



**UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE
GUAYAQUIL**

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL EN MENCIÓN
GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN
TRABAJO DE TITULACIÓN**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE MAGÍSTER
EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN**

TEMA

**APLICACIÓN DEL USO DE LA CENIZA DE LA CASCARILLA DE
ARROZ PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE HORMIGÓN**

BURGOS GARCÍA DIEGO EFRÉN

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4906-253X>

TUTOR

Msc. Ing. KLEBER ALBERTO MOSCOSO RIERA

<https://orcid.org/0009-0002-5786-0151>

GUAYAQUIL-ECUADOR

2025



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS

TÍTULO Y SUBTÍTULO: Aplicación del uso de la ceniza de la cascarilla de arroz para la elaboración de bloques de hormigón

AUTOR/ES: Ing. Civil Diego Efrén Burgos García

REVISORES O TUTORES: Msc Ing. Kleber Alberto Moscoso Riera

INSTITUCIÓN: Universidad Laica Vicente ROCAFUERTE de Guayaquil

Grado obtenido: Magister en ingeniería Civil Mención de Gestión de la construcción

FACULTAD: Maestría en Ingeniería, Civil Sustentable

CARRERA: Ingeniería Civil

FECHA DE PUBLICACIÓN: 2025

N. DE PAGS: 113

ÁREAS TEMÁTICAS: Arquitectura y construcción

PALABRAS CLAVE: Arroz, Hormigón, Sostenibilidad, Ingeniería de la construcción.

RESUMEN: Se explora la viabilidad de utilizar ceniza de la cascarilla de arroz (CCA) en la fabricación de hormigón con una resistencia de 210 kg/cm². Este subproducto de la industria arroceras es un material que ofrece beneficios tanto ambientales como estructurales, al reducir el uso de cemento y, por ende, disminuir las emisiones de CO₂. El estudio analiza las propiedades físicas y químicas de la ceniza, destacando su actividad puzolánica, la cual contribuye a la mejora de la resistencia a la compresión del hormigón y su durabilidad frente a agentes corrosivos. La investigación incluye la evaluación de diferentes porcentajes de ceniza en la mezcla de hormigón y su impacto en las propiedades mecánicas, con pruebas de laboratorio que demuestran que la

adición de CCA puede reemplazar hasta un 10% del cemento sin comprometer la calidad del hormigón. Además, se hace un análisis comparativo entre las propiedades del hormigón tradicional y el modificado con ceniza, obteniendo resultados favorables para este último en términos de resistencia y sostenibilidad. La inclusión de CCA también se alinea con las tendencias de construcción ecológica, promoviendo la reutilización de residuos industriales y la reducción del impacto ambiental de la construcción.

N. DE REGISTRO (en base de datos):

N. DE CLASIFICACIÓN:

DIRECCIÓN URL (tesis en la web):

ADJUNTO PDF:

SI

NO

CONTACTO CON AUTOR/ES:

Teléfono:

0967753413

E-mail:

dburgosg@ulvr.edu.ec

CONTACTO EN LA INSTITUCIÓN:

Mg. Eva Marjoriet Guerrero López, PhD

Teléfono: (04)2596500 **Ext.** 170

E-mail: eguerrero@ulvr.edu.ec

Director de Carrera Mg.Ing. Civil Kleber Alberto Moscoso Riera

Teléfono: (04) 2596500 **Ext.** 170 **E-mail:**

Kmosco@ulvr.edu.ec

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD ACADÉMICA

TESIS BURGOS DIEGO V.F ok (1).docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

2%	7%	6%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	1%
2	Amrinder Singh, Anhad Singh Gill, Denise- Penelope N Kontoni. "Predicting the mechanical properties of concrete incorporating metakaolin, rice husk ash, and steel fibers using machine learning", Engineering Research Express, 2025 Publicación	1%
3	repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet	1%
4	elibrary.tsri.or.th Fuente de Internet	1%

Excluir citas Agregar Excluir considerencias + 1h
Excluir bibliografía Agregar



MGTR. KLEBER MOSCOSO RIERA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES

Yo, Burgos García Diego Efrén, declaro bajo juramento, que la autoría del presente proyecto de investigación, **APLICACIÓN DEL USO DE LA CENIZA DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE HORMIGÓN**, corresponde totalmente al suscrito y me responsabilizo con los criterios y opiniones científicas que en el mismo se declaran, como producto de la investigación realizada.

De la misma forma, cedo los derechos patrimoniales y de titularidad a la **Universidad Laica Vicente ROCAFUERTE de Guayaquil**, según lo establece la normativa vigente.

Autor

Firma: 

C.I. 1206412775

CERTIFICACIÓN DE ACEPTACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Proyecto de Investigación **APLICACIÓN DEL USO DE LA CENIZA DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE HORMIGÓN**, designado por el Consejo Directivo de la Facultad Ingeniería, Industria y construcción de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil.

CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado en todas sus partes el Proyecto de Investigación titulado: **APLICACIÓN DEL USO DE LA CENIZA DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE HORMIGÓN**, presentado por el estudiante Burgos García Diego Efrén como requisito previo, para optar al Título de **MAGISTER EN GESTION DE LA CONTRUCCION** encontrándose apto para su sustentación.

Firma:



Mg. Kléber Alberto Moscoso Riera

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre, por su incondicional apoyo y amor que me han motivado a lo largo de este proceso. A mis abuelos, quienes con su sabiduría y crianza han sido pilares fundamentales en mi vida. A la universidad laica, por brindarme un ambiente propicio para el aprendizaje y a todos los docentes que enriquecieron mi formación académica. Finalmente, agradezco al máster Kleber Moscoso, cuyo apoyo y orientación han sido esenciales para el desarrollo de este proyecto. Su contribución ha marcado una diferencia significativa en mi trayectoria.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios, por los triunfos alcanzados y por la fortaleza que me ha brindado en cada paso de este camino. A mi madre Paola García quien ha sido mi pilar inquebrantable, y a mi abuelita, que desde el cielo siempre me acompaña con su amor y sabiduría. A mi abuelo Hugo, por enseñarme los valores que han guiado mi vida, y a mi abuelo Manuel, por su gran apoyo en este proceso. A mi familia García, por protegerme y brindarme su amor incondicional. Finalmente, a mi Grace Vasquez, por su apoyo constante y por ser una fuente de inspiración en este proceso. Cada uno de ustedes ha sido fundamental en mi desarrollo personal y académico.

RESUMEN

La tesis explora la viabilidad de utilizar ceniza de la cascarilla de arroz (CCA) en la fabricación de hormigón con una resistencia de 210 kg/cm². Este subproducto de la industria arroceras es un material que ofrece beneficios tanto ambientales como estructurales, al reducir el uso de cemento y, por ende, disminuir las emisiones de CO₂. El estudio analiza las propiedades físicas y químicas de la ceniza, destacando su actividad puzolánica, la cual contribuye a la mejora de la resistencia a la compresión del hormigón y su durabilidad frente a agentes corrosivos. La investigación incluye la evaluación de diferentes porcentajes de ceniza en la mezcla de hormigón y su impacto en las propiedades mecánicas, con pruebas de laboratorio que demuestran que la adición de CCA puede reemplazar hasta un 10% del cemento sin comprometer la calidad del hormigón. Además, se hace un análisis comparativo entre las propiedades del hormigón tradicional y el modificado con ceniza, obteniendo resultados favorables para este último en términos de resistencia y sostenibilidad. La inclusión de CCA también se alinea con las tendencias de construcción ecológica, promoviendo la reutilización de residuos industriales y la reducción del impacto ambiental de la construcción.

Palabras clave: Arroz, Hormigón, Ingeniería de la construcción, Sostenibilidad.

ABSTRACT

This study investigates the potential use of rice husk ash (RHA) as a supplementary material in the production of concrete with a compressive strength of 210 kg/cm². This by-product of the rice industry is a material that offers both environmental and structural benefits, as it reduces the use of cement and thus CO₂ emissions. The study examines the physical and chemical properties of the ash, emphasizing its pozzolanic activity, which enhances the compressive strength of concrete and improves its durability against corrosive agents. The research encompasses an assessment of the influence of varying ash concentrations in the concrete mixture on its mechanical attributes. Laboratory investigations have demonstrated that the incorporation of CCA can substitute for up to 10% of the cementitious material without impairing the quality of the concrete. Furthermore, a comparative analysis is conducted between the properties of traditional and ash-modified concrete, with the latter exhibiting favorable results in terms of strength and sustainability. Furthermore, the incorporation of CCA is consistent with the prevailing trends in sustainable construction, whereby industrial waste is repurposed and the environmental impact of building projects is minimized.

Keywords: Rice, concrete, construction engineering, sustainability.

INDICE GENERAL

CAPITULO I.....	2
Diseño de la investigación	2
1.1. Tema	2
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Formulación del Problema	2
1.4. Objetivo general	3
1.5. Objetivo especifico	3
1.6. Hipótesis	3
1.7. Delimitación.....	3
1.8. Línea de Investigación Institucional/Facultad.....	4
CAPÍTULO II.....	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Teoría.....	6
2.2.1. Hormigón o Concreto.....	6
2.2.2. Propiedades del hormigón	7
2.3. Componentes del Hormigón.....	7
2.3.1. Cemento	7
2.4. Cemento portland y su clasificación:	8
2.4.1. Agregados Gruesos	10
2.4.2. Agregados Finos.....	12
2.5. Hormigón fresco	14
2.5.1. Trabajabilidad	15
2.5.2. Consistencia y cohesión	15
2.6. Requerimientos principales para el hormigón	17

2.7.	Relación agua/cemento (a/c).....	18
2.8.	Hormigón endurecido	19
2.8.1.	Contracción autógena.....	20
2.9.	Ceniza de la Cascarilla de Arroz (CCA)	21
2.9.1.	Origen y Producción de CCA.....	22
2.9.2.	Composición Química de la (CCA)	22
2.9.3.	Actividad puzolánica de la CCA	23
2.10.	Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA).....	25
2.11.	El impacto y efectos de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades del hormigón	26
2.11.1.	Efectos de la temperatura en el hormigón	28
2.11.2.	Aplicaciones de CCA en la Construcción	29
2.11.3.	Efectos en el Hormigón en sus Propiedades Mecánicas.....	30
2.11.4.	Sostenibilidad y Desafíos	31
2.12.	Bloque de hormigón.....	35
2.12.1.	Bloque de hormigón con CCA	35
2.13.	Marco Legal.....	36
CAPITULO III.....		39
3.1.	Enfoque de la investigación: Cuantitativo.....	39
3.2.	Alcance de la investigación: Correlacionado y Experimental	39
3.3.	Técnicas e instrumentos para obtener datos: Ensayos de laboratorio	40
3.4.	Población y Muestra.....	40
3.5.	Análisis de los resultados.....	41
3.5.1.	Rotura de los cilindros de hormigón.....	41
3.5.2.	Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'_c=210\text{kg/cm}$ en estado natural	46

3.5.3. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -5% de arena y +5% de ceniza	49
3.5.4. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -10% de arena y +10% de ceniza	52
3.5.5. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -5% de arena y +5% de ceniza (Segundo testigo)	55
3.5.6. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -10% de arena y +10% de ceniza (Segundo testigo)	58
CAPITULO IV	61
PROPUESTA	61
4.1. Título de la propuesta.....	61
4.2. Justificación de la propuesta	61
4.3. Objetivos	63
4.3.1. Objetivo General.....	63
4.3.2. Objetivos Específicos.....	63
4.4. Análisis comparativo de las resistencias a la compresión de los cilindros de concreto a diferentes edades.	63
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXO	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades del hormigón	7
Tabla 2 Obtención materias primas que componen el cemento	8
Tabla 3 Categorización y tipos del Cemento Portland	9
Tabla 4 Relación efectiva a/c; ACI 211.1-81 resistencia a compresión del hormigón	19
Tabla 5 Relación absoluta entre la relación a/c; norma ACI 318-83 resistencia a compresión del hormigón	19
Tabla 6 Protección y curado del hormigón en periodos	20
Tabla 7 Composición y propiedades químicas de la CCA	23
Tabla 8 Análisis de la CCA	24
Tabla 9 Índice de aceleración puzolánico para la CCA a temperatura ambiente (TA)	24
Tabla 10 Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA)	26
Tabla 11 Valores de relación agua/cemento, asentamiento y factor de compactación de las mezclas.....	27
Tabla 12 Informes sobre sostenibilidad en la aplicación de la CCA	32
Tabla 13 Contenido de las roturas de hormigón con y sin agregado de ceniza de cascarilla de arroz con porcentajes respectivos	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Datos técnicos de diferentes agregados gruesos	11
Figura 2 Datos técnicos de diferentes agregados finos.	13
Figura 3 Cono de Abrams.....	16
Figura 4 (a) Ceniza entregada; (b) ceniza después del quemado.	21
Figura 5 Curvas calorimétricas de la hidratación del cemento con un 30% en peso de aditivo	29
Figura 6 Cilindro en estado natural $f'c=210$ kg/cm	48
Figura 7 Cilindro -5% arena y +5% ceniza $f'c=210$ kg/cm.....	51
Figura 8 Cilindro -10% arena y +10% ceniza $f'c=210$ kg/cm.....	54
Figura 9 Cilindro -5% arena y +5% ceniza $f'c=210$ kg/cm (Segundo Testigo) ...	57
Figura 10 Cilindro -10% arena y +10% ceniza $f'c=210$ kg/cm (Segundo Testigo)	60
Figura 11 Gráfica final comparativa de resistencia a compresión de los cilindros de hormigón.....	64

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Resistencia a compresión (MPa) a los 7 y 28 días con sus porcentajes de incremento CCA	30
--	----

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Puesta del cilindro en la máquina de compresión.....	92
Anexo 2 Ruptura del cilindro de hormigón	93
Anexo 3 Análisis manual de los cilindros de hormigón sometidos a compresión	94
Anexo 4 Evidencia de los testigos sometidos a compresión.....	95
Anexo 5 Resultado de la compresión de testigo	96
Anexo 6 Fabricación del bloque de hormigón con cascarilla de arroz	97

INTRODUCCIÓN

El concreto, como uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizado en el mundo, ha sido objeto de constante investigación para mejorar sus propiedades y reducir su impacto ambiental. En este sentido, el uso de adiciones minerales ha surgido como una alternativa prometedora para optimizar las características mecánicas y sostenibles del hormigón.

La cascarilla de arroz, un subproducto de la industria agrícola ha captado la atención de los investigadores como una posible adición mineral en la producción de hormigón. La generación masiva de cascarilla de arroz representa un problema ambiental y de manejo de residuos, por lo que su reutilización en aplicaciones constructivas podría ofrecer una solución a este desafío y, al mismo tiempo, mejorar las propiedades del hormigón.

La finalidad de este estudio es verificar viabilidad y el potencial de la ceniza de la cascarilla de arroz como un material suplementario en la fabricación de hormigón de resistencia nominal de 210 kg/cm². Para lograr este objetivo, se llevará a cabo un exhaustivo análisis experimental, que incluirá la caracterización física y química de la ceniza, la evaluación de sus propiedades puzolánicas y la realización de pruebas mecánicas y de durabilidad del hormigón modificado.

CAPITULO I

Diseño de la investigación

1.1. Tema

Aplicación del uso de la ceniza de la cascarilla de arroz para la elaboración de bloques de hormigón

1.2. Planteamiento del Problema

El hormigón tradicional es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo debido a su versatilidad, resistencia y durabilidad. Sin embargo, presenta ciertos problemas físicos que limitan su desempeño en diversas aplicaciones. Entre los problemas más comunes se encuentran la baja resistencia a la fisuración, la baja durabilidad en ambientes agresivos y su contribución significativa a la huella de carbono debido a la alta emisión de CO₂ asociada a la producción de cemento, uno de los principales componentes del hormigón.

La ceniza de cascarilla de arroz es un subproducto de la industria del arroz y su uso como agregado en el hormigón ha demostrado ser prometedor en la mejora de ciertas propiedades del material. Aprovechar este subproducto puede contribuir a una reducción significativa de la cantidad de cemento necesaria durante la mezcla, lo que a su vez disminuiría la emisión de CO₂ la producción de hormigón. Además, la ceniza de cascarilla de arroz posee características puzolánicas, lo que significa que reacciona con el hidróxido de calcio generado durante el proceso de hidratación del cemento, formando compuestos adicionales que mejoran las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón

1.3. Formulación del Problema

¿De qué manera influye la adición de la ceniza de la cascarilla de arroz en la elaboración de hormigón de resistencia de 210Kg/cm²

1.4. **Objetivo general**

Diseñar un prototipo de hormigón mediante la utilización de la ceniza de la cascarilla de arroz.

1.5. **Objetivo específico**

- Determinar la dosificación óptima de ceniza de cascarilla de arroz en sustitución parcial del cemento, analizando su efecto en la resistencia mecánica y durabilidad del hormigón.
- Comparar el desempeño mecánico del hormigón con y sin ceniza de cascarilla de arroz mediante ensayos de resistencia a la compresión a diferentes edades de curado.
- Realizar un prototipo de hormigón con la adición de ceniza de cascarilla de arroz llegando a una resistencia de 210Kg/cm² para la fabricación de un bloque de hormigón.

1.6. **Hipótesis**

El uso de la ceniza de la cascarilla de arroz como material sustituto parcial del cemento en la elaboración de bloques de hormigón mejorará sus propiedades mecánicas y sostenibilidad, reduciendo costos y el impacto ambiental sin comprometer su resistencia y durabilidad.

1.7. **Delimitación**

Ubicación geográfica: La investigación se llevará a cabo específicamente en la ciudad de Babahoyo, capital de la provincia de Los Ríos, Ecuador. Babahoyo se selecciona como la ubicación principal debido a su relevancia como centro económico y de desarrollo de infraestructuras en la región.

Tipo de hormigón: El estudio se centrará en el hormigón de resistencia de 210 kg/cm², una categoría comúnmente utilizada en diversas aplicaciones constructivas, como cimientos, columnas y vigas, en la ciudad de Babahoyo.

Material de estudio: El enfoque estará en la ceniza de la cascarilla de arroz, un subproducto abundante de la industria arrocera local. La ceniza será recolectada de fuentes específicas en Babahoyo, asegurando la representatividad y factibilidad de su utilización en la producción de hormigón.

Proporciones de ceniza de cascarilla de arroz: Se analizarán diferentes porcentajes de adición de ceniza en la mezcla de hormigón, para determinar la proporción óptima que mejore las características del material sin comprometer su resistencia.

1.8. Línea de Investigación Institucional/Facultad.

Territorio, medio ambiente y materiales innovadores para la construcción.

La ceniza de la cascarilla de arroz, un residuo agrícola abundante en muchas regiones, representa una oportunidad para reducir el impacto ambiental de los materiales tradicionales como el cemento, cuyo proceso de producción es altamente contaminante. Al reutilizar este subproducto agrícola, se disminuye la generación de residuos, se promueve una economía circular y se valoriza un recurso que de otro modo sería desechado.

Además, la investigación contribuye al desarrollo de materiales innovadores, dado que se busca mejorar o mantener las propiedades físicas y mecánicas del hormigón convencional mediante la incorporación de la ceniza. Esto puede derivar en soluciones constructivas más económicas, ecológicas y adaptadas a las condiciones del territorio donde se genera el residuo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El hormigón, material directo de construcción principal en la industria constructiva, ha experimentado una constante evolución en términos de composición y propiedades. Haciendo su aparición entre 1850- 1880, dando inicio a la nueva era de la construcción (Levy, 1992; Bustillo Revuelta, 2021; Pronk, 2021). La búsqueda de alternativas sostenibles y económicamente viables para mejorar las características del hormigón ha sido un objetivo crucial en la investigación en ingeniería civil (Soutsos & Domone, 2017; Carrera Cevallos & Erazo Bazurto, 2022). En este contexto, la incorporación de adiciones y aditivos naturales se ha convertido en un enfoque importante para mejorar tanto las propiedades mecánicas como ambientales del hormigón (ASTM, 2023a).

Son diversos los métodos que han surgido para la conversión de la cascarilla de arroz a ceniza. Mehta (1973) hizo un estudio sobre el efecto de piro procesamiento en la reactividad puzolánica de la CCA. Por otro lado, con base en la investigación mencionada anteriormente, Pitt (1976) diseñó un horno con lecho fluidizado, el cual controla la combustión de la cascarilla de arroz. Por ende, cuando hay un control de la temperatura en el periodo de combustión y el de residencia dentro del mismo, se produce CCA con altos valores puzolánicos (Noaman et al., 2019). Son dos las formas existentes de la CCA, a saber, la CCA cristalina y la CCA amorfa tras el tratamiento térmico. La CCA amorfa es un material de origen puzolánico altamente reactivo, considerado adecuado para mezclas de cal-puzolana y para la sustitución del cemento portland (Saad et al., 2016; Camargo-Pérez et al., 2023). Del mismo modo el uso de la CCA se asocia a la resistencia a compresión (M.-H. Zhang & Malhotra, 1996), su permeabilidad (Ganesan et al., 2008), la durabilidad frente a la corrosión y otros aspectos clave de las propiedades del hormigón. Estos trabajos han demostrado resultados prometedores, pero también han destacado la importancia de ajustar las proporciones de CCA y las mezclas de hormigón para optimizar los beneficios sin comprometer la calidad del material (Bie et al., 2015; Abolhasani et al., 2022; Yao et al., 2022).

2.2. Teoría

2.2.1. Hormigón o Concreto

La fabricación de cemento conlleva la emisión de dióxido de carbono, lo que repercute negativamente en sus credenciales de sostenibilidad. Sin embargo, el hormigón ha ganado reconocimiento como material para la construcción sostenible debido a su durabilidad, resistencia a condiciones climáticas extremas y masa térmica (Georgopoulos & Minson, 2014). Dado el considerable aporte energético necesario para la producción de cemento, que constituye la base del hormigón moderno, podría afirmarse que, de hecho, este material se fabrica en lugar de extraerse. El hormigón se ha incluido en esta sección debido a su amplia historia en la industria de la construcción y a sus similitudes con otros materiales duraderos como la piedra y el ladrillo. Es una sustancia térmicamente masiva, lo que permite utilizarla para almacenar calor si se diseña adecuadamente. Además, los componentes primarios del hormigón, como la arena y la grava, se extraen de la tierra, al igual que la piedra caliza y la arcilla o pizarra que se mezclan y calientan para crear el cemento.

Surge de la combinación de cemento, agua, grava, arena y aditivos, lo que crea una mezcla conocida como hormigón (Pronk, 2021). Radica de forma esencial en un medio aglutinativo dentro del cual están incrustadas los fragmentos de agregado; el cemento Portland, su aglutinante es una composición de cemento Portland y agua (Gooch, 2007). Contando con una similitud a una roca similar bien cementada (Munro, 2018). Por otro lado, el hormigón es un material líder por más de un siglo, siendo en países que van en desarrollo como el segundo recurso más utilizado, siendo el agua el que ocupa el primer lugar (Poloju, 2022).

Este material se utiliza el doble que el resto de materiales de construcción: su uso es de tres toneladas/ persona/año (Baker, 2018). El cemento constituye solamente el 15% de la composición total del concreto, lo que lo convierte en el componente menos predominante en términos de volumen; no obstante, su presencia en la mezcla es de vital importancia. Se trata de un aditivo incorporado al concreto que cumple diversas funciones, como la reducción de la cantidad de agua, el fortalecimiento de la resistencia

y la mejora de la facilidad de manejo (Forero & Rodríguez, 2017; Sarta-Forero & Silva-Rodríguez, 2017).

2.2.2. *Propiedades del hormigón*

El hormigón, en la actualidad, es uno de los materiales de mayor resistencia (Bustillo Revuelta, 2021; Pronk, 2021), por otro lado la producción del mismo deja una huella ambiental enorme (Boscaro et al., 2021), sin embargo, este tipo de elaboración deja como consecuente las siguientes propiedades, las mismas que se puntualizan en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades del hormigón

Trabajabilidad	La facilidad de combinar los componentes y la capacidad de manipular, transportar y colocar la mezcla resultante sin experimentar una significativa pérdida de homogeneidad.
Durabilidad	La aptitud para soportar las inclemencias climáticas, la exposición a sustancias químicas y la abrasión a la que se verá sometido durante su utilización.
Impermeabilidad	Una característica significativa que a menudo se puede potenciar al disminuir la cantidad de agua en la combinación.

Elaborado por: Burgos (2023)

2.3. Componentes del Hormigón

2.3.1. *Cemento*

Actualmente, su representación es de los principales materiales de construcción, utilizado para viviendas, grandes edificios, puentes y alcantarillas. Según estudios, el cemento nació por el año 1600 a.C., tras una mezcla de caliza, agua, arena y áridos. Este nuevo material se puede moldear en húmedo, ya que al secarse se endurece (Rocha Álvarez et al., 2020). Estos materiales se los encuentran en canteras y se obtienen mediante explosiones controladas, este proceso se utiliza para los materiales duros como calizas, mientras que materiales blandos como arcillas se utilizan excavadoras e su extracción (Huang et al., 2021; Xiao et al., 2023; Asmara, 2024). Los cementos se utilizan en combinación con los áridos para producir hormigones, que a su

vez suelen reforzarse con acero para producir hormigón armado destinado a la construcción. acero para producir hormigón armado destinado a la construcción e infraestructuras (Provis, 2017).

El cemento es un componente fundamental del hormigón (si bien ocupa la menor proporción en volumen). Cuándo entra en etapa de hidratación, une los áridos entre sí; este proceso puede tener lugar tanto al aire como bajo el agua. Al minimizar la cantidad, esto ayuda a disminuir la cantidad de cemento, siendo ingrediente más caro de la mezcla, requiriendo una gran cantidad de energía en el periodo de fabricación (Setareh & Darvas, 2017). Hay muchos tipos diferentes de cementos, pero el cemento es el elemento al que se le da más uso en la producción de hormigón; cemento portland. Con cada tipo de cemento se producirá un hormigón con diferentes propiedades; por lo cual no se necesitarían cementos con propiedades especiales salvo que tengan requerimientos especiales Tabla 2.

Tabla 2 Obtención materias primas que componen el cemento

Obtención materias primas que componen el cemento	Trituración
	Pre-homogeneización
	Molienda y mezcla
	Fabricación del clínker en el Horno
	Enfriamiento del clínker
	Fabricación del cemento
	Almacenamiento
	Envasado y distribución

Elaborado por: Burgos (2023)

2.4. Cemento portland y su clasificación:

El cemento hidráulico se obtiene mediante la molienda de clínker, que está compuesto principalmente por silicatos cálcicos hidráulicos, y a menudo incluye una o más formas de sulfato cálcico como un componente adicional Tabla 3. La composición del cemento es la base de la división de los cementos en tipos: Portland, Escoria,

Puzolánico; los dos últimos con alta adición de escoria y puzolana, respectivamente. Las adiciones hidráulicas o puzolánicas hacen que las pastas de estos cementos tengan generalmente propiedades diferentes, en particular la velocidad de desarrollo de la resistencia (resistencia temprana), el calor de hidratación, la resistencia a los factores de corrosión (Young, 2001; ISO 22965-1:2007, 2007; ISO 1920-2:2016, 2016; Suleimanov et al., 2023).

Tabla 3 Categorización y tipos del Cemento Portland

Cemento	Tipo	Características	Descripción	Norma
Portland	Tipo I	Uso general	Cuando se producen estos cementos genera grandes cantidades de CO ₂ , debido a los cambios físico-químicos en su fabricación.	(ASTM, 2022)
	Tipo II y (MH)	Moderada resistencia a sulfatos y al calor de hidratación		
	Tipo III	Altas resistencias iniciales.		
	Tipo IV	Para lograr bajo calor de hidratación.		
	Tipo V	Alta resistencia a sulfatos.		
Hidráulicos compuestos	Tipo IP	Cemento portland puzolánico.	Este tipo de cementos generan una menor cantidad de CO ₂ en su proceso de producción, cumpliendo así con las teorías en durabilidad de cementos y el hormigón común.	(ASTM, 2023b)
	Tipo IS	Cemento portland de escoria de altos hornos.		
	Tipo IT	Cemento compuesto ternario.		
	Tipo GU	Cemento para uso general.	Este cemento prescinde limitaciones en la estructura química y del mismo modo, un requerimiento	
	Tipo HE	Cemento de alta resistencia temprana.		

Hidráulicos de desempeño	Tipo HS	Cemento de alta resistencia a los sulfatos.	en el cual se cumplan los diferentes niveles en lo que se va a desempeñar.
	Tipo MS	Cemento de moderada resistencia a los sulfatos.	(ASTM, 2023c)
	Tipo MH	Cemento de moderado calor de hidratación.	
	Tipo LH	Cemento de bajo calor de hidratación.	

Elaborado por: Burgos (2023)

2.4.1. Agregados Gruesos

Este tipo de material es principalmente grava triturada (Herrmann & Bucksch, 2014a; Kalra & Mehmood, 2018), así mismo, los diferentes tipos de muestreo y pruebas a realizar para el efecto en la resistencia de impurezas orgánicas (ASTM, 2023a), por otro lado, el agregado retenido se encontrará en el tamiz #4 (Holcim, 2023b). Los agregados gruesos son de dureza y resistencia, son integrales, que, en otras palabras, representa una fuerza estable ante diferentes tipos de agentes y la acción de congelamiento. Evidentemente deben de estar libres de cualquier índole impuro: (1) materia orgánica; (2) arcilla; (3) madera; etc., y para finalizar encontrarse en un buen gradado (Lin et al., 2023; Ma et al., 2023; Wang et al., 2023).

Siguiendo la misma línea, este agregado se lo utiliza en la fabricación de hormigón para vigas, columnas, muros, losas, etc., además como mejoramiento de suelo, hormigón rígido y flexible, del mismo modo, se debe de evitar que el agregado permanezca almacenado o a la intemperie por demasiado tiempo puesto que los diferentes agentes inducirían en sus diferentes condiciones para el que sea usado. Por lo que se debe de separar de los diferentes materiales y evitar un cambio en la granulometría del mismo y si es posible en un lugar que no sea afectado y evitar la contaminación del material (Reddy & Hemadri, 2022; Hatoum et al., 2023).

Figura 1 Datos técnicos de diferentes agregados gruesos

	Piedra # 57 (4,75 - 25 mm)	Piedra # 6 (5,5 - 19 mm)	Piedra # 67 (4,75 - 19 mm)	Piedra # 8 (2,36 - 9,5 mm)	Piedra # 4 (19 - 37,5 mm)	Piedra (0 - 150 mm)
Densidad SSS (kg/m ³)	2528	2645,4	2615,7	2573,9	2638	
Absorción (%)	4,1	2	2,7	3,7	2,2	
Abrasión (%)	26	26	26	27	24	
Masa Unitaria Suelta (Kg/m ³)	1512,8	1294,5	1294,5	1238,1	1310,4	1479
Masa Unitaria Compactada (Kg/m ³)	1446	1451,2	1451,2	1439		
Tamiz #200 (%)	1,1	1	1	1,7	0,3	
Partículas Livianas (%)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Desgaste a los Sulfatos (%)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Terrones de Arcilla (%)	0,07	0,08	0,08	0,09	0,07	0,07
Equivalente de Arena (%)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Impurezas Orgánicas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Azul de Metileno (mg/g)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Reactividad Alcali - Silice (%)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Límite Líquido	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Límite de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP
CRB (%)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Humedad Óptima (%)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: Holcim (2023b)

La Figura 1 compara propiedades físicas y mecánicas de diferentes tipos de agregados utilizados en construcción, clasificados por tamaños de partículas. Se destacan las siguientes propiedades:

- **Densidad SSS (kg/m³):** La densidad en estado saturado varía entre 2528 y 2638 kg/m³.
- **Absorción (%):** Varía entre 2% y 4.1%, indicando la capacidad de retener agua.
- **Abrasión (%):** Resistencia al desgaste por fricción, constante en 26%-27%.

- **Masa Unitaria Suelta/Compactada (kg/m³):** La densidad suelta va de 1238 a 1512 kg/m³, mientras que la compactada oscila entre 1439 y 1479 kg/m³.
- **Tamiz #200 (%):** Cantidad de partículas finas menores a 0.075 mm, que varía entre 0.1% y 1.7%.
- **Terrones de Arcilla (%):** Contenido de arcilla, entre 0.07% y 0.09%.
- **Desgaste a Sulfatos (%):** Consistente en 2.3%, indicando resistencia química.

2.4.2. Agregados Finos

Los agregados finos, son producto del desintegrado de la de la roca; agregados donde las partículas más grandes son capaces de pasar a través de un determinado tamiz numerado de 4,76 mm, o ¼ a 3/16 pulgadas (Manutchehr-Danai, 2009); así mismo, los agregados finos se someten a cinco ciclos del ensayo de solidez, el mismo tendrá una pérdida media ponderada requerida (ASTM, 2023a). Del mismo modo, en la manufactura de la arena, este material pasa por entre tres o más procesos de trituración y granulometría entre 0 y 4.75 mm (...), satisfaciendo: (1) mezclas asfálticas; (2) adoquines; (3) bloques; etc. (Holcim, 2023a), por lo que deben de contener dureza y resistencia, íntegros y soportar cualquier índole de agentes atmosféricos, libres de impurezas: (1) materia orgánica; (2) polvo y (3) cloruros, que no tenga reacción alguna con los álcalis, que no sean planas ni alongadas y sobretodo tener un buen gradado (Zhu et al., 2019; Prasanth et al., 2023; Alrashidi & Almutairi, 2024).

Siguiendo la misma línea, este tipo de agregados es usado en la fabricación de hormigón para columnas, vigas, muros, losas, además de los prefabricados que son de dimensiones pequeñas (Fournari et al., 2015), del mismo modo se debe de evitar que este material sea contaminado con algún otro por lo que su almacenamiento debe de ser aislado (Rifa et al., 2023). Evitando que se vean cambios en su granulometría y la pérdida del mismo no se debe de haber un almacenamiento mayor a cuatro metros en su altura; y si existe maquinaria tampoco debe de estar cerca del material para evitar su contaminación (Eun Kim et al., 2023). Este material es perfecto para la mezcla del hormigón, debido a su uso eficiente y su gradado, permitiendo que no exista espacios

vacíos y ser colmados por el cemento (Persson, 1998; Kirthika et al., 2019; Kuity & Das, 2020; Mayank et al., 2022; Hamada et al., 2022).

Figura 2 Datos técnicos de diferentes agregados finos.

	Arena no lavada	Arena no lavada ROSADA	Arena azul EN SACO
Densidad SSS (kg/m ³)	2529,6	2441,9	2529,6
Absorción (%)	4,8	6,5	4,8
Masa Unitaria Suelta (Kg/m ³)	1512,8	1501,3	1512,8
Masa Unitaria Compactada (Kg/m ³)	1746,2	1734,5	1746,2
Tamiz #200 (%)	12,4	14,1	12,4
Partículas Livianas (%)	0,19	0,4	0,19
Desgaste a los Sulfatos (%)	4,7	4,7	4,7
Terrones de Arcilla (%)	0,46	0,56	0,46
Equivalente de Arena (%)	79	77	79
Impurezas Orgánicas	0	1	0
Azul de Metileno (mg/g)	1,1	1,1	1,1
Reactividad Alkali - Silice (%)	0,062	0,062	0,062
Límite Líquido	NP	NP	NP
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP
Límite de Plasticidad	NP	NP	NP

Fuente: Holcim (2023a)

La Figura 2 compara tres tipos de arena (no lavada, no lavada rosada, y granel en saco) y presenta varias propiedades físicas y mecánicas. A continuación, se destacan los parámetros más relevantes:

- **Densidad SSS (kg/m³):** La densidad saturada varía ligeramente entre 2529.6 y 2441.9 kg/m³.

- **Absorción (%):** La arena no lavada rosada tiene la absorción más alta (6.5%), mientras que las otras arenas tienen 4.8%.
- **Masa Unitaria Suelta/Compactada (kg/m³):** La densidad en estado suelto varía de 1501.3 a 1512.8 kg/m³, mientras que compactada oscila entre 1734.5 y 1746.2 kg/m³.
- **Tamiz #200 (%):** Proporción de partículas finas menores de 0.075 mm varía entre 12.4% y 14.1%.
- **Partículas Livianas (%):** La arena no lavada rosada tiene un mayor contenido de partículas livianas (0.4%), mientras que las otras tienen 0.19%.
- **Desgaste a los Sulfatos (%):** Todas las arenas tienen la misma resistencia al sulfato (4.7%).
- **Terrones de Arcilla (%):** La arena rosada presenta un valor más alto (0.56%) en comparación con las otras arenas (0.46%).
- **Equivalente de Arena:** Similar en todas, con valores de 77-79, lo que indica la proporción de arena limpia en la muestra.
- **Impurezas Orgánicas:** La arena no lavada rosada tiene una presencia de impurezas orgánicas (1), mientras que las otras no las presentan.
- **Azul de Metileno (mg/g):** Constante en 1.1 mg/g para todas las arenas, indicando la cantidad de partículas arcillosas.
- **Reactividad Álcali-Sílice (%):** Presenta valores similares de 0.062%, indicando un bajo riesgo de expansión por reacción álcali-sílice.

2.5. Hormigón fresco

Los hormigones frescos, al igual que muchos materiales en la industria o en la naturaleza, se comportan como fluidos de tensión de fluencia (Hu & de Larrard, 1996). Por lo tanto, existe un valor mínimo de la tensión aplicada al material para que se produzca una deformación y un flujo irreversibles (Murata, 1984). Consecuentemente, el comportamiento del hormigón fresco en estado estacionario a menudo se aproxima mediante un modelo de límite elástico (De Larrard, 1999; Z. Li et al., 2022). El punto práctico como la trabajabilidad, este límite se asocia a la capacidad de llenado, por consiguiente, el mismo fluirá o dejará de fluir bajo una tensión aplicada, por ende, la

plasticidad se asocia a la velocidad que influirá en el hormigón una vez que se dé el inicio del flujo (Fan et al., 2023; Kong & Kurumisawa, 2023; T. Li et al., 2023).

Se debe de tener en cuenta que, cuando se da la colada de hormigón, a diferencia de la colada de polímeros o metales, la tensión aplicada e debe principalmente a la gravedad. Aunque el periodo en estado fresco tiene una duración más corta comparado con la vida útil total, sinnúmero de operaciones se llevan a cabo en este estado, es decir, (1) mezclado, (2) transporte, (3) compactación y (4) curado; el hormigón en estado fresco tiene comportamiento influyente en la calidad de la estructura de hormigón. Debido a esto se afecta: (1) grado de compactación, (2) resistencia, (3) homogeneidad, (4) aspecto de sus superficies, (5) impermeabilidad, etc. Una de las propiedades esenciales del hormigón en estado fresco es la trabajabilidad, el mismo que establece la facilidad con la que se puede hacer la colación el hormigón. Otras propiedades importantes en ese estado son la densidad, el contenido de aire, el tiempo de fraguado y la resistencia a la segregación.

2.5.1. *Trabajabilidad*

La ASTM C125 define la trabajabilidad del concreto como la característica que establece la fuerza necesaria para manejar una cantidad de concreto recién mezclado sin que se produzca una pérdida significativa de su uniformidad o homogeneidad (ASTM, 2021). El término «trabajabilidad» en relación con el hormigón fresco puede definirse como la cantidad de trabajo mecánico o energía que se necesita para lograr la compactación completa del hormigón sin ninguna forma de segregación (Mindess et al., 2003).

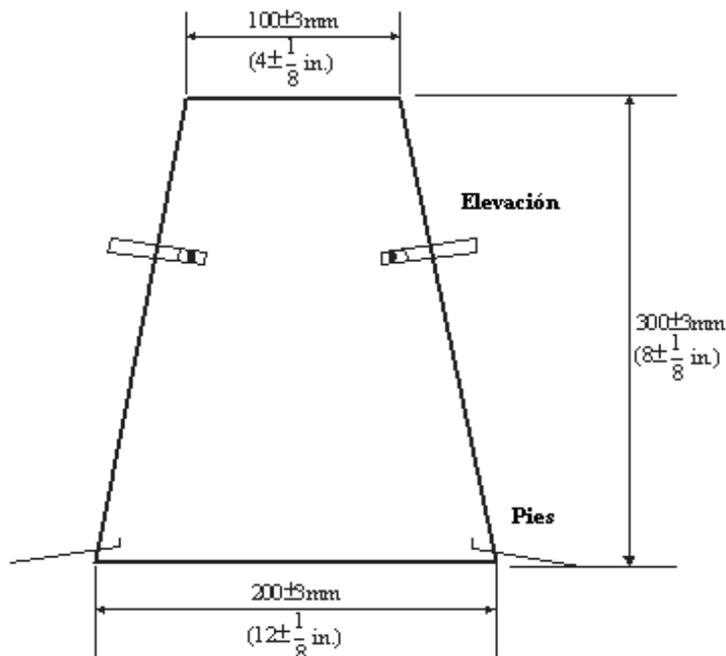
2.5.2. *Consistencia y cohesión*

La consistencia se refiere a la fluidez del concreto fresco, en tanto que la cohesión se relaciona con su capacidad para mantener de forma uniforme todos sus componentes juntos (Garnier et al., 2013). De forma tradicional, se han utilizado diferentes métodos para evaluar la consistencia del concreto fresco, como la prueba del cono de asentamiento, el factor de compactación o la prueba del factor de compactación de penetración de bola. Estos métodos se utilizan como indicadores simples de la fluidez

del concreto recién mezclado. La cohesión, por su parte, puede ser caracterizada mediante la prueba de Vebe, que sirve como un indicador tanto de la capacidad del concreto fresco para retener el agua (evitando la exudación) como de su habilidad para mantener uniformemente los agregados gruesos (previniendo la segregación) en una mezcla plástica de concreto (Chhorn & Lee, 2017; Vahedifard et al., 2010; Zhong et al., 2022). La fluidez del hormigón fresco influye en el esfuerzo necesario para la compactación.

La facilidad de fluidez se correlaciona directamente con la cantidad de esfuerzo necesario para la compactación (Armado, 2000). El hormigón auto compactante de tipo líquido puede anular totalmente la necesidad de compactación (Jimenez, Garcia, & Moran). Es de suma importancia que el hormigón sea suficientemente cohesivo para asegurar que todos los constituyentes, en particular los áridos gruesos, se distribuyan uniformemente a lo largo del proceso de colocación. Sin embargo, es esencial que el hormigón presente una cohesión suficiente para garantizar la distribución uniforme de todos los constituyentes, en particular los áridos gruesos, a lo largo del proceso de colocación (Bascoy & Fornasier, 2013).

Figura 3 Cono de Abrams



Elaborado por: Burgos (2023)

2.6. Requerimientos principales para el hormigón

La principalidad del objetivo del diseño de la mezcla es la obtención de un producto el cual funcione de acuerdo con los requisitos predeterminados. Estos requisitos incluyen las siguientes propiedades concretas.

a) **Calidad (resistencia y durabilidad):** La relación entre la resistencia y la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada se establece a través de la porosidad capilar, que a su vez está influenciada por factores como la relación agua/cemento y el nivel de hidratación. Dado que la durabilidad del hormigón se ve principalmente afectada por su nivel de permeabilidad, se establece una correlación entre la resistencia del material y su durabilidad general.

En consecuencia, el diseño convencional de las mezclas a menudo se enfoca exclusivamente en lograr la resistencia deseada y la trabajabilidad. Sin embargo, en situaciones en las que el concreto estará expuesto a condiciones ambientales especiales, se toman en consideración disposiciones relacionadas con la durabilidad, como limitar la relación agua/cemento, establecer un contenido mínimo de cemento o garantizar un recubrimiento mínimo para la armadura de acero.

b) **Trabajabilidad:** Como ya se explica en el punto 2.5.1, la trabajabilidad es un concepto complicado para el hormigón fresco y engloba varias propiedades, entre ellas la consistencia y la cohesividad. Aún no existe un único método de ensayo que pueda reflejar plenamente la trabajabilidad. Dado que el asentamiento representa la facilidad con la que la mezcla de hormigón fluirá durante la colocación, y que el ensayo de asentamiento es simple y cuantitativo, la mayoría de los procedimientos de diseño de mezclas se basan en el asentamiento como un índice bruto de trabajabilidad.

c) **Economía:** Entre todos los elementos que componen el hormigón, los aditivos son los que tienen un mayor costo unitario, seguidos por el cemento. Los áridos, por su parte, representan aproximadamente una décima parte del costo del cemento. Los aditivos suelen emplearse en pequeñas cantidades o son indispensables para alcanzar propiedades específicas. Para reducir el coste

global del hormigón, es esencial tener en cuenta el gasto asociado al material cementante. Por lo tanto, es importante tomar todas las medidas posibles para la reducción de la cantidad de cemento en una mezcla de hormigón sin comprometer las propiedades deseadas, como la resistencia y la durabilidad.

Por otra parte, el potencial de reducción de costes puede ampliarse incorporando materiales alternativos y rentables en lugar de cemento Portland. Por ejemplo, cenizas volantes o escoria molida de alto horno. Como se ha indicado anteriormente, en circunstancias normales, basta con tener en cuenta la trabajabilidad y la resistencia a la hora de diseñar el hormigón. En caso de condiciones especiales, deben tenerse en cuenta las consideraciones relativas a la durabilidad.

2.7. Relación agua/cemento (a/c)

Aunque la relación agua/cemento (a/c) puede estimarse a partir de la ley de Abram, basada en la resistencia proyectada del hormigón, en el diseño del hormigón, la relación agua/cemento necesaria para producir una determinada resistencia media a compresión suele determinarse a partir de relaciones previamente establecidas para mezclas hechas con ingredientes similares, o realizando ensayos con mezclas de prueba hechas con los ingredientes reales que se van a utilizar en la construcción, incluidos los aditivos (Y. Wang et al., 2017; Maksimova et al., 2021). Las relaciones mencionadas pueden resumirse en forma de cuadros o gráficos. Las Tablas 4 y 5 sirven para ilustrar este punto. Estas tablas pueden utilizarse para estimar la relación aproximada agua/cemento de los cementos proporcionados para cada conjunto de valores como punto de partida (Im et al., 2023).

Cabe destacar que la relación agua/cemento seleccionada en función de la resistencia también es satisfactoria para los requisitos de durabilidad (Gu et al., 1994). Además, esta relación agua/cemento para la durabilidad debe establecerse antes de comenzar el diseño estructural porque, si es inferior a la necesaria por consideraciones estructurales, puede aprovecharse la ventaja del uso de una mayor resistencia del hormigón en los cálculos de diseño. cálculos de diseño.

Tabla 4 Relación efectiva a/c; ACI 211.1-81 resistencia a compresión del hormigón

Resistencia compresión: 28 días (MPa)	media a	Relación efectiva agua/cemento	
		Hormigón sin aireación	Hormigón con aire
45		0.38	-
40		0.43	-
35		0.48	0.40
30		0.55	0.48
25		0.62	0.53
20		0.70	0.61
15		0.80	0.71

Elaborador por: Burgos (2023)

Tabla 5 Relación absoluta entre la relación a/c; norma ACI 318-83 resistencia a compresión del hormigón

Resistencia compresión: 28 días ^a (MPa)	específica a	Relación absoluta agua/cemento	
		Hormigón sin aireación	Hormigón con aire
30		0.40	-
25		0.50	0.39
20		0.60	0.49
17		0.66	0.54

Elaborador por: Burgos (2023)

2.8. Hormigón endurecido

Mediante el proceso de hidratación, el concreto experimentará una transición desde una fase líquida hasta una fase plástica, culminando en un estado sólido endurecido. En su estado endurecido, el concreto se encuentra listo para resistir cargas externas y funcionar como un componente estructural. Las características esenciales del concreto endurecido abarcan diversas medidas de resistencia, estabilidad dimensional, relación completa entre tensión y deformación, diversos módulos y relaciones de Poisson, así como su durabilidad (He et al., 2022; Ghasabeh & Göktepe, 2023).

2.8.1. Contracción autógena

El término retracción autógena se utiliza para describir la reducción macroscópica del volumen del hormigón que se produce en una fase temprana del proceso de hidratación, normalmente en las primeras 24 horas tras el vertido. Este fenómeno se caracteriza por la ausencia de transferencia de humedad del hormigón al entorno circundante. El fenómeno de la retracción autógena puede atribuirse al proceso de auto secado que se produce como resultado de la hidratación del cemento. Es una forma de retracción química (Gowripalan, 2020; Schlangen et al., 2023).

La contracción autógena fue descrita por primera vez en la década de 1930 por (Lynam, 1934) como un factor que contribuye a la contracción total. Sin embargo, en los primeros tiempos, se observó que la contracción autógena sólo se producía con relaciones agua/cemento muy bajas, muy por debajo del rango práctico agua/cemento, y no llamaba mucho la atención. Con el desarrollo y aplicaciones de aditivos avanzados como los súper plastificantes, las relaciones agua/cementos inferiores a 0,42 y la retracción autógena se ha convertido en una cuestión importante para el hormigón actual. hormigón contemporáneo. Esta cuestión se ha ampliado aún más con la incorporación de humo de sílice en las mezclas de hormigón (Francinete et al., 2020; Jensen, 2020). Así mismo, para reducir la retracción plástica se recomienda los periodos de curado y de protección como lo indica la Tabla 6.

Tabla 6 Protección y curado del hormigón en periodos

			Periodo mínimo de curado y protección	
			Temperatura media de la superficie del hormigón	
Tipo de cemento	Condiciones ambientales	posteriormente de la fundición	5 a 10°C	Sobre los 10°C
Cemento Portland; CPP RS	Promedio		4 días	3 días
	Pobre		6 días	4 días
	Promedio		6 días	4 días

Todos a excepción del cemento portland; CPP RS y todos que tengan EGAH o PFA	Pobre	6 días	4 días
--	-------	--------	--------

Resto de cementos	Bien	Ningún requerimiento especial	
-------------------	------	-------------------------------	--

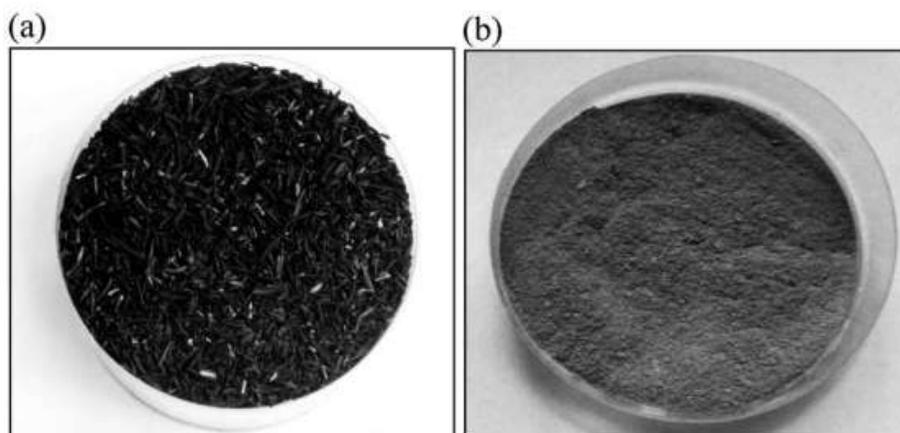
*Nota: CPP RS: Cemento Portland resistente a sulfatos; EGAH: Escoria granulada de alto horno molida; PFA: cenizas de combustible pulverizadas.

Elaborado por: Burgos (2023)

2.9. Ceniza de la Cascarilla de Arroz (CCA)

Este elemento es un subproducto de la industria del arroz que ha ganado un interés significativo en la industria constructiva, gracias a sus propiedades puzolánicas y su potencial para optimizar las diferentes características del hormigón. El manejo de CCA en el diseño de mezclas de hormigón se ha transformado en un área de investigación significativa en la búsqueda de soluciones sostenibles y económicamente viables para la construcción (Ye Guang and Huang, 2018; Gupta Deepak and Kumar, 2019; Ogbuefi et al., 2020). La CCA no solo reduce la huella de carbono en la producción de cemento, al sustituir parte del mismo, sino que también mejora ciertas características del hormigón, como su resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a agentes agresivos. Además, su utilización contribuye a la gestión de residuos agroindustriales, alineándose con la búsqueda de soluciones constructivas más sostenibles y económicas.

Figura 4 (a) Ceniza entregada; (b) ceniza después del quemado.



Fuente: Della et al. (2002)

2.9.1. Origen y Producción de CCA

El subproducto de la industria del procesamiento del arroz, se genera durante la eliminación de la capa externa del grano de arroz (Jauberthie et al., 2000). Esta cascarilla se quema a temperaturas elevadas en plantas de energía de biomasa o en hornos específicos para producir la ceniza de la cascarilla de arroz (CCA) (Goodman, 2020). La CCA resultante se recoge y procesa para su uso en diversas aplicaciones, incluida la construcción. Solo en China la cascarilla de arroz sobrepasa las 41.64 millones de toneladas, suponiendo un problema en la industria molinera del arroz. Las propiedades intrínsecas de estos materiales, como su superficie dura, su escaso valor nutritivo, su alto contenido en silicio, su baja densidad aparente y su difícil descomposición por las bacterias, dificultan su utilización eficaz (Mihret et al., 2023). El tratamiento anterior de la materia orgánica reciclable, que incluía la quema in situ para producir vapor o electricidad, el vertido a cielo abierto o el vertido en vertederos, también provocaba una grave contaminación ambiental, como smog, polvo y efecto invernadero (Kuan et al., 2012; Soltani et al., 2015). No obstante, cabe señalar que la combustión de la cáscara de arroz da lugar a la generación de cantidades significativas de ceniza de cáscara de arroz, que también podría actuar como contaminante potencial. Por lo tanto, es importante utilizar la CA/ CCA de manera integral y eficiente (Kumar Das et al., 2022; Kanagavel et al., 2023).

2.9.2. Composición Química de la (CCA)

La CCA es rica en sílice (SiO_2) amorfa y contiene una variedad de otros compuestos, como óxidos de aluminio, hierro, calcio y potasio. La presencia de sílice amorfa es fundamental, ya que es esta sílice lo que hace reaccionar con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) liberado durante la fase de hidratación del cemento Portland, formando productos adicionales de hidratación que mejoran tanto su resistencia como la durabilidad del hormigón. La principal característica de la CCA es su actividad pozolánica, que le permite reaccionar químicamente con el Ca(OH)_2 en el hormigón para formar compuestos como la sílice gel y la C-S-H (calcio-silicato-hidratado). Esta reacción contribuye a la mejora de la resistencia, durabilidad y resistencia a la corrosión del hormigón (Amin et al., 2023; Y. Huang et al., 2023). La Tabla 7 detalla los diferentes tipos

de elementos químicos que cuenta la CCA, los mismos que están sustentados por diversos estudios.

Tabla 7 Composición y propiedades químicas de la CCA

Estudio	Componentes químicos (%)							
	(SiO ₂)	(Al ₂ O ₃)	(Fe ₂ O ₃)	(CaO)	(MgO)	(Na ₂ O)	(K ₂ O)	(SO ₃)
(Rêgo et al., 2015) ^a	87.08	<0.01	0.11	0.70	0.42	0.18	1.40	-
(Kannan & Ganesan, 2016)	87.89	0.19	0.28	0.73	0.47	0.66	3.43	-
(Chopra et al., 2015)	94.0	1.2	0.37	2.93	0.60	-	0.50	0.30
(Sua-iam & Makul, 2013)	93.44	0.21	0.18	0.76	0.43	0.05	1.98	0.16
(Farid & Zaheer, 2023)	77.19	6.19	3.65	2.88	1.45	-	1.82	-
(Della et al., 2002) ^b	94.95	0.39	0.26	0.54	0.90	0.25	0.94	-

*Nota: ^a Muestra de CCA molida durante 5 horas; ^b CCA después de quemarse.

Elaborado por: Burgos (2023)

2.9.3. Actividad puzolánica de la CCA

La CCA contiene una gran cantidad de sílice (SiO₂). Se ha demostrado que el uso de ceniza de cáscara de arroz bien quemada y molida mejora significativamente la resistencia y durabilidad del cemento y el hormigón, debido a su naturaleza altamente activa. La CCA sustituye hasta un 15% al cemento portland (Ganesan et al., 2008), por lo que una CCA de una finura alta mejora la resistencia a compresión, desarrollando morteros con una porosidad baja (Xu et al., 2016). El principal obstáculo para la utilización extensiva de este material como puzolana es su sensibilidad a las condiciones de combustión (Real et al., 1996; Massazza, 1998; Hewlett & Liska, 2019). Del mismo modo, (Jauberthie et al., 2000) en su investigación encontraron que la concentración de sílice es alta en la cara externa de la cáscara, al contrario en la cara interna es mucho más débil y prácticamente inexistente, como se indica en la Tabla 8. Para (Chakchouk et

al., 2006) en la actividad puzolánica, la temperatura de la calcinación, el tamaño y forma de las partículas y el tiempo de la calcinación son las variables que se contemplan.

Tabla 8 Análisis de la CCA

Elemento	Microanálisis de la cáscara de arroz		Microanálisis de superficie interior de la cáscara de arroz		Microanálisis de superficie interna de la cáscara de arroz	
	% (en peso)	% (en atómico)	% (en peso)	% (en atómico)	% (en peso)	% (en atómico)
C	6.91	11.11	62.54	69.54	30.20	40.93
O	47.93	57.84	35.19	29.38	42.53	43.27
Si	51.16	31.05	2.27	1.08	27.27	15.80
Total	100	100	100	100	100	100

Elaborado por: Burgos (2023)

La sílice amorfa se concentra en la superficie de la cáscara de arroz, en lugar de estar presente dentro de la propia cáscara. La sílice amorfa concentrada en las superficies interior y exterior de la cáscara no calcinada favorece una acción puzolánica en la superficie de la cáscara y, por tanto, permite su utilización en cemento/hormigón. Asimismo, Agarwal (2006) en su investigación estudió la actividad puzolánica acelerada de diversos materiales silíceos (...) Tabla 9, la resistencia a la compresión de los ensayos acelerados se comparó con los cilindros curados en agua a los 7 y 28 días. La máxima actividad se observó en el caso del CCA (<45 µm) lo que sugiere que la finura del material es un factor determinante para maximizar su reactividad en el hormigón.

Tabla 9 Índice de aceleración puzolánico para la CCA a temperatura ambiente (TA)

Sistema	Índice puzolánico acelerado (kg/cm ²)	Porcentaje control	de 7 días (TA) kg/cm ²	28 días (TA) (kg/cm ²)
Grado (CPO)	310	100%	250	360
CCA (1,2% LOI) (como recibido)	260	84%	140	260

Retención de paso 75 μm	340	110%	180	340
Retención de 45 μm	420	135%	240	390
< 45 μm	460	148%	240	415
CCA (13% LOI), 75μm	390	126%	260	400
CCA(20% LOI), 45 μm	380	123%	260	410

*Nota: Cemento Portland Ordinario (CPO); Pérdida en ignición (LOI); Ceniza de cascarilla de arroz (CCA); Temperatura ambiente (TA).

Elaborado por: Agarwal (2006).

2.10. Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA)

La CCA, un material puzolánico que se obtiene a partir de la quema a altas temperaturas de la cascarilla de arroz; es uno de los principales subproductos agrícolas (Siddika et al., 2018). Constituye el 20% de los 500 millones de toneladas de arroz con cáscara que se producen en el mundo (Chanu & Devi, 2013; Fapohunda et al., 2017; Raheem & Kareem, 2017; Al-Alwan et al., 2022).

- ✓ **Composición Química:** Formada por sílice amorfa, lo que le confiere propiedades puzolánicas al reaccionar con el hidróxido de calcio producido durante la etapa de hidratación del Portland.
- ✓ **Tamaño de Partícula:** La finura de las partículas de CCA es importante, ya que influye en su capacidad para llenar los espacios vacíos y mejorar la densidad del hormigón.
- ✓ **Puzolanicidad:** La reacción con los productos de hidratación del cemento es esencial para su efecto mejorador en el hormigón; contribuye a la formación de gel de sílice, que mejora la resistencia y durabilidad del hormigón

Del mismo modo que el punto 2.9.2 se detalla los compuestos químicos, con sustento de diversos estudios, la Tabla 10 detalla las propiedades de la CCA luego de la combustión completa.

Tabla 10 Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA)

Estudios	Propiedades			
	Tamaño medio de las partículas (μm)	Peso específico	Finura: paso de 45 μm (%)	Superficie específica (m^2/g)
(Kannan & Ganesan, 2016)	6.27	2.08	91	36.47
(Le et al., 2015)	5.7 - 15.6	-	-	23.36 - 25.21
(Sua-iam & Makul, 2013)	39.34	2.24	-	0.37
(Safiuddin et al., 2012)	6	2.1	-	2.33
(Habeeb & Mahmud, 2010)	11.5 – 63.8	-	-	25.3 – 30.4
(Ganesan et al., 2008)	3.80	2.06	99	36.47

*Nota: La CCA, debido a la combustión completa, se transforma en un material fino de color entre gris y blanco, mientras que la CCA parcialmente quemado es negruzco.

Elaborado por: Burgos (2023)

2.11. El impacto y efectos de la ceniza de cáscara de arroz en las propiedades del hormigón

La incorporación de partículas finas de ceniza de cáscara de arroz a las mezclas de hormigón mejora la cohesión y aumenta ligeramente la rigidez. El resultado es un menor asentamiento en las mezclas de hormigón que contienen ceniza de cáscara de arroz (Camargo-Pérez et al., 2023). Para garantizar la trabajabilidad continuada del hormigón, se recomienda utilizar aditivos reductores de agua en las mezclas de hormigón CCA (Rahman et al., 2014; Zareei et al., 2017; Mosaberpanah & Umar, 2020).

Un estudio realizado por Ikpong & Okpala (1992), en el cual investigaron el impacto de la incorporación de CCA en la trabajabilidad de los hormigones. El cemento se sustituyó parcialmente por RHA en concentraciones del 0%, 20%, 25% y 30%. La resistencia de diseño a 28 días de los hormigones fue de 20, 25, 30 y 40 N/mm². Por lo que concluyeron que: (1) si se quiere alcanzar el mismo nivel de trabajabilidad, las

mezclas que contenían CCA deben contener mayor contenido de agua a diferencia de las mezclas tradicionales. Esto se vio reflejado en la relación agua/cemento (0, 30 y 40% CCA); y (2) con variaciones pequeñas, de las que contenían mayor cantidad de agua en CCA comparando con las convencionales, la resistencia aumentaba. La Tabla 11 detalla los factores que figuran en el asentamiento y compactación.

Tabla 11 Valores de relación agua/cemento, asentamiento y factor de compactación de las mezclas

Resistencia de diseño (N/mm ²)	de CCA (%)	Relación agua/cemento	Asentamiento (mm)	Facto de compactación
20	0	0.80	40	0.926
	30	0.83	33	0.93
	40	0.85	35	0.92
25	0	0.69	35	0.89
	30	0.72	35	0.87
	40	0.75	37	0.92
30	0	0.59	50	0.92
	30	0.64	55	0.90
	40	0.65	35	0.89
40	0	0.54	50	0.90
	30	0.57	45	0.87
	40	0.61	45	0.91

Elaborado por: Burgos (2023)

El uso de CCA en la mezcla de hormigón puede tener varios efectos significativos en sus propiedades:

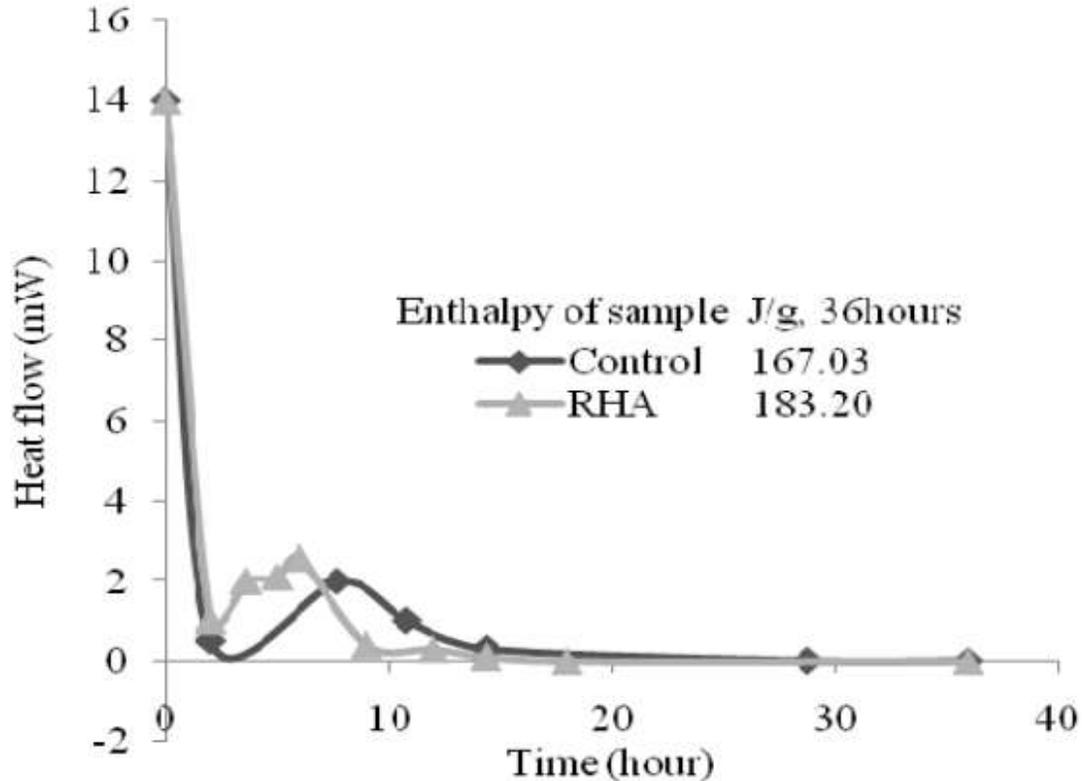
- **Aumento de la Resistencia Mecánica:** Estudios han demostrado que la incorporación de CCA puede aumentar la resistencia a la compresión y flexión del hormigón debido a la formación de productos de reacción adicionales.

- **Mejora de la Durabilidad:** La CCA puede reducir la permeabilidad del hormigón, disminuyendo así la entrada de agua y agentes agresivos, lo que mejora la durabilidad frente a la corrosión y el deterioro químico.
- **Reducción de la Temperatura de Hidratación:** La adición de CCA puede reducir la temperatura máxima de hidratación del hormigón, lo que es beneficioso en términos de control de la fisuración por calor.

2.11.1. *Efectos de la temperatura en el hormigón*

Cuando el cemento se encuentra en la fase de hidratación, se producen reacciones exotérmicas. Las fluctuaciones de temperatura que se producen entre el fraguado y el endurecimiento de la pasta de cemento pueden provocar retracciones, que a su vez dan lugar a la formación de grietas que pueden observarse en algunos proyectos de construcción (Aïtcin, 2016; L. Zhang et al., 2020). El cemento cuando se mezcla con materiales puzolánicos, el calor de hidratación es menor en comparación al cemento puro cuando está en el periodo de hidratación C_3S ; llamada fase alita (Mostafa & Brown, 2005) coincidiendo con el estudio de Q. Feng et al. (2004), en donde se hace la comparación entre los calores de hidratación en la muestra de control (cemento simple) con las muestras por sustitución parcial del cemento por materiales puzolánicos como se observa en la Figura 5, demostrando que el cemento añadido con CCA tiene mayor entalpía en comparación con el cemento base (en 36 h), sin embargo, W. Wang et al. (2017) afirman que la CCA aumenta la resistencia y la resistencia a la temperatura del hormigón. Después de 12 horas, para R. Liu et al. (2020) registra un aumento en el comportamiento térmico en la fase de hidratación siendo estos valores positivos; en el incremento en la generación de calor durante la hidratación del cemento mezclado con CCA podría ser resultado de: (1) la aceleración de la hidratación inicial, la cual se atribuye a la elevada área superficial específica del CCA (Olubajo et al., 2020) y (2) que es la reacción puzolánica (Sargent, 2015). Se resumen en que la actividad puzolánica tenga un aumento en la producción de calor por reacción a las actividades puzolánicas del hidróxido de calcio, no obstante, el efecto de dilución disminuye debido la producción de calor debido a los componentes del cemento (Dembovska et al., 2017).

Figura 5 Curvas calorimétricas de la hidratación del cemento con un 30% en peso de aditivo



Fuente: Q. Feng et al. (2004)

2.11.2. Aplicaciones de CCA en la Construcción

La ventaja de la CCA en la construcción actúa de forma eficaz para la sustitución de materiales de alto consumo energético (Mosaberpanah & Umar, 2020). De este modo, se cierra el ciclo ecológico verde y se contribuye a fomentar la economía circular en el sector de la construcción. La naturaleza de mejora de la durabilidad del CCA cuando se mezcla con cemento lo convierte en un material aditivo ecológico para el hormigón. Así pues, LA CCA puede ser un prometedor material sostenible para el sector de la construcción (Elakkiah, 2019; Amran et al., 2021; Hossain & Islam, 2022).

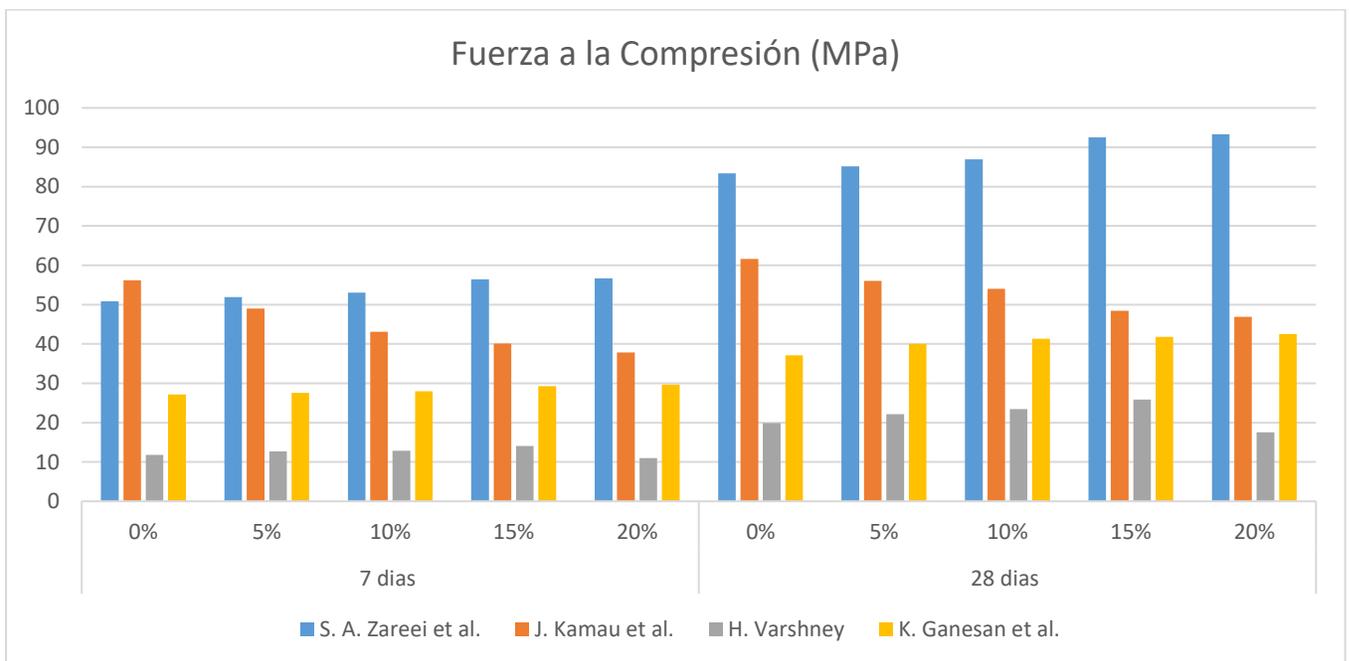
Además de sus beneficios medioambientales, la CCA mejora notablemente la durabilidad del hormigón al actuar como aditivo, ayudando a aumentar la resistencia a agentes agresivos, reducir la permeabilidad y mejorar la resistencia mecánica a largo plazo (Khan et al., 2012). Estas características lo posicionan como un material ecológico

y sostenible para el sector constructivo, alineándose con las tendencias globales hacia el uso de materiales que no solo sean eficientes, sino también respetuosos con el medio ambiente (Rêgo et al., 2015). Por ello, la CCA es vista como un material prometedor para el futuro de la construcción, ofreciendo tanto beneficios económicos al reducir el uso de cemento convencional como mejoras en el rendimiento del hormigón.

2.11.3. Efectos en el Hormigón en sus Propiedades Mecánicas

Diversos estudios manifiestan la resistencia a compresión del hormigón (MPa) con CCA, en sustitución parcial del cemento, esto a medida que la CCA va incrementando a cierto nivel (Ganesan et al., 2008; Varshney, 2016; Zareei et al., 2017; Kamau John et al., 2018) como se evidencia en el Grafico 2. En relación con el gráfico (Kamau John et al., 2018) testifica que el hormigón que presenta CCA es inferior a la resistencia a compresión de un hormigón tradicional (no contiene CCA). Por otro lado, la resistencia del hormigón con CCA a compresión en sustituto al cemento da un aumento hasta un cierto nivel (Varshney, 2016; Zareei et al., 2017; Siddika et al., 2018).

Gráfico 1 Resistencia a compresión (MPa) a los 7 y 28 días con sus porcentajes de incremento CCA



Fuente: Ganesan et al., 2008; Varshney, 2016; Zareei et al., 2017; Kamau John et al., (2018).

Elaborado por: Burgos (2023)

Los aditivos en el hormigón como la CCA y nanos materiales mejoran la durabilidad y las propiedades mecánicas del hormigón (Supit & Shaikh, 2015; Brzozowski et al., 2021), del mismo modo la fluidez del hormigón aumenta mediante el uso de los nano aditivos (Balapour et al., 2018; Behzadian & Shahrajabian, 2019) entre ellos se encuentran el nano-sílice y nano-alúmina, los cuales presentan una eficacia alta tanto en flexibilidad como en durabilidad y la resistencia (Barbhuiya et al., 2014; Mohseni et al., 2015).

2.11.4. Sostenibilidad y Desafíos

Mediante las referencias seleccionadas y una revisión de sostenibilidad en las diversas aplicaciones de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), se pudo identificar los impactos ambientales, económicos, sociales de su aplicación. La Tabla 12 presenta cual es el uso de la ceniza en diferentes aplicaciones sea tanto parcial o de forma total, los productos sustitutos; e identificación de las dimensiones de sostenibilidad (medioambiental, económico y social) que se consideraron para cada estudio.

En las diferentes referencias que se plantean en la Tabla 12, se dan resultados técnicos del producto, los cuales con relación al tiempo se reivindican las aplicaciones de sostenibilidad, ecológicas y sobre todo el respeto para con el medio ambiente de la CCA. Los diferentes autores informan de que la CCA en su utilización es todo un éxito dependiendo también de las diferentes aplicaciones en sabiendo de la viabilidad técnica. Por otro lado, algunos de estos trabajos de investigación dan una evaluación en los aspectos técnicos además de las evaluaciones medioambientales. Pocos son los estudios que dan una evaluación en el aspecto técnico, económico y ambiental de la CCA. La evaluación social para este producto es escasa.

A pesar de los éxitos reportados, hay una brecha en los estudios que abordan simultáneamente los aspectos técnicos, económicos y ambientales de la CCA. Aunque muchos investigadores han validado su desempeño técnico, pocas investigaciones han proporcionado una evaluación exhaustiva que abarque también el impacto económico, como los costos de producción, transporte y ahorro en materiales, así como los beneficios ambientales, como la reducción de emisiones y reutilización de residuos.

Tabla 12 Informes sobre sostenibilidad en la aplicación de la CCA

Aplicación	Parcial/ totalmente usado	Producto sustituido	Resultados técnicos	Resultados ambientales	Resultados económicos	Resultados sociales	Estudio
Hormigón de alto rendimiento	Parcial	Cemento portland	Reporte	-	Reporte	-	(Isaia, 2000)
Polvo de sílice	Totalmente usado	Sílice comercial	Reporte	-	-	-	(An et al., 2010)
Hormigón	Parcial	Cemento portland	Reporte	Reporte	-	-	(Gursel et al., 2016)
Sílice	Totalmente usado	Polvo de carbonato de sodio y cuarzo	Reporte	-	-	-	(Y. Liu et al., 2011)
Carbón activado	Totalmente usado	Carbón activado comercial	Reporte	-	-	-	(Y. Liu et al., 2011)
Estabilización con Pb y Zn	Totalmente usado	Absorbentes comerciales	Reporte	-	-	-	(Bosio et al., 2014)
Sílice porosa	Totalmente usado	Vaso de agua	Reporte	-	-	-	(Ahmad-Alyosef et al., 2014)
Acondicionador de suelos	Parcial	Fertilizante N	-	Reporte	-	-	(Prasara-A & Grant, 2011)
Ladrillo	Parcial	Arcilla	-	Reporte	-	-	(Prasara-A & Grant, 2011)
Bloque de hormigón	Parcial	Cemento portland	-	Reporte	-	-	(Prasara-A & Grant, 2011)

Hormigón	Parcial	Cemento portland	Reporte	-	-	-	(Zunino & Lopez, 2016)
Hormigón	Parcial	Cemento portland	Reporte	-	-	-	(Kizhakkumodom Venkatanarayanan & Rangaraju, 2015)
Revestimiento epoxi	Parcial	Pintura epoxi	Reporte	-	-	-	(Azadi et al., 2011)
Aislante	Totalmente usado	Aislante comercial	Reporte	Reporte	Reporte	-	(Balo, 2015)
Vidrio absorbente de calor	Totalmente usado	Arena	Reporte	-	-	-	(Berkin, 2008)
Ladrillo	Parcial	Arena natural	Reporte	-	-	-	(Hwang & Huynh, 2015)
Revestimiento de mortero	Parcial	Cemento portland	Reporte	Reporte	-	-	(Mendes Moraesa et al., 2010)
Hormigón	Parcial	Cemento portland	Reporte	-	-	-	(Antiohos et al., 2013)
Hormigón	Parcial	Cemento portland	Reporte	-	Reporte	-	(Khan et al., 2012)
Hormigón	Parcial	Cemento portland	Reporte	Reporte	-	-	(Rahman et al., 2014)
Tratamiento de aguas residuales de molinos de arroz	Totalmente usado	Absorbentes comerciales	Reporte	-	-	-	(Kumar et al., 2015)
Sílice blanca pura	Totalmente usado	Sílice comercial	Reporte	-	-	-	(Kumar et al., 2015)

Carbón vegetal	Totalmente usado	Carbón	Reporte	Reporte	Reporte	Reporte	(Shackley, Carter, Knowles, Middelink, Haefele, & Haszeldine, 2012; Shackley, Carter, Knowles, Middelink, Haefele, Sohi, et al., 2012)
Bloque de cemento y arena	Parcial	Ladrillo de arcilla	Reporte	-	Reporte	-	(Lertsatitthanakorn et al., 2009)

Elaborador por: Burgos (2023)

2.12. Bloque de hormigón

En la industria de la construcción, los bloques de hormigón son uno de los principales materiales. En la producción de bloques de Ho difiere del moldeado del hormigón convencional in situ (Špak et al., 2016); en este proceso, los materiales constituyentes se moldean con una carga compactada bajo vibración (Poon et al., 2002). Los áridos son uno de los componentes principales de los bloques de hormigón, con una proporción de hasta el 80% de su volumen. En consonancia con los hallazgos de Medina et al. (2012), en lo que se señalan la necesidad de abordar el impacto ambiental de los áridos convencionales, se ha puesto en marcha un proceso de reciclaje de diversos materiales de desecho. Estos han sido reutilizados en la fabricación de bloques de hormigón, lo que representa una significativa contribución a la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales.

2.12.1. *Bloque de hormigón con CCA*

La incorporación de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como material cementante suplementario en la producción de bloques de concreto ha demostrado mejorar sus propiedades mecánicas y su sostenibilidad ambiental (Subashi De Silva & Priyamali, 2022). Los resultados experimentales indican que un reemplazo óptimo del 15% de cemento por CCA proporciona una mejora significativa en la resistencia a la compresión, la absorción de agua y el módulo de elasticidad (Torkaman et al., 2014). Si bien un mayor contenido de CCA puede reducir la resistencia inicial debido a la naturaleza progresiva de la reacción puzolánica, a largo plazo contribuye a una microestructura más densa y duradera. Además, la reducción en el uso de cemento Portland mediante la incorporación de CCA no solo mitiga el impacto ambiental asociado a la producción de cemento, sino que también promueve la valorización de residuos agroindustriales en materiales de construcción avanzados.

2.13. Marco Legal

En base a la Constitución de la República del Ecuador, sección Hábitat y Vivienda, se menciona los siguientes artículos (Constitución de la República del Ecuador, 2008)

Artículo 30 y Artículo 31: Los ciudadanos ecuatorianos tienen el derecho de habitar en un entorno seguro y saludable, así como de acceder a una vivienda que satisfaga sus necesidades, además de disfrutar plenamente de los espacios públicos urbanos.

Artículo 66: Cada individuo tiene el derecho de vivir una vida digna, lo que incluye acceso a la salud, la alimentación y una vivienda apropiada.

Artículo 264.7: Los ciudadanos tienen derecho a la educación, la salud, los espacios públicos para la práctica deportiva, así como al avance en la investigación científica y la innovación tecnológica.

Artículo 350 y Artículo 385: La educación superior en Ecuador tiene como objetivo proporcionar una formación académica que promueva la producción nacional eficiente y productiva, con un enfoque en la ciencia y la tecnología.

Plan Nacional de Desarrollo Toda una Vida

(Plan Nacional de Desarrollo Toda una Vida, 2021) promueve la producción y el consumo responsables desde una perspectiva ambiental, destacando la importancia de la economía circular y la bio economía. Esto se logra mediante el estímulo al reciclaje y la lucha contra la obsolescencia programada. Asimismo, el plan fomenta el acceso libre de los estudiantes universitarios y futuros profesionales a la investigación, la formación, la capacitación, el desarrollo tecnológico, la innovación y el emprendimiento. Además, busca proteger la propiedad intelectual y promover el cambio a través de la colaboración entre el sector público, el sector productivo y las universidades.

Normativa Técnica Ecuatoriana (NTE) Establece los requisitos y estándares para la utilización de materiales alternativos en la producción de hormigón, incluyendo la ceniza

de la cascarilla de arroz. Esto puede incluir normas específicas para la utilización de adiciones minerales en hormigón, como la NTE INEN correspondiente.

Normas para el Hormigón INEN 1578, 2010: establece los requisitos para el hormigón de cemento hidráulico en términos de su asentamiento.

Normas para el Cemento Portland Requisitos

Norma Ecuatoriana de la Construcción, especifica los reglamentos que debe cumplir el Cemento Portland y la norma se aplica para los 8 distintos tipos de cemento portland:

- **Tipo I:** Para usarse cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
- **Tipo IA:** Cemento con incorporado de aire para los mismos usos del Tipo I, donde se desea incorporación de aire
- **Tipo II:** Para uso general, especialmente cuando se desea una moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación.
- **Tipo IIA:** Cemento con incorporado de aire para los mismos usos del Tipo II, donde se desea incorporación de aire.
- **Tipo III:** Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial o temprana.
- **Tipo IIIA:** Cemento con incorporado de aire para el mismo uso que el Tipo III, donde se desea incorporación de aire.
- **Tipo IV:** Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación.
- **Tipo V:** Para usarse cuando se desea alta resistencia a la acción de los sulfatos. (p.1)

Normas para el cemento Hidráulico INEN 0151, 2010: menciona las definiciones de los términos del cemento hidráulico se encuentran en la Norma estableciendo los termines y especificando las definiciones los materiales que incluyen en el cemento que se aplican a las normas correspondientes

Normativa Ambiental: establecen que se deben considerar las regulaciones ambientales ecuatorianas relacionadas con el manejo y disposición de subproductos agrícolas, como la cascarilla de arroz. Esto podría incluir normas de protección ambiental y disposición adecuada de residuos agrícolas.

Regulaciones de Seguridad y Salud Ocupacional: establece que deberán cumplirse las normativas ecuatorianas relacionadas con la seguridad y salud ocupacional en el manejo y procesamiento de materiales como la cascarilla de arroz y la producción de hormigón.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de la investigación: Cuantitativo

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, cuyo propósito es la recolección de datos mediante la realización de ensayos y la elaboración de tablas numéricas que contengan valores exactos. Este enfoque permite la obtención de gráficos que aportan mayor rigor científico al desarrollo del estudio. Asimismo, se llevará a cabo un análisis comparativo entre dos tipos de hormigón: el hormigón tradicional y el hormigón no tradicional con adición de ceniza de cascarilla de arroz. El objetivo es evaluar y contrastar los comportamientos físicos y mecánicos de ambos materiales, con el fin de identificar las diferencias en términos de su resistencia, durabilidad y otras propiedades relevantes. Los resultados obtenidos se analizarán de manera objetiva y cuantitativa, proporcionando una base sólida para conclusiones científicas que permitan inferir la viabilidad y las ventajas comparativas del uso de la ceniza de arroz en la fabricación de hormigón.

3.2. Alcance de la investigación: Correlacionado y Experimental

La presente investigación se ubica en un nivel correlacional, ya que tiene como objetivo comparar dos variables: el hormigón tradicional y el hormigón no tradicional con adición de ceniza de cascarilla de arroz. En este sentido, se busca establecer la relación entre estas variables en función de su comportamiento físico y mecánico.

El diseño de la investigación también es experimental, dado que se realizarán ensayos controlados dentro de un laboratorio, lo que permitirá medir y observar de manera directa las propiedades de cada tipo de hormigón bajo condiciones controladas. A través de estos ensayos, se obtendrán datos precisos que serán utilizados para comparar ambos materiales y evaluar sus diferencias en cuanto a resistencia, durabilidad y otras características clave. Este enfoque experimental es fundamental para garantizar la validez interna de los resultados, proporcionando un análisis riguroso y sistemático de los efectos de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en las propiedades del hormigón.

3.3. Técnicas e instrumentos para obtener datos: Ensayos de laboratorio

Los ensayos de compresión de cilindros de hormigón son una técnica fundamental en la evaluación de la resistencia del concreto. Estos ensayos permiten medir la resistencia a la compresión en diferentes etapas de curado, como a los 7, 14 y 28 días, y se utilizan para garantizar que el material cumple con las especificaciones estructurales y de diseño.

La norma ASCE C 873 mencionada se refiere a la especificación bajo la cual se rigen estos ensayos. El proceso incluye la preparación de cilindros de concreto, que luego son sometidos a cargas de compresión utilizando máquinas especializadas para obtener el valor de resistencia a la compresión, conocido como f'_c (resistencia característica a la compresión).

3.4. Población y Muestra

En este caso, se tiene una población de 15 cilindros de hormigón, clasificados en tres categorías:

- Hormigón sin adición.
- Hormigón con +/-5% de adición.
- Hormigón con +/-10% de adición.

De esa población, se ha seleccionado una muestra de 10 cilindros, distribuidos entre las mismas tres categorías. Este tipo de muestreo implica que se está seleccionando una parte representativa de la población total para realizar los ensayos de compresión u otras pruebas, el cual se va a reemplazar en porcentaje a la arena. El reparto de la muestra en cada categoría dependerá de cómo se distribuyan los cilindros, asegurando que se pueda hacer una comparación válida entre los diferentes tipos de hormigón.

3.5. Análisis de los resultados

3.5.1. Rotura de los cilindros de hormigón

La Tabla 13 recopila datos sobre la resistencia a la rotura de cilindros de hormigón bajo diferentes condiciones de mezcla y tratamientos. Se registran las fechas de fabricación, la cantidad de cilindros, el lugar de toma de muestra, la fecha de rotura, y otros parámetros relevantes como la carga aplicada y la resistencia medida en kg/cm². Los resultados incluyen variaciones en la mezcla del hormigón, como la inclusión de arena y ceniza en diferentes proporciones.

Tabla 13 Contenido de las roturas de hormigón con y sin agregado de ceniza de cascarilla de arroz con porcentajes respectivos

FECHA	CANTIDAD	LUGAR DE TOMA ELEMENTO	FECHA DE ROTURA	REV	PLACA	ROTURA A LOS DIAS	OBSERVACIONES	CARGA	RESISTENCIA
09/08/2024	8	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO				8 CP	28		
09/08/2024	8	- 5% ARENA + 5% CENIZA							
09/08/2024	8	- 10% ARENA + 10% CENIZA							
09/08/2024	6	+ 5% ARENA + 5% CENIZA							
09/08/2024	6	+ 10% ARENA + 10% CENIZA							

09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN AGREGADO	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	10610	210
09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	10980	210
09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	14440	210
09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	14700	210
09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	06/09/2024	28	CILINDRO PEQUEÑO	17080	210
09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	06/09/202	28	CILINDRO PEQUEÑO	17190	210
09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	TESTIGO	TESTIGO	CILINDRO PEQUEÑO		210

09/08/2024	1	S/N ESTADO NATURAL SIN ADITIVO	TESTIGO	TESTIGO	CILINDRO PEQUEÑO		210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	11780	210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	11590	210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	15010	210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	15150	210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	06/09/2024	28	CILINDRO PEQUEÑO	17800	210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	06/09/202	28	CILINDRO PEQUEÑO	17530	210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	TESTIGO	TESTIGO	CILINDRO PEQUEÑO		210
09/08/2024	1	- 5% ARENA + 5% CENIZA	TESTIGO	TESTIGO	CILINDRO PEQUEÑO		210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	12270	210

09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	12350	210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	16600	210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	16460	210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	06/09/2024	28	CILINDRO PEQUEÑO	18010	210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	06/09/202	28	CILINDRO PEQUEÑO	18150	210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	TESTIGO	TESTIGO	CILINDRO PEQUEÑO		210
09/08/2024	1	- 10% ARENA + 10% CENIZA	TESTIGO	TESTIGO	CILINDRO PEQUEÑO		210
09/08/2024	1	+ 5% ARENA + 5% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	10160	210
09/08/2024	1	+ 5% ARENA + 5% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	10230	210
09/08/2024	1	+ 5% ARENA + 5% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	14060	210

09/08/2024	1	+ 5% ARENA + 5% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	14080	210
09/08/2024	1	+ 5% ARENA + 5% CENIZA	06/09/2024	28	CILINDRO PEQUEÑO	17540	210
09/08/2024	1	+ 5% ARENA + 5% CENIZA	06/09/202	28	CILINDRO PEQUEÑO	17550	210
09/08/2024	1	+ 10% ARENA + 10% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	11340	210
09/08/2024	1	+ 10% ARENA + 10% CENIZA	16/08/2024	7	CILINDRO PEQUEÑO	11230	210
09/08/2024	1	+ 10% ARENA + 10% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	14500	210
09/08/2024	1	+ 10% ARENA + 10% CENIZA	23/08/2024	14	CILINDRO PEQUEÑO	14420	210
09/08/2024	1	+ 10% ARENA + 10% CENIZA	06/09/2024	28	CILINDRO PEQUEÑO	17770	210
09/08/2024	1	+ 10% ARENA + 10% CENIZA	06/09/202	28	CILINDRO PEQUEÑO	17610	210

Elaborado por: Burgos (2024)

3.5.2. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ en estado natural

Análisis Comparativo

- Ambos cilindros presentan un desarrollo de resistencia muy similar, lo que indica consistencia en el proceso de preparación, curado y ensayo.
- Los valores a los 7 días muestran una tasa de ganancia de resistencia típica, y para ambos cilindros, se alcanza o se supera la resistencia especificada a los 28 días.
- Cilindro 2 presenta una ligera ganancia adicional (101%) a los 28 días en comparación con el Cilindro 1 (100%), lo que puede deberse a una ligera variabilidad en las propiedades del concreto o en las condiciones de curado.

Cilindro 1

- **Resistencia a los 7 días:** 130.87 kg/cm^2 (62% de $f'c$). Esto sugiere un desarrollo temprano de resistencia dentro de lo esperado para el concreto ordinario, ya que normalmente, se alcanza entre el 50% y 70% de la resistencia a los 7 días.
- **Resistencia a los 14 días:** 178.12 kg/cm^2 (85% de $f'c$). El concreto ya ha desarrollado una porción significativa de su resistencia final. Esto es consistente con la curva típica, donde alrededor del 75-85% de la resistencia se alcanza a los 14 días.
- **Resistencia a los 28 días:** 210.68 kg/cm^2 (100% de $f'c$). El cilindro alcanza su resistencia especificada con precisión, lo que indica que la mezcla y el proceso de curado fueron efectivos.

Cilindro 2

- **Resistencia a los 7 días:** 135.44 kg/cm^2 (64% de $f'c$). Similar al Cilindro 1, el desarrollo de resistencia a los 7 días es satisfactorio,

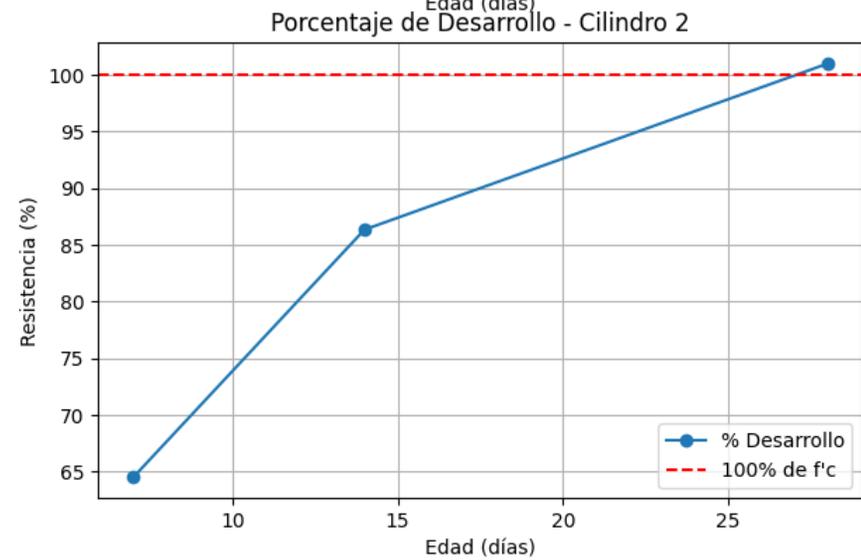
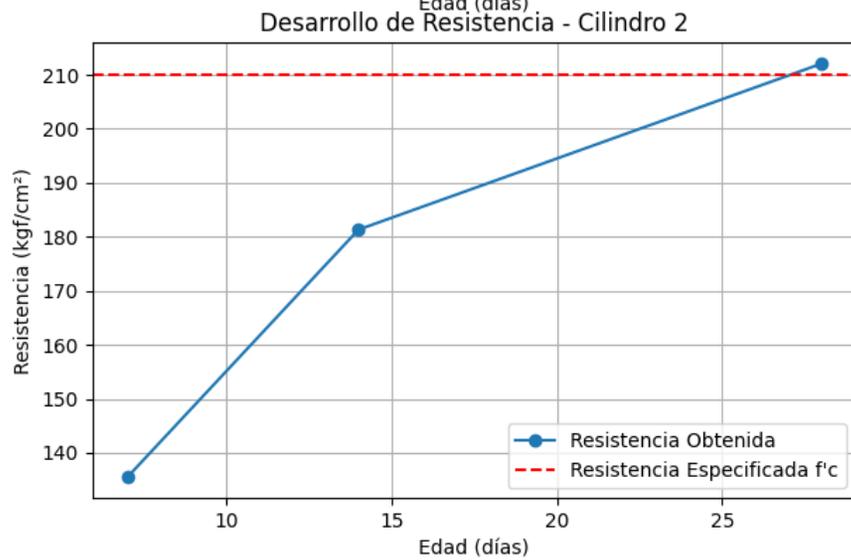
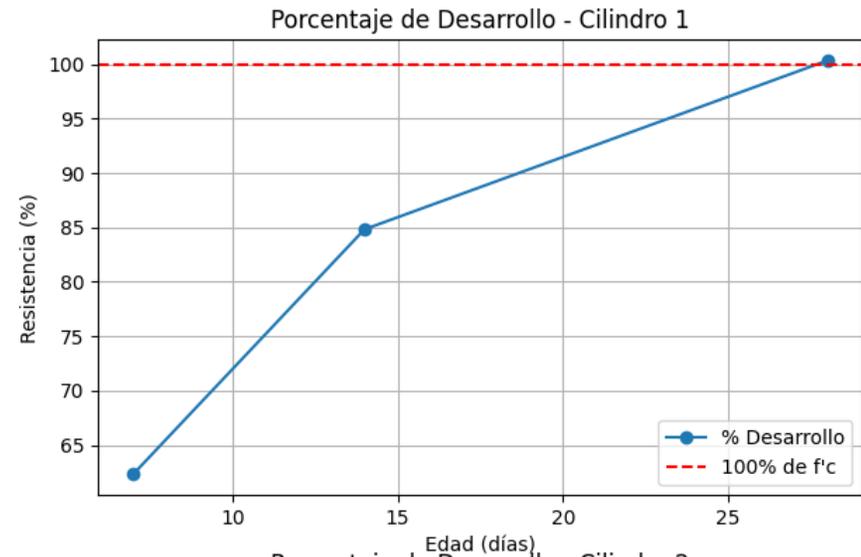
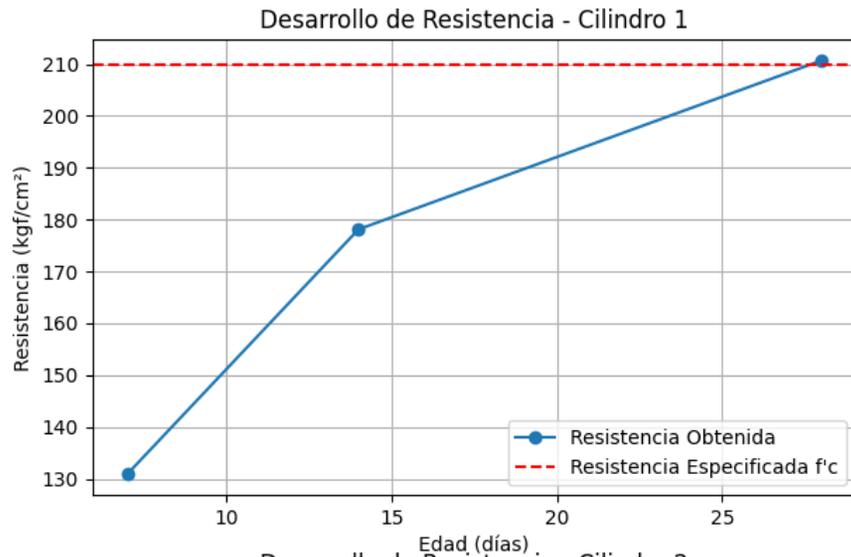
alcanzando el 64% de la resistencia, lo cual es un buen indicador del comportamiento esperado.

- **Resistencia a los 14 días:** 181.32 kg/cm² (86% de f'c). La tendencia sigue el mismo patrón que el Cilindro 1, con un desarrollo sólido de la resistencia. Se acerca al 85% esperado en esta etapa.
- **Resistencia a los 28 días:** 212.04 kg/cm² (101% de f'c). Este cilindro ligeramente supera la resistencia especificada, lo que es normal ya que algunas muestras pueden sobrepasar la resistencia nominal debido a pequeñas variaciones en los materiales o procesos de curado.

Conclusiones:

- El comportamiento del concreto para ambas muestras es consistente con los estándares de desarrollo de resistencia para mezclas normales, logrando una resistencia a los 28 días que cumple o supera la especificación.
- Ambos cilindros siguen una curva de desarrollo predecible, alcanzando aproximadamente el 60-65% a los 7 días y el 85% a los 14 días, lo que indica un buen diseño de mezcla y control de calidad.
- No hay indicios de problemas en el proceso de curado, pues los valores obtenidos están dentro del rango esperado.

Figura 6 Cilindro en estado natural $f'_c=210$ kg/cm



Elaborado por: Burgos (2024)

3.5.3. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -5% de arena y +5% de ceniza

Análisis Comparativo

- Ambos cilindros con la adición de 5% de arena y 5% de ceniza muestran una ganancia de resistencia más rápida en comparación con los cilindros sin aditivos. Esto es evidente desde los 7 días, donde alcanzan un 68-69% de la resistencia final frente al 62-64% de los primeros cilindros.
- A los 14 días, la diferencia se mantiene con un desarrollo del 88-89% frente al 85-86% de los cilindros sin aditivos.
- A los 28 días, ambos conjuntos alcanzan o superan la resistencia especificada, pero los cilindros con aditivos superan el valor nominal con un margen más amplio (103-105%).

Cilindro 1

- **Resistencia a los 7 días:** 142.96 kg/cm^2 (68% de $f'c$).
La adición de ceniza y arena parece mejorar la ganancia de resistencia inicial. Este valor es superior al observado en los cilindros sin aditivos (62% en el primer conjunto).
- **Resistencia a los 14 días:** 185.15 kg/cm^2 (88% de $f'c$).
El porcentaje de desarrollo a los 14 días es superior al de los cilindros sin aditivos (85%), lo que indica que la mezcla modificada sigue una curva de ganancia de resistencia algo más acelerada.
- **Resistencia a los 28 días:** 216.23 kg/cm^2 (103% de $f'c$).
Al igual que el primer conjunto, la resistencia final supera la especificada, alcanzando el 103%.

Cilindro 2

- **Resistencia a los 7 días:** 145.31 kg/cm² (69% de f'c).

La resistencia temprana es aún mayor que la del Cilindro 1, lo que puede indicar una ligera variabilidad en la mezcla o las condiciones de curado. Sin embargo, ambos cilindros siguen un comportamiento similar, mejorando significativamente respecto al primer conjunto sin aditivos.

- **Resistencia a los 14 días:** 186.88 kg/cm² (89% de f'c).

Este valor confirma la tendencia observada en el Cilindro 1, con una ganancia de resistencia algo mayor que en los cilindros sin aditivos.

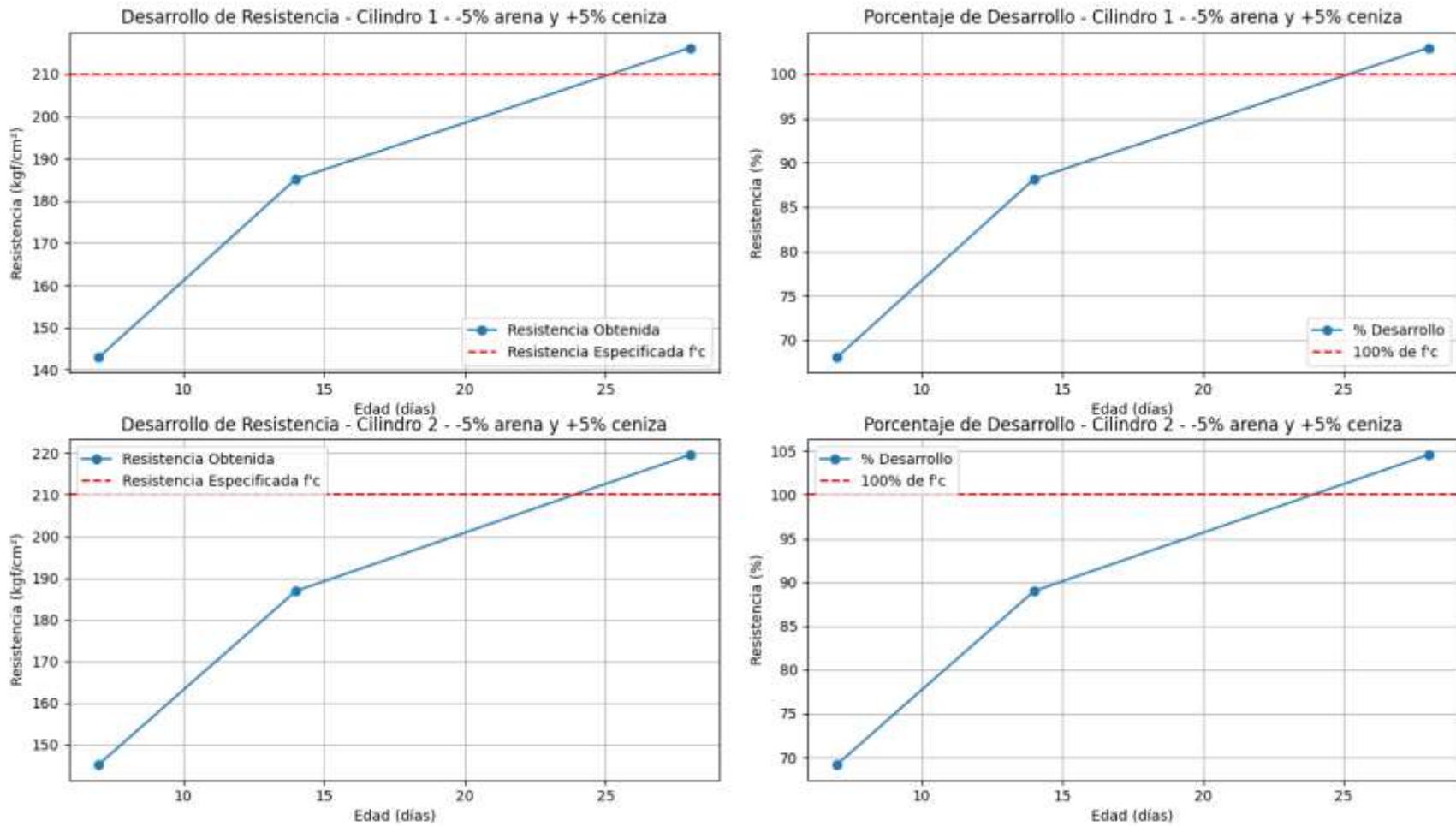
- **Resistencia a los 28 días:** 219.56 kg/cm² (105% de f'c).

La resistencia final es superior al valor especificado, con un margen del 5%, lo que indica un buen comportamiento de la mezcla.

Conclusiones:

- La adición de ceniza y arena parece mejorar la ganancia de resistencia inicial del concreto, lo que puede ser útil en situaciones donde se necesita una resistencia temprana.
- A los 28 días, los valores de resistencia son mayores que los de los cilindros sin aditivos, lo que podría indicar una mejora en las propiedades mecánicas del concreto modificado.
- El desarrollo de resistencia con aditivos es más acelerado, lo que podría tener implicaciones favorables en proyectos donde se requiera un fraguado rápido o una mayor eficiencia en el uso de materiales.

Figura 7 Cilindro -5% arena y +5% ceniza $f_c=210$ kg/cm



Elaborado por: Burgos (2024)

3.5.4. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -10% de arena y +10% de ceniza

Análisis Comparativo

- Ambos cilindros presentan un desarrollo de resistencia muy similar, lo que indica consistencia en el proceso de preparación, curado y ensayo.
- Los valores a los 7 días muestran una tasa de ganancia de resistencia típica (72% y 73%), y para ambos cilindros, se alcanza o se supera la resistencia especificada a los 28 días (106% y 107%).
- El Cilindro 2 presenta una ligera ganancia adicional (107%) a los 28 días en comparación con el Cilindro 1 (106%), lo que puede deberse a una variabilidad normal en las propiedades del concreto o en las condiciones de curado.

Cilindro 1

- **Resistencia a los 7 días: 151.35 kg/cm^2 (72% de $f'c$).**
Esto sugiere un desarrollo temprano de resistencia dentro de lo esperado para el concreto ordinario. Normalmente, se alcanza entre el 50% y el 70% de la resistencia a los 7 días, por lo que el 72% indica un buen desempeño inicial.
- **Resistencia a los 14 días: 203.03 kg/cm^2 (97% de $f'c$).**
El concreto ha desarrollado una porción significativa de su resistencia final. Esto es consistente con la curva típica, donde se espera que alrededor del 75-85% de la resistencia se alcance a los 14 días. En este caso, el 97% indica un desarrollo robusto.
- **Resistencia a los 28 días: 222.15 kg/cm^2 (106% de $f'c$).**
El cilindro supera la resistencia especificada, lo que indica que la mezcla y el proceso de curado fueron efectivos. Superar ligeramente la resistencia a los 28 días es común y generalmente se considera favorable.

Cilindro 2

- **Resistencia a los 7 días: 152.34 kg/cm² (73% de f'c).**

Similar al Cilindro 1, el desarrollo de resistencia a los 7 días es satisfactorio, alcanzando el 73% de la resistencia, lo que es un buen indicador del comportamiento esperado.

- **Resistencia a los 14 días: 204.76 kg/cm² (98% de f'c).**

La tendencia sigue el mismo patrón que el Cilindro 1, con un desarrollo sólido de la resistencia. Alcanzar el 98% de la resistencia a los 14 días muestra un comportamiento excelente y está dentro del rango esperado.

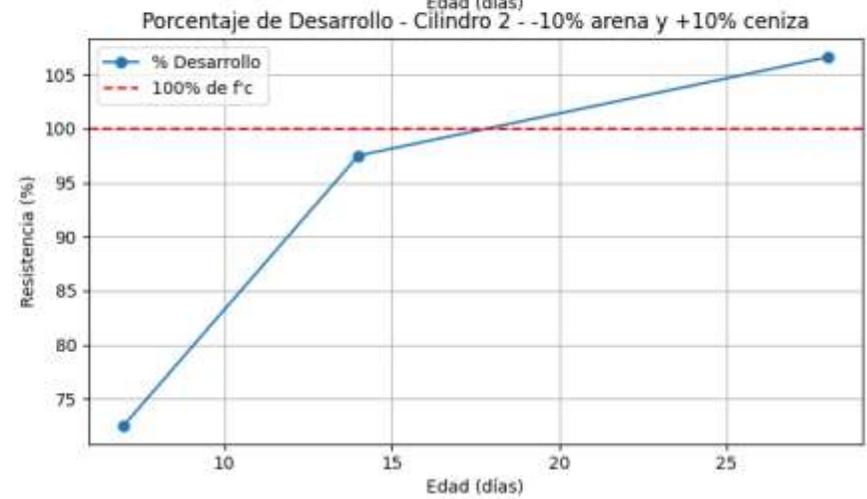
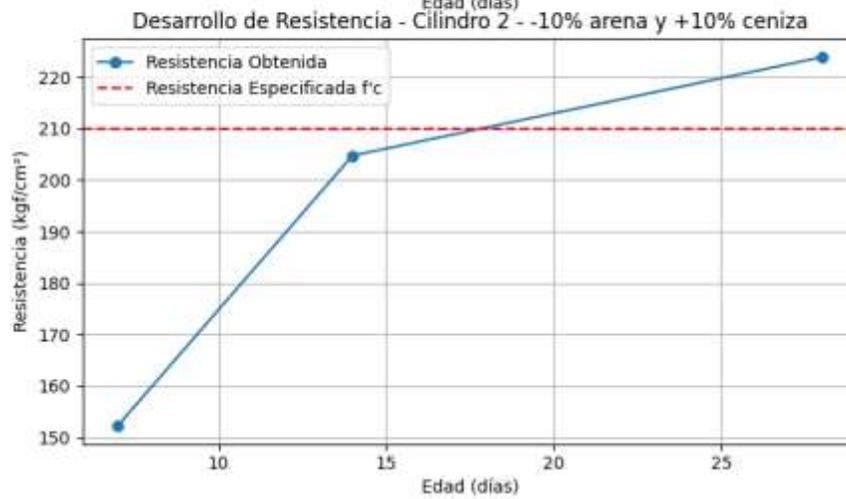
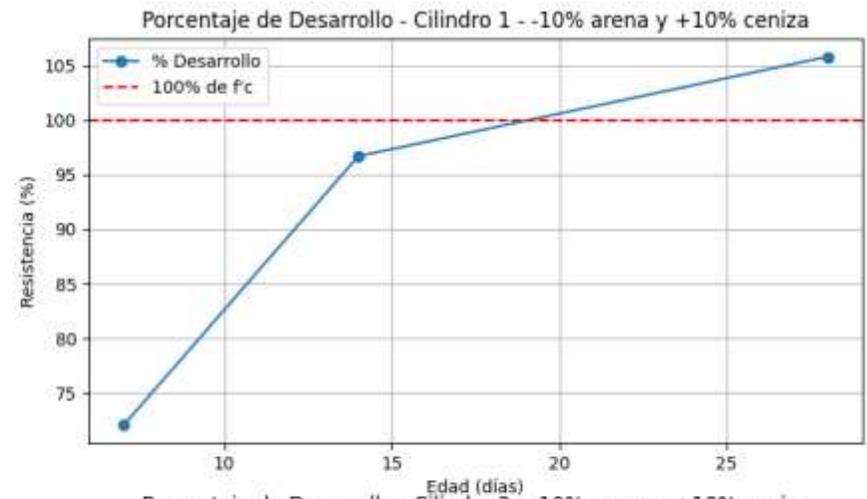
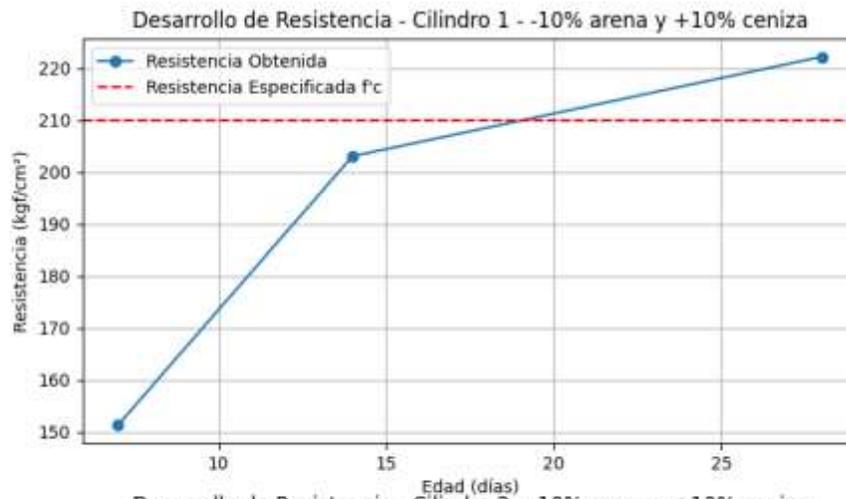
- **Resistencia a los 28 días: 223.88 kg/cm² (107% de f'c).**

Este cilindro supera ligeramente la resistencia especificada, lo que es normal, ya que algunas muestras pueden sobrepasar la resistencia nominal debido a pequeñas variaciones en los materiales o en el proceso de curado.

Conclusiones

- El comportamiento del concreto para ambas muestras es consistente con los estándares de desarrollo de resistencia para mezclas normales, logrando una resistencia a los 28 días que cumple o supera la especificación.
- Ambos cilindros siguen una curva de desarrollo predecible, alcanzando aproximadamente el 72-73% a los 7 días y el 97-98% a los 14 días, lo que indica un buen diseño de mezcla y control de calidad.
- No hay indicios de problemas en el proceso de curado, ya que los valores obtenidos están dentro del rango esperado y la resistencia final es superior a la especificada.

Figura 8 Cilindro -10% arena y +10% ceniza $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado por: Burgos (2024)

3.5.5. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -5% de arena y +5% de ceniza (Segundo testigo)

Análisis Comparativo

- Ambos cilindros presentan un desarrollo de resistencia casi idéntico, lo que indica una buena consistencia en el proceso de preparación, curado y ensayo.
- A los 7 días, ambos cilindros muestran una tasa de ganancia de resistencia del 60%, lo cual es adecuado y dentro del rango esperado.
- A los 14 días, los dos cilindros presentan una resistencia de aproximadamente 83% de la resistencia final, lo cual está en línea con el desarrollo esperado del concreto.
- A los 28 días, ambos cilindros han superado ligeramente la resistencia especificada, alcanzando aproximadamente el 103% de la resistencia nominal, lo cual es positivo.

Cilindro 1

- **Resistencia a los 7 días: 125.32 kg/cm^2 (60% de $f'c$).**
Este valor sugiere que el concreto está dentro de los rangos esperados para la resistencia temprana. Normalmente, se espera que el concreto alcance entre el 50% y el 70% de su resistencia final a los 7 días.
- **Resistencia a los 14 días: 173.43 kg/cm^2 (83% de $f'c$).**
Este valor indica que el concreto ha desarrollado una porción significativa de su resistencia final. La tendencia es consistente con las curvas típicas, en las que el concreto alcanza entre el 75% y 85% de su resistencia a los 14 días.
- **Resistencia a los 28 días: 216.36 kg/cm^2 (103% de $f'c$).**
El cilindro ha superado ligeramente la resistencia especificada, lo que es un buen indicador de un proceso efectivo de curado y preparación de la mezcla. Alcanzar o superar la resistencia especificada a los 28 días es deseable en muchos casos.

Cilindro 2

- **Resistencia a los 7 días: 126.19 kg/cm² (60% de f'c).**

Similar al Cilindro 1, el desarrollo de resistencia a los 7 días es satisfactorio, alcanzando el 60% de la resistencia. Esto se alinea con las expectativas típicas del desarrollo temprano de la resistencia del concreto.

- **Resistencia a los 14 días: 173.68 kg/cm² (83% de f'c).**

La resistencia alcanzada a los 14 días es muy cercana a la del Cilindro 1, mostrando una consistencia adecuada en el comportamiento del concreto y en el desarrollo de su resistencia.

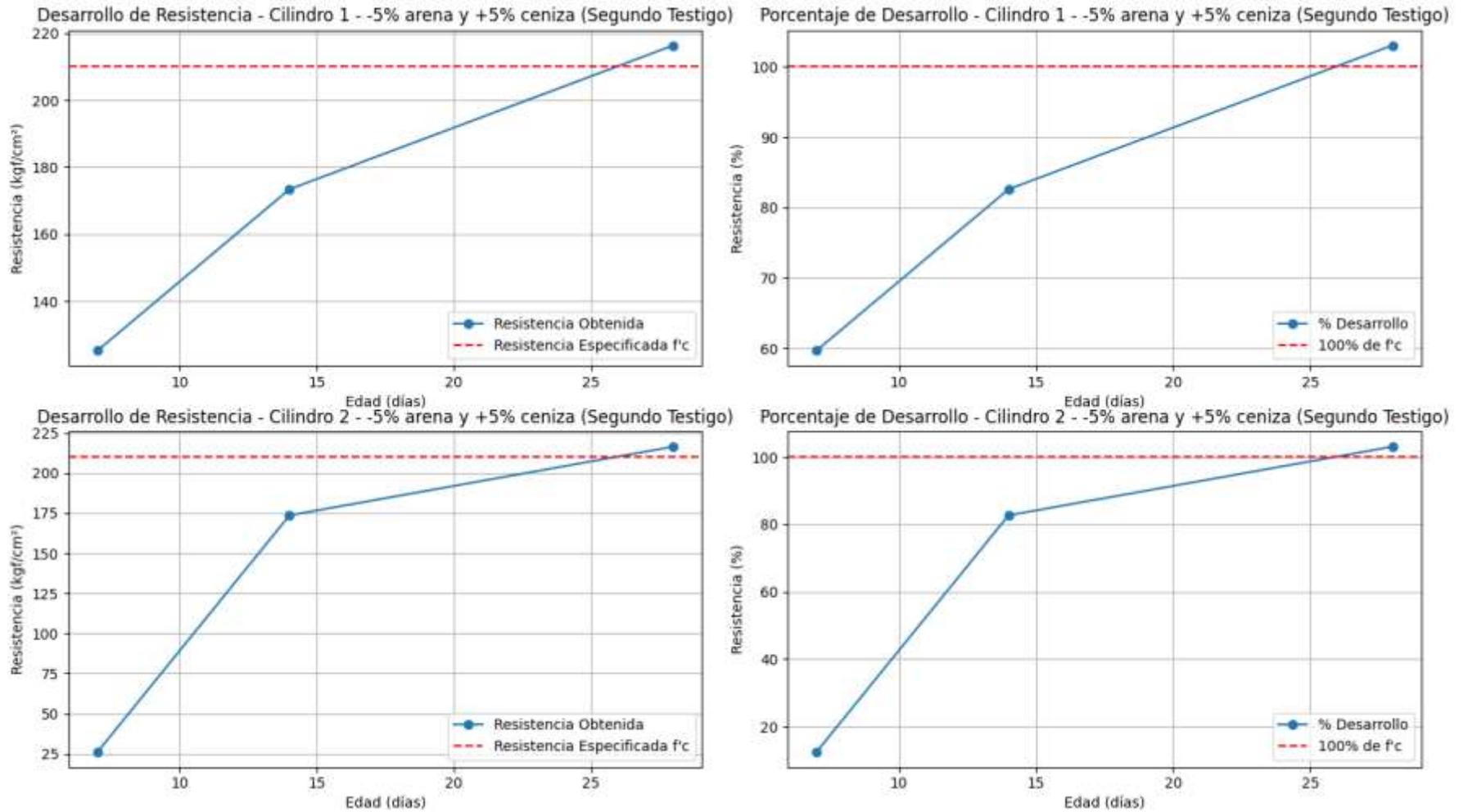
- **Resistencia a los 28 días: 216.48 kg/cm² (103% de f'c).**

Similar al Cilindro 1, este valor muestra que el concreto ha alcanzado y superado ligeramente la resistencia especificada, lo que es indicativo de un concreto de buena calidad.

Conclusiones

- Ambos cilindros muestran un desarrollo de resistencia predecible y dentro de los rangos esperados para mezclas de concreto con las mismas características, cumpliendo con los requerimientos de resistencia a los 28 días.
- La curva de desarrollo muestra que el concreto alcanza aproximadamente el 60% de su resistencia a los 7 días, el 83% a los 14 días, y supera el 100% a los 28 días, lo que indica que el diseño de la mezcla y el control del curado han sido efectivos.
- Los resultados indican que el concreto utilizado cumple con las expectativas de calidad, ya que en ambos casos la resistencia final fue ligeramente superior a la especificada, lo cual es indicativo de un buen control en la preparación y el curado del concreto.

Figura 9 Cilindro -5% arena y +5% ceniza $f'_c=210$ kg/cm (Segundo Testigo)



Elaborado por: Burgos (2024)

3.5.6. Gráfica de resistencia a la compresión de cilindros de hormigón $f'c=210\text{kg/cm}$ con -10% de arena y +10% de ceniza (Segundo testigo)

Análisis Comparativo

- Ambos cilindros muestran una tasa de ganancia de resistencia temprana elevada, ya que a los 7 días alcanzan entre el 66% y el 67% de la resistencia especificada. Esto sugiere una mezcla con buenos aditivos o una correcta manipulación durante el curado.
- A los 14 días, los cilindros tienen una resistencia del 85%, lo cual está dentro del rango esperado de un concreto bien preparado.
- A los 28 días, ambos cilindros han superado la resistencia especificada de 210 kg/cm^2 , alcanzando entre el 103% y el 104%, lo cual es una señal clara de un buen desempeño.

Cilindro 1

- **Resistencia a los 7 días: 138.52 kg/cm^2 (66% de $f'c$).**
La resistencia a los 7 días ha alcanzado el 66% de la resistencia especificada, lo cual es superior al comportamiento típico del concreto, que suele estar entre el 50% y el 70%. Esto indica un buen desempeño inicial.
- **Resistencia a los 14 días: 177.87 kg/cm^2 (85% de $f'c$).**
A los 14 días, el concreto ha alcanzado el 85% de su resistencia final, lo que sugiere un desarrollo saludable y rápido. Esto concuerda con los valores esperados para el desarrollo de resistencia en concreto.
- **Resistencia a los 28 días: 217.22 kg/cm^2 (103% de $f'c$).**
A los 28 días, la resistencia obtenida supera ligeramente la resistencia especificada (103%), lo cual es positivo y demuestra una mezcla y un curado adecuados.

Cilindro 2

- **Resistencia a los 7 días: 139.88 kg/cm² (67% de f'c).**

Al igual que el Cilindro 1, el cilindro 2 presenta un buen desarrollo de resistencia temprana, alcanzando el 67% de la resistencia especificada a los 7 días.

- **Resistencia a los 14 días: 178.86 kg/cm² (85% de f'c).**

La resistencia a los 14 días es similar a la del Cilindro 1, alcanzando el 85% de la resistencia final, lo que indica consistencia en el comportamiento de la mezcla de concreto.

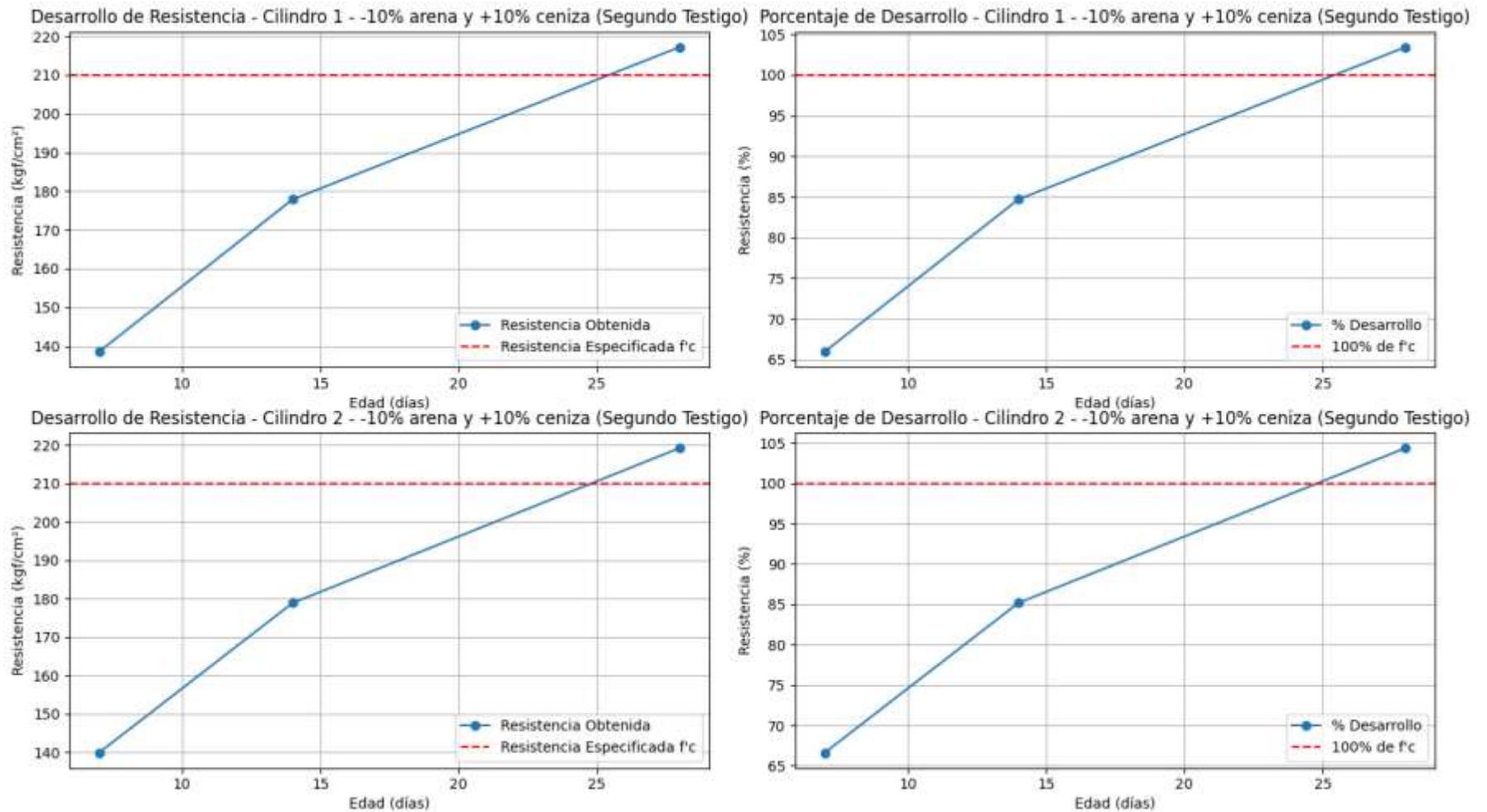
- **Resistencia a los 28 días: 219.19 kg/cm² (104% de f'c).**

A los 28 días, el Cilindro 2 ha alcanzado un 104% de la resistencia especificada, mostrando un comportamiento ligeramente superior al Cilindro 1.

Conclusiones

- Los cilindros muestran una ganancia de resistencia temprana superior a la esperada, lo que es un indicativo de una mezcla bien formulada y posiblemente un curado efectivo en las etapas iniciales.
- A lo largo de las tres edades (7, 14 y 28 días), ambos cilindros muestran un comportamiento muy consistente. La diferencia en las resistencias entre ambos cilindros es mínima, lo que sugiere un control adecuado en el proceso de preparación y ensayo.
- Ambos cilindros superaron la resistencia especificada al llegar a los 28 días, lo cual es ideal en proyectos que buscan garantizar márgenes de seguridad en la resistencia del concreto.

Figura 10 Cilindro -10% arena y +10% ceniza f'c=210 kg/cm (Segundo Testigo)



Elaborado por: Burgos (2024)

CAPITULO IV

PROPUESTA

4.1. Título de la propuesta

Diseño y desarrollo de un prototipo de hormigón ecológico $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ mediante la incorporación de ceniza de cascarilla de arroz como material alternativo.

4.2. Justificación de la propuesta

La propuesta de esta tesis se enfoca en una construcción sostenible, la cual ha ganado relevancia en las últimas décadas debido a la necesidad de mitigar los efectos del cambio climático y reducir el impacto ambiental de las actividades industriales, entre ellas, la construcción. La industria del cemento y del hormigón es responsable de una gran parte de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2) y del consumo intensivo de recursos naturales, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este contexto, la incorporación de subproductos agrícolas como la ceniza de cascarilla de arroz en la fabricación de hormigón no solo ofrece una solución más ecológica, sino que también aprovecha residuos que de otra manera serían desechados, contribuyendo a una gestión más eficiente de los recursos.

Impacto ambiental: Uno de los principales impactos ambientales de la construcción tradicional proviene de la producción de cemento, un componente clave del hormigón. La producción de cemento es altamente intensiva en energía y emite grandes cantidades de CO_2 . Al utilizar ceniza de cascarilla de arroz como material complementario o de sustitución parcial del cemento al igual que de arena, es posible reducir significativamente estas emisiones y disminuir el uso de materiales no renovables. Además, la cascarilla de arroz, un subproducto agrícola, representa un residuo de difícil disposición, cuya transformación en ceniza y posterior uso en hormigón contribuye no solo a disminuir el volumen de desechos, sino también a mejorar las propiedades del material resultante.

Impacto local: En Ecuador, el sector agrícola juega un papel fundamental en la economía, y el arroz es uno de los cultivos más importantes del país. La cascarilla de arroz es un residuo abundante en las zonas arroceras, particularmente en las provincias de Guayas y Los Ríos, donde su disposición se convierte en un desafío ambiental. El aprovechamiento de este subproducto como aditivo en el hormigón no solo reduce el impacto ambiental de su disposición, sino que también promueve el desarrollo local al generar nuevas oportunidades de negocio en la cadena de valor del arroz. Esto puede traducirse en ingresos adicionales para los productores y en una menor dependencia de recursos importados para la construcción, fortaleciendo la economía circular a nivel local.

Innovación y competitividad: La utilización de la ceniza de cascarilla de arroz en el hormigón representa una oportunidad única para la industria de la construcción en Ecuador. Al adoptar tecnologías y materiales más sostenibles, las empresas constructoras pueden mejorar su competitividad en un mercado que cada vez demanda más soluciones ecológicas. Este enfoque innovador no solo permitirá a las compañías cumplir con regulaciones ambientales más estrictas, sino también posicionarse en el mercado como líderes en la adopción de prácticas sostenibles, lo que puede abrir nuevas oportunidades de exportación y alianzas internacionales.

Desarrollo sostenible: La relevancia de esta propuesta también se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, especialmente en lo que respecta a la acción por el clima (ODS 13), la producción y el consumo responsables (ODS 12), y la innovación en infraestructura (ODS 9). Al integrar la ceniza de cascarilla de arroz en la producción de hormigón, se contribuye directamente a la reducción de la huella de carbono de la industria, al tiempo que se promueve un uso más eficiente de los recursos naturales y se fomenta la innovación tecnológica en la construcción.

Sostenibilidad global: En términos globales, la construcción sostenible con materiales alternativos como la ceniza de cascarilla de arroz no solo tiene un impacto positivo en el desarrollo de infraestructuras más ecológicas, sino que también forma parte de una tendencia global hacia la des-carbonización de la industria. Este tipo de innovaciones es clave para lograr las metas climáticas globales y promover un desarrollo

sostenible que beneficie tanto al medio ambiente como a las economías locales, especialmente en países en desarrollo como Ecuador, donde las soluciones basadas en los recursos locales pueden jugar un papel transformador.

4.3. Objetivos

4.3.1. Objetivo General

Diseñar y desarrollar un prototipo de hormigón sostenible de $f'c = 210$ kg/cm utilizando ceniza de cascarilla de arroz como material alternativo, evaluando sus propiedades físicas y mecánicas para determinar su viabilidad como sustituto parcial del cemento y arena en la industria de la construcción en Ecuador.

4.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de la ceniza de cascarilla de arroz para evaluar su potencial como aditivo en la fabricación de hormigón, considerando aspectos como la granulometría, composición química y reactividad puzolánica.
- Realizar ensayos comparativos de resistencia y durabilidad entre el hormigón tradicional y el hormigón modificado con ceniza de cascarilla de arroz, analizando su comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de carga.
- Determinar el efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en el proceso de fraguado y desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón, evaluando cómo este aditivo influye en las etapas iniciales de endurecimiento del material.

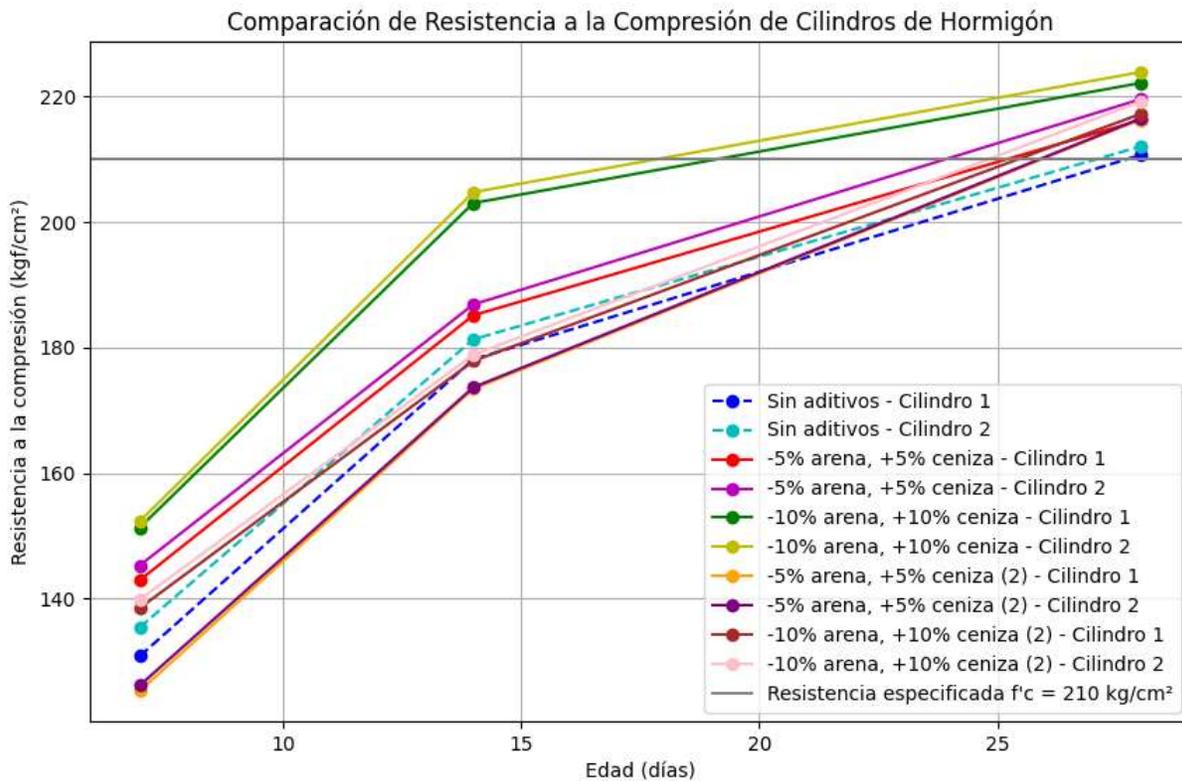
4.4. Análisis comparativo de las resistencias a la compresión de los cilindros de concreto a diferentes edades.

Los testigos sin ningún tipo de alteración en su composición evidencian una menor resistencia, a diferencia de quienes cuentan con aditivos (ceniza de cascarilla de arroz), los cuales se muestran efectivos para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. Por otro lado, los testigos que contienen 5% y 10% más de CCA, pero, aquellas que contienen el 10% CCA, en ambas series, superan de forma significativa a las mezclas que solo contienen el 5%. Esto nos indica que, al contener un mayor porcentaje de CCA,

nos ofrece una mayor resistencia a la compresión; una cantidad mayor de material puzolánico produce una reacción al hidróxido de calcio presente en el hormigón.

Todas las muestras que se pueden evidenciar en la Figura 11 evidencian un aumento en la resistencia a medida que van envejeciendo (etapa final 28 días a prueba de laboratorio), sin embargo, los testigos con mayor cantidad de CCA son las que sobresalen consistentemente.

Figura 11 Gráfica final comparativa de resistencia a compresión de los cilindros de hormigón



Elaborado por: Burgos (2024)

Conclusión comparativa

- Mezclas con 10% ceniza son las más efectivas, sobrepasando la resistencia especificada de 210 kg/cm². Ambas series de cilindros con esta proporción lograron los mejores resultados.
- Mezclas con 5% ceniza también mejoran la resistencia en comparación con los cilindros sin aditivos, pero no logran alcanzar la resistencia especificada.

- Cilindros sin alteración en su composición tienen el peor desempeño y no alcanzan la resistencia especificada, lo que indica la importancia de utilizar aditivos para mejorar las propiedades del concreto.

CONCLUSIONES

- La incorporación de CCA como material puzolánico en la mezcla del hormigón demuestra ser una solución eficaz para mejorar las propiedades mecánicas, incrementando la resistencia a la compresión en más del 100% de lo que se especifica a los 28 días. Este comportamiento sugiere una reacción química favorable entre la CCA y el hidróxido de calcio presente en la matriz del hormigón, lo que potencia su rendimiento estructural.
- Las mezclas con adiciones de CCA del 10% presentan los resultados más favorables, superando consistentemente la resistencia nominal del hormigón convencional. Lo que confirma que la sustitución parcial de cemento y arena con CCA es una estrategia viable para desarrollar hormigones más sostenibles sin comprometer la calidad estructural.
- El uso de CCA acelera el desarrollo de resistencia temprana, alcanzando hasta el 73% de la resistencia final a los 7 días. Este fenómeno es de particular interés para aplicaciones en las que se requieren altos índices de resistencia en fases iniciales, como en proyectos de infraestructura de rápido despliegue.
- La implementación de materiales alternativos como la CCA en la industria del hormigón no solo mejora las propiedades técnicas del material, sino que también promueve un enfoque sostenible y de economía circular, aprovechando residuos agrícolas que, de otra manera, representarían un desafío ambiental.
- Los resultados obtenidos subrayan la importancia de un control riguroso en el proceso de curado y preparación de mezclas modificadas, ya que la adición de CCA introduce variaciones que deben ser cuidadosamente gestionadas para garantizar un rendimiento mecánico óptimo y consistente.
- Desde una perspectiva académica, este estudio aporta evidencia valiosa sobre la viabilidad de emplear subproductos agroindustriales en la construcción civil, abriendo nuevas líneas de investigación sobre la optimización de mezclas con diferentes proporciones de CCA y su comportamiento a largo plazo en diversas condiciones ambientales

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar ceniza de cascarilla de arroz (CCA) en una proporción del 10% como sustituto parcial del cemento y arena en proyectos de construcción que requieran un hormigón con alta resistencia a la compresión, asegurando un óptimo comportamiento mecánico y mayor durabilidad estructural.
- Es esencial implementar estudios adicionales sobre el comportamiento a largo plazo del hormigón con CCA bajo diferentes condiciones ambientales, incluyendo ciclos de humedad, temperatura y exposición a agentes químicos, para evaluar su durabilidad y capacidad de mantener sus propiedades mecánicas en el tiempo.
- Se sugiere optimizar el proceso de curado en mezclas con CCA para garantizar un desarrollo uniforme de la resistencia, prestando especial atención a las etapas tempranas de fraguado donde la ganancia de resistencia es más acelerada. Este control es crucial para maximizar los beneficios del aditivo.
- Se recomienda fomentar la adopción de hormigones sostenibles con CCA en proyectos públicos y privados, no solo por sus beneficios estructurales, sino también por su contribución a la reducción de la huella de carbono, lo que está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las normativas internacionales sobre construcción ecológica.
- Para maximizar el impacto económico y ambiental de la CCA, se debe promover su uso en áreas agrícolas donde este subproducto es abundante. Esto generaría un valor agregado en las cadenas productivas locales y reduciría los costos de disposición de residuos.
- Es recomendable evaluar la viabilidad de implementar el uso de CCA en otros tipos de infraestructuras, como pavimentos y elementos prefabricados, donde las propiedades puzolánicas de la ceniza puedan mejorar aún más el rendimiento del hormigón en aplicaciones específicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abolhasani, A., Samali, B., & Aslani, F. (2022). Rice Husk Ash Incorporation in Calcium Aluminate Cement Concrete: Life Cycle Assessment, Hydration and Strength Development. *Sustainability*, *14*(2), 1012. <https://doi.org/10.3390/su14021012>
- Aftcin, P.-C., Bédard, C., Plumet, M., & Haddad, G. (1984). Very High Strength Cement for Very High Strength Concrete. *MRS Online Proceedings Library*, *42*(1), 201–210. <https://doi.org/10.1557/PROC-42-201>
- Agarwal, S. K. (2006). Pozzolanic activity of various siliceous materials. *Cement and Concrete Research*, *36*(9), 1735–1739. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.025>
- Ahmad-Alyosef, H., Uhlig, H., Münster, T., Kloess, G., Einicke, W. D., Gläser, R., & Enke, D. (2014). Biogenic Silica from Rice Husk Ash - Sustainable Sources for the Synthesis of Value Added Silica. *Chemical Engineering Transactions*, *37*, 667–672. <https://doi.org/10.3303/CET1437112>
- Aïtcin, P.-C. (2016). 3 - Portland cement. In P.-C. Aïtcin & R. J. Flatt (Eds.), *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 27–51). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>
- Al-Alwan, A. A. K., Al-Bazoon, M., I.Mussa, F., Alalwan, H. A., Hatem Shadhar, M., Mohammed, M. M., & Mohammed, M. F. (2022). The impact of using rice husk ash as a replacement material in concrete: An experimental study. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.002>
- Alrashidi, E., & Almutairi, A. (2024). Comparing Between Crushed and Fine Aggregate Recycled in Concrete. In E. Strauss (Ed.), *Proceedings of the 7th International Conference on Civil Engineering* (pp. 37–50). Springer Nature Singapore.
- Amin, M. N., Khan, S. A., Khan, K., Nazar, S., Arab, A. M. A., & Deifalla, A. F. (2023). Promoting the suitability of rice husk ash concrete in the building sector via

- contemporary machine intelligence techniques. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02357. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02357>
- Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Vatin, N., Karelina, M., Ozbakkaloglu, T., Krishna, R. S., Sahoo, A. K., Das, S. K., & Mishra, J. (2021). Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications. *Crystals*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/cryst11020168>
- An, D., Guo, Y., Zhu, Y., & Wang, Z. (2010). A green route to preparation of silica powders with rice husk ash and waste gas. *Chemical Engineering Journal*, 162(2), 509–514. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2010.05.052>
- Antiohos, S. K., Tapali, J. G., Zervaki, M., Sousa-Coutinho, J., Tsimas, S., & Papadakis, V. G. (2013). Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study. *Construction and Building Materials*, 49, 455–463. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.08.046>
- Armado, H. (2000). 14^a Edición basada en la EHE ajustada al código modelo y al eurocódigo. *Editorial Gustavo Gili, SA Pedro Jiménez Montoya Álvaro García Meseguer Francisco Morán Cabré*.
- Asmara, Y. P. (2024). *Concrete Structure* (pp. 7–24). https://doi.org/10.1007/978-981-99-5933-4_2
- ASTM. (2021). *ASTM C125-21a, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. <https://doi.org/10.1520/C0125-21A>
- ASTM. (2022). *ASTM C150/C150M-22, Standard Specification for Portland Cement*. *Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA*. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-22
- ASTM. (2023a). *ASTM C33/C33M-23, Standard Specification for Concrete Aggregates*. *Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA*. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-23

- ASTM. (2023b). ASTM C595/C595M-23, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. *Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA*. https://doi.org/10.1520/C0595_C0595M-23
- ASTM. (2023c). ASTM C1157/C1157M-23, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. *Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA*. https://doi.org/10.1520/C1157_C1157M-23
- Azadi, M., Bahrololoom, M. E., & Heidari, F. (2011). Enhancing the mechanical properties of an epoxy coating with rice husk ash, a green product. *Journal of Coatings Technology and Research*, 8(1), 117–123. <https://doi.org/10.1007/S11998-010-9284-Z/METRICS>
- Baker, I. (2018). Concrete. In I. Baker (Ed.), *Fifty Materials That Make the World* (pp. 35–42). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78766-4_8
- Balapour, M., Joshaghani, A., & Althoey, F. (2018). Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 181, 27–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266>
- Balo, F. (2015). Feasibility study of “green” insulation materials including tall oil: Environmental, economical and thermal properties. *Energy and Buildings*, 86, 161–175. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.09.027>
- Barbhuiya, S., Mukherjee, S., & Nikraz, H. (2014). Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, 52, 189–193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.010>
- Behzadian, R., & Shahrajabian, H. (2019). Experimental Study of the Effect of Nano-silica on the Mechanical Properties of Concrete/PET Composites. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(8), 3660–3668. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-2440-9>
- Berkin, G. (2008). Heat Absorbing Glass From Rice Husk Ash For A Sustainable Environment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 109, 521–527. <https://doi.org/10.2495/WM080531>

- Bie, R.-S., Song, X.-F., Liu, Q.-Q., Ji, X.-Y., & Chen, P. (2015). Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. *Cement and Concrete Composites*, *55*, 162–168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008>
- Boscaro, F., Palacios, M., & Flatt, R. J. (2021). Formulation of low clinker blended cements and concrete with enhanced fresh and hardened properties. *Cement and Concrete Research*, *150*, 106605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106605>
- Bosio, A., Zacco, A., Borgese, L., Rodella, N., Colombi, P., Benassi, L., Depero, L. E., & Bontempi, E. (2014). A sustainable technology for Pb and Zn stabilization based on the use of only waste materials: A green chemistry approach to avoid chemicals and promote CO₂ sequestration. *Chemical Engineering Journal*, *253*, 377–384. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2014.04.080>
- Bouarroudj, M. E., Remond, S., Michel, F., Zhao, Z., Bulteel, D., & Courard, L. (2019). Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. *Materials and Structures*, *52*(1), 18. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1325-1>
- Brzozowski, P., Strzałkowski, J., Rychtowski, P., Wróbel, R., Tryba, B., & Horszczaruk, E. (2021). Effect of Nano-SiO₂ on the Microstructure and Mechanical Properties of Concrete under High Temperature Conditions. *Materials (Basel, Switzerland)*, *15*(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010166>
- Bustillo Revuelta, M. (2021). *Concrete* (pp. 217–274). https://doi.org/10.1007/978-3-030-65207-4_9
- Camargo-Pérez, N. R., Abellán-García, J., & Fuentes, L. (2023). Use of rice husk ash as a supplementary cementitious material in concrete mix for road pavements. *Journal of Materials Research and Technology*, *25*, 6167–6182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.033>
- Carrera Cevallos, A. W., & Erazo Bazurto, F. X. (2022). *Edificio sustentable multifamiliar de 4 niveles en Guayaquil* [Thesis, ULVR]. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/5769>

- Chakchouk, A., Samet, B., & Mnif, T. (2006). Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, 33(2), 79–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.03.009>
- Chan, S. Y. N., Peng, G., & Chan, J. K. W. (1996). Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature. *Materials and Structures*, 29(10), 616–619. <https://doi.org/10.1007/BF02485969>
- Chanu, N. M., & Devi, Th. K. (2013). Contribution Of Rice Husk Ash To The Properties Of Cement Mortar And Concrete. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137558917>
- Chhorn, C., & Lee, S.-W. (2017). Consistency control of roller-compacted concrete for pavement. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1757–1763. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0820-y>
- Chopra, D., Siddique, R., & Kunal. (2015). Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering*, 130, 72–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005>
- De Larrard, F. (1999). *Concrete Mixture Proportioning* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482272055>
- Della, V. P., Kühn, I., & Hotza, D. (2002). Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters*, 57(4), 818–821. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00879-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00879-0)
- Dembovska, L., Bajare, D., Pundiene, I., & Vitola, L. (2017). Effect of Pozzolanic Additives on the Strength Development of High Performance Concrete. *Procedia Engineering*, 172, 202–210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.050>
- Dinegdae Yared and Erlingsson, S. (2020). Evaluation of Permanent Deformation Models for Flexible Pavements Using Accelerated Pavement Testing. In P. and H. J. and L.-S. L. G. Chabot Armelle and Hornych (Ed.), *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation* (pp. 399–408). Springer International Publishing.

- Elakkiah, C. (2019). Rice Husk Ash (RHA)—The Future of Concrete. In N. Das Bibhuti Bhusan and Neithalath (Ed.), *Sustainable Construction and Building Materials* (pp. 439–447). Springer Singapore.
- Eun Kim, J., Seo, J., Yang, K.-H., & Kim, H.-K. (2023). Cost and CO2 emission of concrete incorporating pretreated coal bottom ash as fine aggregate: A case study. *Construction and Building Materials*, 408, 133706. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133706>
- Evert, K.-J., Ballard, E. B., Elsworth, D. J., Oquiñena, I., Schmerber, J.-M., & Stipe, R. E. (2010). 2074 fine aggregate [n] [US]. In K.-J. Evert, E. B. Ballard (deceased), D. J. Elsworth, I. Oquiñena, J.-M. Schmerber, & R. E. Stipe (deceased) (Eds.), *Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning* (p. 340). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-76435-9_4691
- Fan, D., Zhu, J., Fan, M., Lu, J.-X., Chu, S. H., Dong, E., & Yu, R. (2023). Intelligent design and manufacturing of ultra-high performance concrete (UHPC) – A review. *Construction and Building Materials*, 385, 131495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131495>
- Fapohunda, C., Akinbile, B., & Shittu, A. (2017). Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 675–692. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.004>
- Farid, S. A., & Zaheer, M. M. (2023). Production of new generation and sustainable concrete using Rice Husk Ash (RHA): A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.034>
- Feng, M., Wang, Z., & Wu, L. (2021). Experimental Study on High-Strength Concrete, Ultrahigh-Strength Concrete and Corresponding Mortar Under Triaxial Compression. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(11), 11179–11194. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05663-y>
- Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M., & Sugita, S. (2004). Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and Concrete*

- Forero, H. N. S., & Rodríguez, J. L. S. (2017). Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 4% y 6%. *Universidad Católica de Colombia*.
- Fournari, R., Ioannou, I., & Vatyliotis, D. (2015). A Study of Fine Aggregate Properties and Their Effect on the Quality of Cementitious Composite Materials. In G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, & F. Luino (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5* (pp. 33–36). Springer International Publishing.
- Francinete, P., da Silva, E. F., & de Mendonça Lopes, A. N. (2020). Comparative Study Between Strain Gages for Determination of Autogenous Shrinkage. In W. P. Boshoff, R. Combrinck, V. Mechtcherine, & M. Wyrzykowski (Eds.), *3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete* (pp. 114–122). Springer International Publishing.
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>
- Garnier, V., Piwakowski, B., Abraham, O., Villain, G., Payan, C., & Chaix, J. F. (2013). Acoustic techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency. *Construction and Building Materials*, 43, 598–613. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.035>
- Georgopoulos, C., & Minson, A. (2014). *Sustainable concrete solutions* (pp. 11–17). Wiley-Blackwell. <https://www.wiley.com/en-gb/Sustainable+Concrete+Solutions-p-9781119968641>

- Ghasabeh, M., & Göktepe, S. (2023). Phase-field modeling of thermal cracking in hardening mass concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 289, 109398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109398>
- Gooch, J. W. (2007). Concrete. In J. W. Gooch (Ed.), *Encyclopedic Dictionary of Polymers* (p. 220). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30160-0_2744
- Goodman, B. A. (2020). Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143–162. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.001>
- Gowripalan, N. (2020). Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages. In C. M. Wang, J. C. M. Ho, & S. Kitipornchai (Eds.), *ACMSM25* (pp. 269–276). Springer Singapore.
- Gupta Deepak and Kumar, A. and K. V. and P. A. and S. V. (2019). Performance of Pond Ash and Rice Husk Ash in Clay: A Comparative Study. In K. R. and B. A. Agnihotri Arvind Kumar and Reddy (Ed.), *Recycled Waste Materials* (pp. 145–153). Springer Singapore.
- Gu, P., Xie, P., Fu, Y., & Beaudoin, J. J. (1994). Rapid evaluation of the water/cement ratio of hardened Portland cement paste. *Journal of Materials Science Letters*, 13(16), 1159–1161. <https://doi.org/10.1007/BF00240996>
- Gursel, A. P., Maryman, H., & Ostertag, C. (2016). A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*, 112, 823–836. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.029>
- Habeeb, G. A., & Mahmud, H. Bin. (2010). Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. *Materials Research*, 13(2), 185–190. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000200011>
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Adesina, A. (2022). Sustainable application of coal bottom ash as fine aggregates in concrete: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01109>

- Hatoum, A., Khatib, J., & Elkordi, A. (2023). Comparison of Flexible Pavement Designs: Mechanistic-Empirical (NCHRP1-37A) Versus Empirical (AASHTO 1993) Flexible Pavement Design Using Available Local Calibration Models. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00305-2>
- Herrmann, H., & Bucksch, H. (2014a). Coarse aggregate. In *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik: English-German/Englisch-Deutsch* (p. 243). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_32772
- Herrmann, H., & Bucksch, H. (2014b). Concrete component. In *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik: English-German/Englisch-Deutsch* (p. 272). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_33904
- Hewlett, P., & Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann.
- He, X., Ma, Q., Su, Y., Zheng, Z., Tan, H., Peng, K., & Zhao, R. (2022). Humid hardened concrete waste treated by multiple wet-grinding and its reuse in concrete. *Construction and Building Materials*, 350, 128485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128485>
- Holcim. (2023a). *Agregados Finos Arena no lavada*. <https://www.holcim.com.ec/agregados-arena-no-lavada>
- Holcim. (2023b). *Agregados Gruesos Piedra # 67 SACOS*. <https://www.holcim.com.ec/agregados-grueso-piedra-67-sacos>
- Hossain, Z., & Islam, K. T. (2022). 3 - Prospects of rice husk ash as a construction material. In R. Siddique & R. Belarbi (Eds.), *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources* (pp. 61–92). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00009-7>
- Huang, L., Ye, H., Xu, L., & Chi, Y. (2021). A mechanistic model for the nonlinear bond behavior of steel reinforcement in concrete. *Engineering Structures*, 231, 111715. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111715>

- Huang, Y., Lei, Y., Luo, X., & Fu, C. (2023). Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete: A comparison of different metaheuristic algorithms for optimizing support vector regression. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02201. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02201>
- Hu, C., & de Larrard, F. (1996). The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(2), 283–294. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00213-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00213-8)
- Hwang, C. L., & Huynh, T. P. (2015). Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks. *Construction and Building Materials*, 93, 335–341. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.04.061>
- Ikpong, A. A., & Okpala, D. C. (1992). Strength characteristics of medium workability ordinary Portland cement-rice husk ash concrete. *Building and Environment*, 27(1), 105–111. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90014-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90014-G)
- Im, S., Liu, J., Cho, S., Moon, J., Park, J., Wi, K., Seok, S., Lim, S., & Bae, S. (2023). Quantitative characterization of the interfacial transition zone around lightweight and normal aggregates in cement mortars at different water-to-binder ratios. *Construction and Building Materials*, 400, 132584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132584>
- Isaia, G. C. (2000). High-performance concrete for sustainable constructions. *Waste Management Series*, 1(C), 344–354. [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(00\)80047-1](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(00)80047-1)
- ISO 1920-2:2016. (2016). *Testing of concrete -- Part 2: Properties of fresh concrete*.
- ISO 22965-1:2007. (2007). *Concrete -- Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier*.
- Jarre Castro, C. M., Puig Martínez, R. A., Zamora-Ledezma, C., & Zamora-Ledezma, E. (2021). Caracterización preliminar de la ceniza de cáscara de arroz de la provincia Manabí, Ecuador, para su empleo en hormigones. *Revista Técnica*, 44, 44+.

<https://link.gale.com/apps/doc/A658988618/AONE?u=anon~fdf122a1&sid=googleScholar&xid=94f8e917>

Jauberthie, R., Rendell, F., Tamba, S., & Cisse, I. (2000). Origin of the pozzolanic effect of rice husks. *Construction and Building Materials*, 14(8), 419–423. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00045-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00045-3)

Jensen, O. M. (2020). Autogenous Shrinkage Revisited. In K. Kovler, S. Zhutovsky, S. Spatari, & O. M. Jensen (Eds.), *Concrete Durability and Service Life Planning* (pp. 84–88). Springer International Publishing.

Joohari Ilya and Joohari, M. I. and L. A. A. (2018). Material Properties of Porous Concrete Using Recycled Coarse Aggregates. In N. A. and M. Y. N. Y. and L. Y. R. and Z. S. A. K. Y. Yacob Nor Azizah and Mohd Noor (Ed.), *Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences (RCSTSS 2016)* (pp. 291–297). Springer Singapore.

Kalra, M., & Mehmood, G. (2018). A Review paper on the Effect of different types of coarse aggregate on Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(8), 82001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/8/082001>

Kamau John, Ahmed Ash, & Ngong Killian. (2018). Sulfate Resistance of Rice Husk Ash Concrete. *MATEC Web Conf.*, 199, 2006. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819902006>

Kanagavel, R., Mohanram, B. B. K., Rengachary, Y. K., & Sandrasekaran, S. (2023). Combined effect of rice husk ash and fibers on the mechanical properties of concrete. *AIP Conference Proceedings*, 2766(1), 020059. <https://doi.org/10.1063/5.0139388>

Kannan, V., & Ganesan, K. (2016). Effect of Tricalcium Aluminate on Durability Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Rice Husk Ash and Metakaolin. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001330)

- Khan, R., Jabbar, A., Ahmad, I., Khan, W., Khan, A. N., & Mirza, J. (2012). Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 360–365. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.11.028>
- Kim, S.-H., & Kim, N. (2006). Development of performance prediction models in flexible pavement using regression analysis method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(2), 91–96. <https://doi.org/10.1007/BF02823926>
- Kirthika, S. K., Surya, M., & Singh, S. K. (2019). Effect of clay in alternative fine aggregates on performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 228, 116811. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116811>
- Kizhakkumodom Venkatanarayanan, H., & Rangaraju, P. R. (2015). Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 348–363. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2014.09.021>
- Kong, Y. K., & Kurumisawa, K. (2023). Fresh properties and characteristic testing methods for alkali-activated materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 75, 106830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106830>
- Kuan, C., Yuen, K., & Liang, M. (2012). Physical, chemical and physicochemical characterization of rice husk. *British Food Journal*, 114(6), 853–867. <https://doi.org/10.1108/00070701211234372>
- Kuity, A., & Das, A. (2020). Effect of Gradation of Fine Aggregates on Creep Deformation of Fine Aggregate Mix (FAM) and Asphalt Mix. In T. V Mathew, G. J. Joshi, N. R. Velaga, & S. Arkatkar (Eds.), *Transportation Research* (pp. 737–745). Springer Singapore.
- Kumar, A., Singha, S., Dasgupta, D., Datta, S., & Mandal, T. (2015). Simultaneous recovery of silica and treatment of rice mill wastewater using rice husk ash: An economic approach. *Ecological Engineering*, 84, 29–37. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2015.07.010>

- Kumar Das, S., Adediran, A., Rodrigue Kaze, C., Mohammed Mustakim, S., & Leklou, N. (2022). Production, characteristics, and utilization of rice husk ash in alkali activated materials: An overview of fresh and hardened state properties. *Construction and Building Materials*, 345, 128341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128341>
- Le, H. T., Siewert, K., & Ludwig, H.-M. (2015). Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 88, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.005>
- Lertsatitthanakorn, C., Atthajariyakul, S., & Soponronnarit, S. (2009). Techno-economical evaluation of a rice husk ash (RHA) based sand–cement block for reducing solar conduction heat gain to a building. *Construction and Building Materials*, 23(1), 364–369. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.11.017>
- Levy, S. M. (1992). Concrete. In *The Construction Superintendent's Handbook* (pp. 138–155). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8494-6_13
- Lin, D., Wu, J., Yan, P., & Chen, Y. (2023). Effect of residual mortar on compressive properties of modeled recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 402, 132511. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132511>
- Li, T., Nogueira, R., de Brito, J., & Liu, J. (2023). Quantitative analysis of the influence of fine aggregate's grading on mortar's rheology. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 310–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.236>
- Liu, H., & Wang, L. (2011). Fractal dimension analysis of the fine aggregate gradation of interlocking skeleton asphalt mixture. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 26(3), 567–572. <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0269-2>
- Liu, R., Pang, B., Zhao, X., & Yang, Y. (2020). Effect of rice husk ash on early hydration behavior of magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, 263, 120180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120180>

- Liu, Y., Guo, Y., Zhu, Y., An, D., Gao, W., Wang, Z., Ma, Y., & Wang, Z. (2011). A sustainable route for the preparation of activated carbon and silica from rice husk ash. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 1314–1319. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.12.007>
- Li, Z., Zhou, X., Ma, H., & Hou, D. (2022). Fresh Concrete. *Advanced Concrete Technology*, 109–169. <https://doi.org/10.1002/9781119806219.CH3>
- Lynam, C. (1934). *Growth and movement in Portland cement concrete*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135661428>
- Maksimova, I., Makridin, N., Erofeev, V., & Barabanov, D. (2021). Study of the Properties of Water-Hardened Cement Stone Depending on the Water-Cement Ratio and Age. In N. Vatin, A. Borodinecs, & B. Teltayev (Eds.), *Proceedings of EECE 2020* (pp. 192–203). Springer International Publishing.
- Manutchehr-Danai, M. (2009). Fine aggregate. In M. Manutchehr-Danai (Ed.), *Dictionary of Gems and Gemology* (p. 341). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72816-0_8343
- Ma, Q., Xiao, J., Ding, T., Duan, Z., Song, M., & Cao, X. (2023). The prediction of compressive strength for recycled coarse aggregate concrete in cold region. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02546>
- Massazza, F. (1998). 10 - Pozzolana and Pozzolanic Cements. In P. C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)* (Fourth Edition, pp. 471–635). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075066256-7/50022-9>
- Mayank, Singh, A. P., Chaturvedi, V., Singh, R. P., Kaur, P., Shivangi, & Arora, A. (2022). Effect of Crumb Rubber on Concrete by Partial Replacement of Fine Aggregates. In *Optimization of Industrial Systems* (pp. 415–421). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119755074.ch32>

- Medina, C., Sánchez De Rojas, M. I., & Frías, M. (2012). Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites*, *34*(1), 48–54. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.08.015>
- Mehta, P. K. (1973). Siliceous ashes and hydraulic cements prepared therefrom. In *U.S. Patent 4105459 (1973)*. Google Patents.
- Mendes Moraesa, C. A., Kielinga, A. G., Caetanob, M. O., & Gomesb, L. P. (2010). Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating. *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(12), 1170–1176. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2010.03.012>
- Mihret, Y. C., Delele, M. A., & Hailemesikel, S. T. (2023). Design, development, and testing of rice-husk fueled mixed-flow rice dryer for small-scale rice producer farmers. *Heliyon*, *9*(7), e18077. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18077>
- Mindess, S., Darwin, D., & Young, J. F. (2003). Concrete 2nd Edition. *Technical Documents*.
- Mohseni, E., Miyandehi, B. M., Yang, J., & Yazdi, M. A. (2015). Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-TiO₂ on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Construction and Building Materials*, *84*, 331–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.006>
- Mosaberpanah, M. A., & Umar, S. A. (2020). Utilizing Rice Husk Ash as Supplement to Cementitious Materials on Performance of Ultra High Performance Concrete: – A review. *Materials Today Sustainability*, *7–8*, 100030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100030>
- Mostafa, N. Y., & Brown, P. W. (2005). Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. *Thermochimica Acta*, *435*(2), 162–167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.05.014>

- Munro, R. (2018). Concrete. In P. T. Bobrowsky & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 179–180). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_65
- Murata, J. (1984). Flow and deformation of fresh concrete. *Matériaux et Construction*, 17(2), 117–129. <https://doi.org/10.1007/BF02473663>
- Nicole P. Hasparyk and Helena Carasek, P. J. M. M. (2000). Effect of Silica Fume and Rice Husk Ash on Alkali-Silica Reaction. *ACI Materials Journal*, 97(4), 486–492. <https://doi.org/10.14359/7416>
- Noaman, Md. A., Karim, Md. R., & Islam, Md. N. (2019). Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete. *Heliyon*, 5(6), e01926. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01926>
- Ogbuefi, P. S., Nwaokafor, P., Njoku, I. J., & Uzuegbunam, O. J. (2020). Elemental Characterization of Rice Husk Ash from Local Rice Species in South Eastern Nigeria. *Chemistry Africa*, 3(4), 1081–1085. <https://doi.org/10.1007/s42250-020-00188-7>
- Olubajo, O. O., Makarfi, I. Y., Ibrahim, M. S., Ayeni, S., & Uche, N. W. (2020). A Study on Ordinary Portland Cement Blended with Rice Husk Ash and Metakaolin. *Path of Science*, 6(1), 3001–3019. <https://doi.org/10.22178/pos.54-4>
- Padmalal, D., & Maya, K. (2014). Sand: The Fine Aggregate. In D. Padmalal & K. Maya (Eds.), *Sand Mining: Environmental Impacts and Selected Case Studies* (pp. 147–153). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9144-1_10
- Persson, A.-L. (1998). Image analysis of shape and size of fine aggregates. *Engineering Geology*, 50(1), 177–186. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00009-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00009-X)
- Pitt, N. (1976). *Process for the preparation of siliceous ashes*. Google Patents.
- Poloju, K. K. (2022). Concrete. In K. K. Poloju (Ed.), *Advanced Materials and Sustainability in Civil Engineering* (pp. 1–12). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5949-2_1

- Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2002). Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, 16(5), 281–289. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00019-3)
- Prasanth, M. S., Kumar, M. H., & Chandrasekhar, C. (2023). Effect of Different Fine Aggregate Materials in Mechanical Properties of Concrete. In D. Goyal, A. Kumar, V. Piuri, & M. Paprzycki (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Information Management and Machine Intelligence* (pp. 591–596). Springer Nature Singapore.
- Prasara-A, J., & Grant, T. (2011). Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(6), 493–502. <https://doi.org/10.1007/S11367-011-0293-7/METRICS>
- Prathima G. and Ganesh, B. and P. N. and S. G. and S. J. and P. B. and N. R. (2023). Feasibility of Processed Recycled Coarse Aggregate and Fine Aggregate as Aggregates for High Strength Concrete. In S. B. and S. A. S. Raghava G. and Singh (Ed.), *Recent Advances in Civil Engineering* (pp. 51–63). Springer Nature Singapore.
- Pronk, A. (2021). Concrete. In *Flexible Forming for Fluid Architecture* (pp. 423–568). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71551-9_11
- Provis, J. L. (2017). Cement. In P. T. Bobrowsky & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 1–3). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_47-1
- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Raheem, A. A., & Kareem, M. A. (2017). Chemical Composition and Physical Characteristics of Rice Husk Ash Blended Cement. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 32, 25–35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.32.25>
- Rahman, M. E., Muntohar, A. S., Pakrashi, V., Nagaratnam, B. H., & Sujan, D. (2014). Self compacting concrete from uncontrolled burning of rice husk and blended fine

- aggregate. *Materials & Design*, 55, 410–415.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.007>
- Ramezaniyanpour, A. A. (2014). Rice Husk Ash. In *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability* (pp. 257–298). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2_6
- Ramlan Ridhuan and Shahidan, S. and Z. N. N. and Z. S. S. M. and L. A. S. and M. S. A. and K. M. C. and N. F. M. (2020). Thermal Conductivity of Crumb Rubber as Partial Sand Replacement and Recycled Aggregates as Partial Coarse Aggregate Replacement in Concrete. In F. Mohamed Nazri (Ed.), *Proceedings of AICCE'19* (pp. 1007–1013). Springer International Publishing.
- Real, C., Alcalá, M. D., & Criado, J. M. (1996). Preparation of Silica from Rice Husks. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(8), 2012–2016.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08931.x>
- Reddy, K. C., & Hemadri, G. (2022). Characterization of high-strength concrete by Preferential supplant of scrap tyre rubber powder-bambara nut shell ash constituent: utilization of novel waste materials in concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00261-3>
- Rêgo, J. H. S., Nepomuceno, A. A., Figueiredo, E. P., Hasparyk, N. P., & Borges, L. D. (2015). Effect of Particle Size of Residual Rice-Husk Ash in Consumption of Ca(OH)₂. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 4014178.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001136](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001136)
- Rendon Diaz Miron, L. E., & Lara Magaña, M. E. (2015). Superplasticizer for High Strength Concrete. *MRS Online Proceedings Library*, 1768(1), 44–48.
<https://doi.org/10.1557/opl.2015.324>
- Rifa, A., Subhani, S. M., Bahurudeen, A., & Santhosh, K. G. (2023). A systematic comparison of performance of recycled concrete fine aggregates with other alternative fine aggregates: An approach to find a sustainable alternative to river sand. *Journal of Building Engineering*, 78, 107695.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107695>

- Rocha Álvarez, D. E., Pérez, C., & Villanueva, J. (2020). Material ecológico para construcción en vidrio, arena y poliplásticos (VAPoli). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 49–66. <https://doi.org/10.18359/rcin.4643>
- Saad, S. A., Nuruddin, M. F., Shafiq, N., & Ali, M. (2016). The Effect of Incineration Temperature to the Chemical and Physical Properties of Ultrafine Treated Rice Husk Ash (UFTRHA) as Supplementary Cementing Material (SCM). *Procedia Engineering*, 148, 163–167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.515>
- Safiuddin, Md., West, J. S., & Soudki, K. A. (2012). Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *Construction and Building Materials*, 30, 833–842. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.066>
- Sakr, K. (2006). Effects of Silica Fume and Rice Husk Ash on the Properties of Heavy Weight Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 367–376. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:3\(367\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(367))
- Salahuddin, H., Nawaz, A., Maqsoom, A., Mehmood, T., & ul Ali Zeeshan, B. (2019). Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 415–425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.011>
- Sargent, P. (2015). 21 - The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In F. Pacheco-Torgal, J. A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, & P. Chindaprasirt (Eds.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (pp. 555–604). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.555>
- Sarta-Forero, H. N., & Silva-Rodríguez, J. L. (2017). *Análisis comparativo entre el concreto simple y el concreto con adición de fibra de acero al 4% y 6%*.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1589–1598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.011>

- Schlangen, E., Liang, M., & Savija, B. (2023). The Influence of Autogenous Shrinkage and Creep on the Risk of Early Age Cracking. In P. Rossi & J.-L. Tailhan (Eds.), *Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures* (pp. 327–334). Springer International Publishing.
- Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 78, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025>
- Setareh, M., & Darvas, R. (2017). *Concrete Structures*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24115-9>
- Shackley, S., Carter, S., Knowles, T., Middelink, E., Haefele, S., & Haszeldine, S. (2012). Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part II: Field trial results, carbon abatement, economic assessment and conclusions. *Energy Policy*, 41, 618–623. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.11.023>
- Shackley, S., Carter, S., Knowles, T., Middelink, E., Haefele, S., Sohi, S., Cross, A., & Haszeldine, S. (2012). Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. *Energy Policy*, 42, 49–58. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.11.026>
- Siddika, A., Mamun, Md. A. Al, & Ali, Md. H. (2018). Study on concrete with rice husk ash. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0127-6>
- Siddique, R. (2008). Rice Husk Ash. In *Waste Materials and By-Products in Concrete* (pp. 235–264). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4_7
- S.K., K., Singh, S. K., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122089>

- Smith, R., & Kamwanga, G. (1986). The use of rice husk for making a cementitious material. International RILEM/CIB/NCCL Symposium Use of Vegetable Plants and Their Fibres as Building Materials. *Materials and Structures*, 19(6), 460. <https://doi.org/10.1007/BF02472154>
- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., & González, L. A. (2015). Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, 264, 899–935. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.056>
- Soni, S., & Ojha, D. (2021). A Study on Use of Rice Husk Ash in Concrete. *Journal of Mechanical and Construction Engineering (JMCE)*, 1(1), 1–4. <https://doi.org/10.54060/JMCE/001.01.002>
- Soutsos, M., & Domone, P. (2017). *Construction Materials* (M. Soutsos & P. Domone, Eds.; 5th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315164595>
- Špak, M., Kozlovská, M., Struková, Z., & Bašková, R. (2016). Comparison of Conventional and Advanced Concrete Technologies in terms of Construction Efficiency. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1), 1903729. <https://doi.org/10.1155/2016/1903729>
- Sua-iam, G., & Makul, N. (2013). Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 38, 455–464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.016>
- Subashi De Silva, G. H. M. J., & Priyamali, M. W. S. (2022). Potential use of waste rice husk ash for concrete paving blocks: strength, durability, and run-off properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(7), 2265–2277. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1851029>
- Suleimanov, B. A., Veliyev, E. F., & Aliyev, A. A. (2023). Composition and Classification of Portland Cement. In *Oil and Gas Well Cementing for Engineers* (pp. 19–30). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394164882.ch2>

- Suntharalingam, S., & Takahashi, Y. (2020). Properties of Portland Blast Furnace Slag Cements Affecting Their Autogenous Shrinkage Behaviors. In R. Dissanayake & P. Mendis (Eds.), *ICSBE 2018* (pp. 513–525). Springer Singapore.
- Supit, S. W. M., & Shaikh, F. U. A. (2015). Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and Structures*, *48*(8), 2431–2445. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0329-0>
- Syahida Adnan, Z., Ariffin, N. F., Syed Mohsin, S. M., & Abdul Shukor Lim, N. H. (2022). Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete. *Materials Today: Proceedings*, *48*, 842–848. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.400>
- Torkaman, J., Ashori, A., & Sadr Momtazi, A. (2014). Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials*, *50*, 432–436. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.09.044>
- Vahedifard, F., Nili, M., & Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, *24*(12), 2528–2535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.003>
- Varshney, H. (2016). Utilization of Rice Husk Ash in concrete as cement replacement. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, *01*(01), 28–33. <https://doi.org/10.9790/1684-15010010128-33>
- Vrcelj, Z., Bradford, M. A., Uy, B., & Wright, H. D. (2002). Buckling of the steel component of a composite member caused by shrinkage and creep of the concrete component. *Progress in Structural Engineering and Materials*, *4*(2), 186–192. <https://doi.org/10.1002/pse.131>
- Wang, C., Han, Z., Wang, Y., Wang, C., & Chen, S. (2023). A novel method for measuring and analyzing the characteristics of coarse aggregates in concrete. *Journal of Building Engineering*, *78*, 107730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107730>

- Wang, W., Meng, Y., & Wang, D. (2017). Effect of Rice Husk Ash on High-Temperature Mechanical Properties and Microstructure of Concrete. *Kemija u Industriji*, 66(3–4), 157–164. <https://doi.org/10.15255/KUI.2016.054>
- Wang, Y., Hu, H. X., Liu, S. J., Chen, S. J., & Xu, Z. Z. (2017). The effect of water-cement ratio on acousto-ultrasonic characteristics in mortar. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 53(2), 148–158. <https://doi.org/10.1134/S1061830917020097>
- Xiao, J., Lv, Z., Duan, Z., & Zhang, C. (2023). Pore structure characteristics, modulation and its effect on concrete properties: A review. *Construction and Building Materials*, 397, 132430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132430>
- Xu, W., Lo, T. Y., Wang, W., Ouyang, D., Wang, P., & Xing, F. (2016). Pozzolanic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study. *Materials (Basel, Switzerland)*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/ma9030146>
- Yao, W., Bai, M., Pang, J., & Liu, T. (2022). Performance degradation and damage model of rice husk ash concrete under dry–wet cycles of sulfate environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59173–59189. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19955-9>
- Ye Guang and Huang, H. and V. T. N. (2018). Rice Husk Ash. In M. and G. E. De Belie Nele and Soutsos (Ed.), *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4* (pp. 283–302). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_8
- Young, J. F. (2001). Portland Cements. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 7768–7773). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01398-X>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating

- durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 73–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>
- Zhang, L., Qian, X., Lai, J., Qian, K., & Fang, M. (2020). Effect of different wind speeds and sealed curing time on early-age shrinkage of cement paste. *Construction and Building Materials*, 255, 119366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119366>
- Zhang, M.-H., & Malhotra, V. (1996). High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material. *Aci Materials Journal*, 93, 629–636.
- Zhong, Y., Yao, J., Lin, J., & Yao, D. (2022). Research on Impact Factors of Workability of Roller Compacted Concrete Based on Modified Vebe Test. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(6), 20210641. <https://doi.org/10.1520/JTE20210641>
- Zhu, P., Chen, K., & Hu, K. (2019). Carbonation Behavior of Repeated Recycled Fine Aggregate Concrete under Bending Load. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2), 729–736. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0348-4>
- Zunino, F., & Lopez, M. (2016). Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach. *Cement and Concrete Composites*, 65, 19–28. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2015.10.003>

ANEXO

Anexo 1 Puesta del cilindro en la máquina de compresión



Anexo 2 Ruptura del cilindro de hormigón



Anexo 3 Análisis manual de los cilindros de hormigón sometidos a compresión



Anexo 4 Evidencia de los testigos sometidos a compresión



Anexo 5 Resultado de la compresión de testigo



Anexo 6 Fabricación del bloque de hormigón con cascarilla de arroz

