de aceite y la estopa del coco	Oscar Paúl Caizaguano Guevara & Gabriela Estefanía Terán Tandazo, EPN	0 - 2 - 4 %	Hormigón 210 0% de fibra 26.98 MPa, 2% de fibra 24.71 MPa, 4% de fibra 23 MPa. hormigón 240 0% de fibra 31.02 MPa, 2% de fibra 28.99 MPa, 4% de fibra 26.48 MPa	Hormigón 210 0% de fibra 4.48 MPa, 2% de fibra 4.96 MPa, 4% de fibra 4.65 MPa. Hormigón 240 0% de fibra 4.79 MPa, 2% de fibra 4.98 MPa, 4% de fibra 4.81 MPa	1.5 in de longitud y 0.83 mm de diámetro
4	Fibra de coco	Desempeño de la resistencia y contracción del concreto incorporando fibras de coco en losas aligeradas	Alvarado Mayhua, José María; UPLA, Perú	-	Convencional 275 kg/cm ² ; con 0.5 % fibra: 269.33; 0.7 %: 248.00; 0.9 %: 233.67 kg/cm ² (28 días)	Para el 0.9 % de fibra de coco resulta 43.78 kg/cm ² a los 28 días.	-

5	Fibra de coco	Adición de fibra de coco en probetas de concreto para mejorar la resistencia a la compresión y mejorar los cambios de temperatura	Luis David Ospina Saldaña, Bogotá Colombia	10-15-20 %	Sin mufla 29,79 MPa, con mufla 20,44 MPa, con fibras del coco al 10% 15.32 MPa, 20% 10,26 MPa.	-	Longitud de 10 cm, no se especifica el diámetro
6	Fibra de coco	Rendimiento mecánico y durabilidad del hormigón reforzado con fibra de coco: una revisión de vanguardia	Karim Benzarti	-	Aumento del 0.5%	-	0.1 a 0.5 mm
7	Fibra de coco	Determinación de una dosificación para una mezcla de hormigón utilizando fibras de coco y cenizas del bagazo de caña de azúcar como alternativa para mejorar la resistencia del hormigón a la compresión.	Jeancarlo Clotario Freire Granda	Cemento 1.806 kg, Gravas y arena 10.176, Fibras de coco 0.018 kg, Ceniza 0.072 kg, Agua 0.849 kg, Aire 0.056 kg	Hormigón 210 kg/cm2 ensayos a 7 días resistencia probeta 1: 147.74 kg/cm2, resistencia probeta 2: 177.35 kg/cm2. Hormigón 210 kg/cm2 ensayos a 14 días resistencia probeta 1: 191.35 kg/cm2, resistencia probeta 2: 196.39 kg/cm2. Hormigón 210 kg/cm2 ensayos a 28 días resistencia probeta 1: 236.54 kg/cm2, resistencia probeta 2: 236.94 kg/cm2.	-	Longitud entre 15 a 30 cm y un diámetro de 0.1 a 0.5 mm.

8	Fibra de coco	Determinación de los porcentajes óptimos de fibra de coco en hormigones hidráulicos.	Gillian Lara	Hormigón 210 kg/cm2: cemento 2.50 kg, Agua 1.50 kg, Arena 3.67 kg, piedra 4.27 kg. Hormigón 270 kg/cm2: cemento 2.50 kg, Agua 1.33 kg, Arena 2.95 kg, piedra 3.45 kg. Hormigón 350 kg/cm2: cemento 2.50 kg, Agua 1.00 kg, Arena 2.24 kg, piedra 2.60 kg. La fibra se la integra a la mezcla en porcentajes del volumen	Ensayos a 14 días. Hormigón 210 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 152.66 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 173.71 kg/cm2, fibra al 2 % resistencia 134.65 kg/cm2. Hormigón 270 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 193.56 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 205.21 kg/cm2, con fibra al 2% resistencia 179.77 kg/cm2. Hormigón 350 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 245.88 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 254.08 kg/cm2, con fibra al 2 % resistencia 236.90 kg/cm2. Ensayos a 28 días. Hormigón 210 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 218.09 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 248.15 kg/cm2, fibra al 2 % resistencia 192.36 kg/cm2. Hormigón 270 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 276.52 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 293.16 kg/cm2, con fibra al 2% resistencia 246.82 kg/cm2. Hormigón 350 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 351.25 kg/cm2,	Ensayos a 14 días. Hormigón 210 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 16.79 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 20.84 kg/cm2, fibra al 2 % resistencia 12.12 kg/cm2. Hormigón 270 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 19.36 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 26.68 kg/cm2, con fibra al 2% resistencia 16.18 kg/cm2. Hormigón 350 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 27.05 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 31.76	1.5 cm
---	---------------	--	--------------	--	--	--	--------

total (0.5%, 1.5%, 2.0%).	con fibra al 1.5 % resistencia 362.97 kg/cm2, con fibra al 2 % resistencia 338.43 kg/cm2.	kg/cm2, con fibra al 2 % resistencia 20.85 kg/cm2.
		Ensayos a 28 días. Hormigón 210 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 23.99 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 29.78 kg/cm2, fibra al 2 % resistencia 17.31 kg/cm2. Hormigón 270 kg/cm2 con fibra al 0.5 % resistencia 27.65 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 38.11 kg/cm2, con fibra al 2% resistencia 23.11 kg/cm2. Hormigón 350 kg/cm2 con

						fibra al 0.5 % resistencia 38.64 kg/cm2, con fibra al 1.5 % resistencia 45.37 kg/cm2, con fibra al 2 % resistencia 29.78 kg/cm2.	
9	Fibra de coco	Análisis térmico del mortero adicionado con fibra de coco.	Marisol Gómez Oviedo	Mortero: Cemento 150.1 g, Arena 450.3 g, Agua 75.05 ml, %Fibra de coco 5%, 10%, 15%, 20%	Hormigón ensayo 7 días 0% fibra: 11.23 kN, 0.5% fibra: 10.16 kN, 1% fibra: 11.26 kN, 1.5% fibra: 12.76 kN. Hormigón ensayo 28 días 0% fibra: 21.20 kN, 0.5% fibra: 17.30 kN, 1% fibra: 19.50 kN, 1.5% fibra: 21.73 kN	Hormigón ensayo 7 días: 0% fibra 2 kN, 0.5% fibra: 1.9 kN, 1% fibra: 2.2 kN, 1.5% fibra: 2.2 kN. Hormigón ensayo 28 días 0% fibra: 3.40 kN, 0.5% fibra: 3.30 kN, 1% fibra: 3.73 kN, 1.5% fibra: 3.74 kN.	6 cm

10	Fibra de coco	Coir fibre-reinforced concrete for enhanced compressive strength and sustainability in construction applications	Krishna Prasad Guruswamy **, Senthilkumar Thambiannan , Arputharaj Anthonysamy , Kirti Jalgaonkar, Ajinath Shridhar Dukare , Ravi Pandiselvam * , Naveenkumar Jha	4-12%	29.8 N/mm2, 25.4 N/mm2, 20.9 N/mm2	No se realizó este ensayo	1,25, 2,5 y 5,0 cm de longitud
11	Fibra de coco	Mejora del Concreto Estructural con Fibras de Coco	Daniel Vera Sánchez, Humberto Navarro, Jesús Cerón	0-0.5-1%	Incremento del 10% con 1 % de fibras y 5% con el 0.5 % de fibras de coco.	Incremento en un 15% con 10% de fibras de coco	No se especifica
1	Polvo de cerámica	Hormigones con agregados cerámicos: caracterización del hormigón resultante de utilizar el desecho de la industria cerámica de la ciudad de Cuenca como agregado grueso	Diana Bernardita Mora Abril, Universidad de Cuenca	-	La resistencia a compresión con agregado cerámico completo disminuye ~70% respecto al hormigón convencional.	La resistencia a flexión disminuye 44% respecto al convencional.	-

2	Polvo de cerámica	The Use of Waste Ceramic in Concrete: A Review	Luis Filipe Almeida	La sustitución de parte del cemento por cerámica de desecho puede realizarse en un porcentaje de hasta el 20%, siendo el 15% la cantidad ideal	0 % 7 días 49 MPa y 28 días 66 MPa; 10 % 7 días 45 MPa y 28 días 65 MPa; 20 % 7 días 40 MPa y 28 días 59 MPa; 30 % 7 días 38 MPa y 28 días 56 MPa; 40 % 7 días 27 MPa y 28 días 46 MPa	0 % 7 días 7 MPa y 28 días 8.6 MPa; 10 % 7 días 7 MPa y 28 días 8.9 MPa; 20 % 7 días 6.8 MPa y 28 días 8.6 MPa; 30 % 7 días 5.6 MPa y 28 días 7.1 MPa; 40 % 7 días 5.1 MPa y 28 días 6.9 MPa	-
3	Polvo de cerámica	Impacto del polvo cerámico en propiedades físicas y mecánicas del concreto de resistencia $f'_c=210$ kg/cm ² , Rioja 2024	Milton Bardales y Deisi Goñas, Perú	0%, 0,9%, 1,9% y 2,9%	Los resultados mostraron que la trabajabilidad no se ve comprometida hasta el 1,9% de adición; sin embargo, a 2,9% disminuye la resistencia a la compresión.	No se realizó este ensayo	-
4	Polvo de cerámica	Resistencia a compresión del concreto $f'_c = 210$ kg/cm ² adicionando residuos de cerámica y porcelanato para uso con fines estructurales	Alexander Chalan Pisco	5-10-15 %	Se determinó que la resistencia a compresión experimenta incremento a medida que aumentan las dosificaciones de residuos de cerámica y porcelanato, demostrando un comportamiento directamente proporcional.	No se realizó este ensayo	-

5	Polvo de cerámica	Experimental study on concrete using waste ceramic as partial replacement of aggregate	Johnson Daniel	0 - 5 - 10 - 15 - 20 %	0 % 7 días 20.40 N/mm ² y 28 días 32.55 N/mm ² ; 5 % 7 días 16.24 N/mm ² y 28 días 28.33 N/mm ² ; 10 % 7 días 17.50 N/mm ² y 28 días 29.53 N/mm ² ; 15 % 7 días 15.48 N/mm ² y 28 días 27.08 N/mm ² ; 20 % 7 días 14.36 N/mm ² y 28 días 26.11 N/mm ² ;	0 % 7 días 3.87 N/mm ² y 28 días 7.5 N/mm ² ; 5 % 7 días 4.24 N/mm ² y 28 días 6.2 N/mm ² ; 10 % 7 días 4.76 N/mm ² y 28 días 7 N/mm ² ; 15 % 7 días 4.33 N/mm ² y 28 días 5.1 N/mm ² ; 20 % 7 días 3.43 N/mm ² y 28 días 4.3 N/mm ² ;	-
6	Polvo de cerámica	Experimental Analysis on Concrete by Partial Replacement of Fine Aggregate with Powdered Ceramic Tile	Ramesh Kumar	0 - 10 - 20 - 30 - 40 %	0 % 7 días 27 N/mm ² y 28 días 30 N/mm ² ; 10 % 7 días 21 N/mm ² y 28 días 28 N/mm ² ; 20 % 7 días 20 N/mm ² y 28 días 31 N/mm ² ; 30 % 7 días 28 N/mm ² y 28 días 34 N/mm ² ; 40 % 7 días 20 N/mm ² y 28 días 27 N/mm ²	0 % 7 días 2.7 N/mm ² y 28 días 3.3 N/mm ² ; 10 % 7 días 2.9 N/mm ² y 28 días 3.2 N/mm ² ; 20 % 7 días 3 N/mm ² y 28 días 3.5 N/mm ² ; 30 % 7 días 3.1 N/mm ² y 28 días 3.8 N/mm ² ; 40 % 7 días 2.4 N/mm ² y 28 días 2.5 N/mm ²	-

7	Polvo de cerámica	Effect of ceramic waste powder as partial fine aggregate replacement on properties of fiber-reinforced aerated concrete	Ali Jihad Hamad	0-25-50%	0 % de cerámica y 1.5 % fibra de vidrio 7 días 10.1 MPa y 28 días 14 MPa; 25 % de cerámica y 1.5 % fibra de vidrio 7 días 11 MPa y 28 días 15 MPa; 50 % de cerámica y 1.5 % fibra de vidrio 7 días 11.5 MPa y 28 días 16 MPa	1.75 MPa a 7 días y 2 MPa 28 días	.
---	-------------------	---	-----------------	----------	--	-----------------------------------	---

Fig. 15. Matriz de revisión bibliográfica.

Anexo 2

Adquisición de materiales.

Una vez concluida la revisión bibliográfica y definidas las dosificaciones a emplear en el estudio, se procedió a la adquisición de los materiales que se va a usar, Los agregados, tanto fino como grueso de tamaño $\frac{3}{4}$, fueron obtenidos de la mina “Cerro Negro”. Posteriormente, se adquirieron los cocos en un mercado local, mientras que el cemento fue comprado en una ferretería, asegurando que todos los materiales cumplan con los requerimientos establecidos para la elaboración de las mezclas. En la Fig.16 se muestra la cantera “Cerro Negro” de la cual se obtuvieron los materiales (agregado grueso y agregado fino), así también en la Fig. 17 se visualiza la adquisición de cocos.



Fig. 16. Obtención de agregados en la mina “Cerro Negro”



Fig. 17. Obtención de cocos

Anexo 3

Obtención y curado de la fibra de coco.

Tras la obtención de los cocos, se procedió a cortarlos para extraer sus fibras. Posteriormente, estas fueron sometidas a un proceso de curado mediante un tratamiento con cal, en donde permanecieron inmersas durante 48 horas. Finalmente, las fibras fueron retiradas y dejadas secar al aire libre por un periodo de 24 horas, para después cortarlas 2 centímetros para su uso. En la Fig. 18 se evidencia la obtención de fibras de coco para seguir continuar con el lavado de fibras que se muestra en la Fig 19.



Fig. 18. Obtención de fibras



Fig. 19. Curado de fibras.



Fig. 20. Secado de fibras.



Fig. 21. Recorte de fibras.

En la Fig. 20 se muestra el secado de fibras que se lo realizó durante 24 horas, una vez secadas las fibras se procede al cortado de las mismas que se observa en la Fig. 21.

Anexo 4

Obtención de polvo de cerámica.

Para la obtención del polvo de cerámica, se empleó un proceso de trituration manual, mediante el cual el material fue reducido progresivamente hasta alcanzar la granulometría requerida.



Fig. 22. Trituración de cerámica.

Anexo 5

Granulometría de agregado fino, agregado grueso y polvo de cerámica.

Se realizó el análisis granulométrico del agregado fino, del grueso y del polvo de cerámica obteniéndose los siguientes resultados. En la Fig. 23 se evidencia el tamizado de los diferentes agregados realizado en la tamizadora.



Fig. 23. Granulometría de agregado fino y grueso

En la Tabla 18, se presentan los resultados de granulometría para el agregado fino.

Tabla 18

RESULTADOS OBTENIDOS DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO

Serie Fina								Wagregado=	600
Tamiz	Abertura (mm)	WT (g)	WT+Ws (g)	Ws Retenido Parcial (g)	Ws Retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Pasa	Lim Inferior	Lim Superior
1 1/2"	38.1	1594	1594	0	0	0	100	100%	100%
1"	25	1631	1631	0	0	0	100	100%	100%
3/4"	19	1061	1061	0	0	0	100	100%	100%
1/2"	12.5	1615	1615	0	0	0	100	100%	100%
3/8"	9.5	1578	1578	0	0	0	100	100%	100%
4"	4.75	749	756	7	7	1.17	98.83	95%	100%
8"	2.36	712	722	10	17	2.83	97.17	80%	100%
16"	1.18	664	756	92	109	18.17	81.83	50%	85%
20"	0.85	641	708	67	176	29.33	70.67	40%	70%
60"	0.25	513	781	268	444	74.00	26.00	7%	25%
100"	0.15	533	600	67	511	85.17	14.83	2%	10%
200"	0.075	512	569	57	568	94.67	5.33	0%	0%

En la Tabla 19 se presentan los resultados de granulometría para el agregado grueso.

Tabla 19

RESULTADOS OBTENIDOS DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO

Serie Gruesa									
Tamiz	Abertura (mm)	WT (g)	WT+Ws (g)	Ws Retenido Parcial (g)	Ws Retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Pasa	Límite Superior	Límite Inferior
1 1/2"	38.1	1594	1594	0	0	0	100	100%	100%
1"	25	1631	1637	6	6	0	99.80	100%	100%
3/4"	19	1061	1807	746	752	25.07	74.93	100%	90%
1/2"	12.5	1615	3798	2183	2935	97.83	2.17	55%	20%
3/8"	9.5	1578	1638	60	2995	99.83	0.17	10%	0%
4"	4.75	1583	1586	3	2998	99.93	0.07	5%	0%
8"	2.36	712	712	0	2998	99.93	0.07	0%	0%
16"	1.18	664	664	0	2998	99.93	0.07	0%	0%
20"	0.85	641	641	0	2998	99.93	0.07	0%	0%
60"	0.25	513	513	0	2998	99.93	0.07	0%	0%
100"	0.15	533	533	0	2998	99.93	0.07	0%	0%
200"	0.075	512	512	0	2998	99.93	0.07	0%	0%

Se presenta en la Fig. 24, la granulometría del polvo de cerámica que se pasó por varios tamices para así lograr la curva granulométrica.



Fig. 24. Granulometría polvo de cerámica

En la Tabla 20, se presentan los resultados de granulometría para el agregado grueso.

Tabla 20

RESULTADOS OBTENIDOS DE GRANULOMETRÍA DEL POLVO DE CERÁMICA

Tamiz	Abertura (mm)	Serie Fina (Polvo de cerámica)						Wpolvo=	500
		WT (g)	WT+Ws (g)	Ws Retenido Parcial (g)	Ws Retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Pasa	Lim Inferior	Lim Superior
1 1/2"	38.1	1594	1594	0	0	0	100	100%	100%
1"	25	1631	1631	0	0	0	100	100%	100%
3/4"	19	1061	1061	0	0	0	100	100%	100%
1/2"	12.5	1615	1615	0	0	0	100	100%	100%
3/8"	9.5	1578	1578	0	0	0	100	100%	100%
4"	4.75	749	749	0	0	0	100	95%	100%
8"	2.36	712	718	6	6	1.20	98.80	80%	100%
16"	1.18	664	681	17	23	4.60	95.40	50%	85%
20"	0.85	641	670	29	52	10.40	89.60	40%	70%
60"	0.25	513	623	110	162	32.40	67.60	7%	25%
100"	0.15	533	691	158	320	64.00	36.00	2%	10%
200"	0.075	512	652	140	460	92.00	8.00	0%	0%

Anexo 6

Ensayo de densidad para los agregados y el polvo de cerámica.

Se realizó el ensayo de densidad de los agregados finos y gruesos, así como los del polvo de cerámica.

En la Fig. 25 y Fig. 26 se evidencia el pesado del picnómetro con material tanto para el polvo de cerámica como para el agregado fino, para obtener el peso SSS que nos ayudará con el cálculo de la densidad.



Fig. 25. Densidad polvo de cerámica.

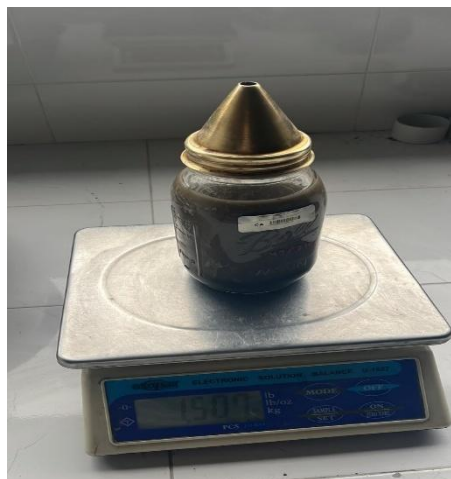


Fig. 26. Densidad agregado fino.

Anexo 7

Fase 1, elaboración de cilindros de hormigón para ensayo a compresión de 7 días.

Se pesaron los componentes de la mezcla correspondientes a cada dosificación y, posteriormente, se procedió a su mezclado como se ve en la Fig. 27, y a la elaboración de cilindros.



Fig. 27. Elaboración de mezcla

Una vez hecho esto, se procede a colocar la mezcla para cada dosificación en los moldes, cabe recalcar que se la coloca por capas, un total de 3 en las cuales se realiza 25 golpes con la varilla para su adecuada compactación, a su vez se las vibra con un martillo de goma para eliminar el aire de la mezcla. Pasadas 24 horas, se desencofra los cilindros como se muestra en la Fig.28.



Fig. 28. Desmoldado de probetas.

Luego de esto se los coloca en un tanque con agua para el proceso de curado en donde permanecen por 7 días.



Fig. 29. Proceso de curado de las probetas.



Fig. 30. Ensayo a compresión 7 días

Tabla 21

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 7 DÍAS																			
CÓDIGO	MUESTRA	PESO (G)	ALTURAS				DIÁMETROS				FUERZA		ÁREA	ESFUERZO			ESFUERZO PROMEDIO REAL (MPa)	DENSIDAD PROMEDIO (KG/M3)	TIPO DE FALLA
			ALTURA 1 (MM)	ALTURA 2 (MM)	ALTURA 3 (MM)	ALTURA PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO 1 (MM)	DIÁMETRO 2 (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (CM)	FUERZA APLICADA (KN)	FUERZA APLICADA (KG)		ESFUERZO (MPa)	ESPERADO (KG/CM2)	DENSIDAD (G/CM3)			
PATRÓN F1	HORMIGÓN PATRÓN 1	4098	204	203	203	203.3	107.06	107.67	107.37	10.50	141	14377.77	86.59	16.60	144	2327.53	18.07	2279.55	2
	HORMIGÓN PATRÓN 2	4039	201	201	201	201.0	105.96	108.19	107.08	10.71	172.6	17600.02	90.05	19.55	144	2231.58			6
20 % POLVO DE CERÁMICA - 1.5 % FIBRA DE COCO - F1	HORMIGÓN 20% CERÁMICA 1.5 % FIBRA DE COCO 1	3994	200	201	201	200.7	113.55	109.84	111.70	11.17	150.1	15305.70	97.98	15.62	144	2031.31	15.82	2157.74	5
	HORMIGÓN 20% CERÁMICA 1.5 % FIBRA DE COCO 2	4063	202	204	203	203.0	104.46	106.79	105.63	10.56	137.6	14031.07	87.62	16.01	144	2284.16			2
0 % POLVO DE CERÁMICA - 1.5 % FIBRA DE COCO - F1	HORMIGON 1.5 % FIBRA DE COCO 1	4031	202	201	200	201.0	111.30	106.00	108.65	10.87	157	16009.29	92.71	17.27	144	2163.05	19.45	2347.28	2
	HORMIGON 1.5 % FIBRA DE COCO 2	3975	200	201	201	200.7	98.53	101.10	99.82	9.98	166	16927.02	78.25	21.63	144	2531.51			5
12 % POLVO DE CERÁMICA - 1 % FIBRA DE COCO - F1	HORMIGÓN 12% CERÁMICA Y 1 % FIBRA DE COCO	3942	200	201	202	201.0	104.17	106.42	105.30	10.53	151.8	15479.05	87.08	17.78	144	2252.24	17.78	2252.24	5
20 % POLVO DE CERÁMICA - 0 % FIBRA DE COCO - F1	HORMIGÓN 20% CERÁMICA 1	4006	201	202	202	201.7	104.59	107.65	106.12	10.61	165.2	16845.44	88.45	19.05	144	2245.91	20.47	2407.78	2
	HORMIGÓN 20% CERÁMICA 2	3925	201	201	201	201.0	98.55	98.18	98.37	9.84	163.1	16631.31	75.99	21.89	144	2569.64			5
5 % POLVO DE CERÁMICA - 0.5 % FIBRA DE COCO - F1	HORMIGÓN 5% CERÁMICA Y 0.5 % FIBRA DE COCO 1	3910	200	200	201	200.3	98.12	105.10	101.61	10.16	150.8	15377.08	81.09	18.96	144	2406.92	17.44	2258.58	2
	HORMIGÓN 5% CERÁMICA Y 0.5 % FIBRA DE COCO 2	3954	202	201	202	201.7	108.54	108.99	108.77	10.88	145	14785.65	92.91	15.91	144	2110.25			2

Anexo 8

Fase 2, elaboración de cilindros de hormigón.

La población experimental de esta fase consistió en un total de 6 cilindros de hormigón, fabricados para evaluar el comportamiento mecánico sometiéndolos a ensayo de compresión para 3 días.

Se repite el proceso descrito para la Fase 1.



Fig. 31. Cilindros elaborados para la fase 2.



Fig. 32. Ensayo a compresión 3 días.

Tabla 22

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A COMPRESIÓN A LOS 3 DÍAS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 3 DÍAS																	
MUESTRA	PESO (G)	ALTURAS				DIÁMETROS				FUERZA		ÁREA	ESFUERZO		DENSIDAD (G/CM3)	ESFUERZO PROMEDIO REAL	TIPO DE FALLA
		ALTURA 1 (MM)	ALTURA 2 (MM)	ALTURA 3 (MM)	ALTURA PROMEDIO	DIÁMETRO 1 (MM)	DIÁMETRO 2 (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO	DIÁMETRO PROMEDIO	FUERZA APLICADA	FUERZA APLICADA	ÁREA (CM2)	ESFUERZO (KG/CM2)	ESPERADO (KG/CM2)			
HORMIGÓN PATRÓN 1	3773	204.53	204.03	205.38	204.6	103.03	101.82	102.43	10.24	48.9	4986.33	82.40	60.52	96	2237.59	61.54	2
HORMIGÓN PATRÓN 2	3742	203.04	204.8	204.25	204.0	102.50	102.04	102.27	10.23	50.4	5139.29	82.15	62.56	96	2232.66		3
HORMIGÓN 5% CERÁMICA Y 0.5 % FIBRA DE COCO 1	3697	205.6	204.5	205.19	205.1	103.62	102.27	102.95	10.29	40	4078.80	83.23	49.00	96	2165.66	48.10	3
HORMIGÓN 5% CERÁMICA Y 0.5 % FIBRA DE COCO 2	3698	204.74	204.25	205.29	204.8	103.57	102.80	103.19	10.32	38.7	3946.24	83.62	47.19	96	2159.73		2
HORMIGÓN 12% CERÁMICA Y 1 % FIBRA DE COCO	3650	202.58	201.91	202.63	202.4	102.98	102.90	102.94	10.29	48.7	4965.94	83.23	59.67	96	2167.11	61.35	2
HORMIGÓN 12% CERÁMICA Y 1 % FIBRA DE COCO	3696	202.7	203.17	203.31	203.1	102.65	101.72	102.19	10.22	50.7	5169.88	82.01	63.04	96	2219.44		1

Anexo 9

Fase 3, elaboración de cilindros de hormigón para comprobar la resistencia a los 7 días de curado.

La población experimental son 6 cilindros de hormigón fabricados para evaluar el comportamiento mecánico sometiéndolos a ensayo de compresión para 7 días.

Se repite el proceso descrito para la Fase 1 y 2.



Fig. 33. Curado de las probetas.



Fig. 34. Ensayo a compresión 7 días.

Tabla 23

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 7 DÍAS																	
MUESTRA	PESO (G)	ALTURAS				DIÁMETROS				FUERZA		ÁREA	ESFUERZO		DENSIDAD (G/CM3)	ESFUERZO PROMEDIO REAL	TIPO DE FALLA
		ALTURA 1 (MM)	ALTURA 2 (MM)	ALTURA 3 (MM)	ALTURA PROMEDIO	DIÁMETRO 1 (MM)	DIÁMETRO 2 (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO	DIÁMETRO PROMEDIO	FUERZA APLICADA	FUERZA APLICADA	ÁREA (CM2)	ESFUERZO (KG/CM2)	ESPERADO (KG/CM2)			
HORMIGÓN PATRÓN 1	3874	208.39	206.95	204.32	206.6	102.64	102.41	102.53	10.25	197	20088.09	82.56	243.33	168	2.27	189.12	2
HORMIGÓN PATRÓN 2	3893	204.76	204.28	206.6	205.2	102.60	102.90	102.75	10.28	109.7	11186.11	82.92	134.90	168	2.29		6
HORMIGÓN 5% CERÁMICA Y 0.5 % FIBRA DE COCO 1	3794	203.11	203.42	203.54	203.4	103.80	102.33	103.07	10.31	179.6	18313.81	83.43	219.52	168	2.24	219.35	5
HORMIGÓN 5% CERÁMICA Y 0.5 % FIBRA DE COCO 2	3814	204.33	205.75	204.61	204.9	102.95	103.11	103.03	10.30	179.2	18273.02	83.37	219.18	168	2.23		2
HORMIGÓN 12% CERÁMICA Y 1 % FIBRA DE COCO	3798	203.8	203.91	203.85	203.9	102.52	102.50	102.51	10.25	173.7	17712.19	82.53	214.61	168	2.26	216.07	2
HORMIGÓN 12% CERÁMICA Y 1 % FIBRA DE COCO	3800	205.32	204.61	204.68	204.9	102.81	102.35	102.58	10.26	176.3	17977.31	82.64	217.53	168	2.24		2

Anexo 10

Fase 4 y 5, elaboración de cilindros y vigas de hormigón para resistencia a compresión, tracción y flexión a los 28 días de curado.

La población experimental de esta fase son 2 cilindros de hormigón de 4 pulgadas fabricados para evaluar el comportamiento mecánico sometiéndolos a ensayo de compresión para 28 días y 2 cilindros para evaluar a los 14 días.

De igual manera para esta fase se realizaron 2 probetas de 15 cm x 30 cm, para realizar ensayos a tracción a los 28 días, juntamente con 2 vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm, para verificar la resistencia a flexión a los 28 días.

Primero se colocó todos los materiales en una bandeja grande, se usó la dosificación de polvo de cerámica 12% y fibra de coco 1%.

Luego que se mezcla se coloca en sus respectivos moldes tanto vigas como cilindros de 6 y 4 pulgadas respectivamente como se evidencia en la Fig. 35.



Fig. 35. Mezcla en moldes de cilindros y vigas.

Pasadas las 24 horas se desmolda las vigas para llevarlas al tanque de curado.



Fig. 36. Curado de cilindros y vigas.

Transcurridos 14 días se procede con el ensayo a compresión de 2 cilindros de hormigón de 4 pulgadas.



Fig. 37. Ensayo a compresión 14 días.

Tabla 24

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 14 DÍAS																	
MUESTRA	PESO (G)	ALTURAS				DIÁMETROS				FUERZA		ÁREA (CM2)	ESFUERZO		DENSIDAD (G/CM3)	ESFUERZO PROMEDIO REAL (KG/CM2)	TIPO DE FALLA
		ALTURA 1 (MM)	ALTURA 2 (MM)	ALTURA 3 (MM)	ALTURA PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO 1 (MM)	DIÁMETRO 2 (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (CM)	FUERZA APLICADA (KN)	FUERZA APLICADA (KG)		ESFUERZO (KG/CM2)	ESPERADO (KG(CM2)			
HORMIGÓN 1	3768	205.66	206.29	206.8	206.3	103.35	104.13	103.74	10.37	219.9	22423.20	84.52	265.29	216	2.16	271.53	2
HORMIGÓN 2	3771	204.66	205.42	206.26	205.4	102.52	102.81	102.67	10.27	225.5	22994.24	82.78	277.77	216	2.22		3

En la Fig.28, se observa la probeta en la prensa donde se realizó el ensayo a compresión a los 28 días.



Fig. 38. Ensayo a compresión 28 días.

En la Tabla 25 podemos observar los resultados obtenidos al someterlos a ensayo de compresión a los 28 días donde se ensayó dos probetas y se obtuvo el promedio.

Tabla 25

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 28 DÍAS																	
MUESTRA	PESO (G)	ALTURAS				DIÁMETROS				FUERZA		ÁREA	ESFUERZO		DENSIDAD (G/CM3)	ESFUERZO PROMEDIO REAL (KG/CM2)	TIPO DE FALLA
		ALTURA 1 (MM)	ALTURA 2 (MM)	ALTURA 3 (MM)	ALTURA PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO 1 (MM)	DIÁMETRO 2 (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (CM)	FUERZA APLICADA (KN)	FUERZA APLICADA (KG)	ÁREA (CM2)	ESFUERZO (KG/CM2)	ESPERADO (KG/CM2)			
HORMIGÓN1	3755	205.73	204.23	205.46	205.1	102.22	102.14	102.18	10.22	262.7	26787.52	82.00	326.67	240	2.23	312.82	2
HORMIGÓN 2	3720	201.78	202.11	203.35	202.4	103.54	103.01	103.28	10.33	245.6	25043.83	83.77	298.97	240	2.19		2

Se realiza el ensayo a flexión de las vigas, para la cual se prepara el espécimen, verificando sus dimensiones, se verifica en la Fig. 39.

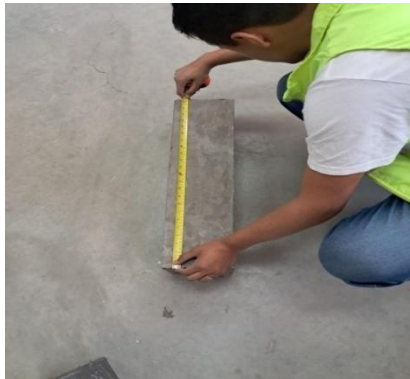


Fig. 39. Toma de medidas de la viga.

Posteriormente se coloca la viga en la máquina de ensayo y se verifica que los soportes estén bien nivelados como se observa en la Fig. 40.



Fig. 40. Nivelación de resortes.



Fig. 41. Colocación de viga en máquina de ensayo.

En la Fig. 42, se puede evidenciar una viga ya ensayada a flexión carga en tres puntos. Durante la aplicación de la carga, se generaron esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la probeta, provocando la formación y propagación de una fisura en la zona central de la viga.



Fig. 42. Viga ensayada a flexión.

En la Tabla 26 podemos observar los resultados obtenidos al someterlos a ensayo de flexión a los 28 días donde se ensayó dos vigas y se obtuvo el promedio.

Tabla 26

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS

RESISTENCIA A FLEXIÓN 28 DÍAS																			
MUESTRA	LONGITUD				SECCIÓN							FUERZA	ÁREA	ESFUERZO					
	LONGITU D 1 (CM)	LONGITU D 2 (CM)	LONGITU D 3 (CM)	LONGITUD PROMEDIO (CM)	BASE 1 (CM)	BASE 2 (CM)	BASE 3 (CM)	BASE 4 (CM)	BASE 5 (CM)	BASE 6 (CM)	BASE PROMEDIO (CM)					CARGA MAXIMA (KN)	ÁREA (CM2)	RESISTENCI A MAXIMA (MPA)	RESISTENCIA MAXIMA PROMEDIO (MPA)
HORMIGÓN1	59.8	59.5	59.6	59.6	14.7	15.0	14.9	14.9	14.90	15.00	14.90	22.013	222.01	1.101	1.20				
HORMIGÓN 2	60.2	60.1	60	60.1	15.1	15.2	15.3	15.3	15.30	15.40	15.27	25.851	233.07	1.293					

Para finalizar se realizó el ensayo a tracción de los cilindros, para lo cual el primer paso es verificar las dimensiones como se observa en la Fig. 43.



Fig. 43. Verificación de dimensiones del cilindro.

Una vez hecho esto se lo coloca en la máquina para ensayarlo, una prensa donde se puede realizar tanto el ensayo de flexión como ensayo de tracción, se lo puede ver en la Fig. 44.



Fig. 44. Colocación del cilindro en máquina de ensayo.

En la Fig. 45, se observa un cilindro ya ensayado a tracción se puede ver que tiene una rotura paralela a la dirección de aplicación de carga.



Fig. 45. Cilindro ensayado a tracción.

En la Tabla 27 podemos observar los resultados obtenidos al someterlos a ensayo de tracción a los 28 días donde se ensayó dos vigas y se obtuvo el promedio.

Tabla 27

RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO A TRACCIÓN

MUESTRA	PESO (G)	RESISTENCIA A TRACCIÓN 28 DÍAS													
		ALTURAS				DIÁMETROS				FUERZA		ÁREA	ESFUERZO	DENSIDAD (G/CM3)	RESISTENCIA MAXIMA PROMEDIO (MPA)
		ALTURA 1 (MM)	ALTURA 2 (MM)	ALTURA 3 (MM)	ALTURA PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO 1 (MM)	DIÁMETRO 2 (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (MM)	DIÁMETRO PROMEDIO (CM)	CARGA MAXIMA APLICADA (KN)	CARGA MAXIMA APLICADA (N)	ÁREA (CM2)	RESISTENCIA A MAXIMA (MPA)		
HORMIGÓN1	12182	301	300	300	300.3	152.96	152.77	152.87	15.29	105.648	105648.00	183.53	1.46	2.21	1.69
HORMIGÓN 2	11940	300	300	302	300.7	150.44	151.33	150.89	15.09	136.133	136133.00	178.81	1.91	2.22	