

Análisis del desempeño de la ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento hidráulico en el concreto

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Análisis del desempeño de la ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento hidráulico en el concreto

Llevado a cabo por el estudiante:
Calderón Solano Diego Esteban

Carné: 2016106370

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador el viernes 07 de octubre de 2022 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

ANGEL
HUMBERTO
NAVARRO
MORA (FIRMA)

Firmado digitalmente
por ANGEL
HUMBERTO
NAVARRO MORA
(FIRMA)
Fecha: 2022.10.07
13:47:53 -06'00'

Ing. Angel Navarro Mora, MSc.
Representante Director de la Escuela

ROMMEL
LEZING CUEVAS
KAUFFMANN
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por ROMMEL LEZING
CUEVAS KAUFFMANN
(FIRMA)
Fecha: 2022.10.10
14:19:32 -06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann
Profesor Guía

GIANNINA
ORTIZ
QUESADA
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por GIANNINA ORTIZ
QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2022.10.10
11:40:47 -06'00'

Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.
Profesor Lector

MILTON
ANTONIO
SANDOVAL
QUIROS (FIRMA)

Firmado digitalmente por
MILTON ANTONIO
SANDOVAL QUIROS
(FIRMA)
Fecha: 2022.10.07
13:39:19 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MBA
Profesor Observador

Abstract

In this study, the performance of rice husk ash as partial replacement of hydraulic cement in concrete is analyzed. This extends from the need of the Nacional Rice Corporation (Conarroz) of finding possible uses to this by-product obtained from the rice plant during harvest.

The rice husk ash content replacement defined for the concrete mixes were 10, 20 and 30%; and Conarroz provided rice husk ash from three different harvests. Nine concrete mix designs were made contemplating all the possible combinations of rice husk ash and content replacements and one concrete mix design was made for the regular concrete.

In total, 45 concrete specimens were made per concrete mix, which were tested at the ages of 7, 14 and 28 days to determine the compressive strength of the concretes. The results were corroborated by a statistical analysis which helped identify possible sources of variation.

The results showed that the rice husk ash has a negative impact in the development of the compressive strength of concrete, and none of the concrete mixes made with rice husk ash surpassed the compressive strength of the regular concrete reached at the 28-day mark.

Keywords: concrete, rice husk ash, hydraulic cement, replacements of cementitious materials

Resumen

En el presente estudio se analizó el desempeño de la ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento hidráulico en el concreto. Esto a partir de la necesidad de la Corporación Arrocera Nacional (Conarroz), de encontrar posibles usos a este subproducto obtenido de la cosecha de arroz.

Se definieron como 10%, 20% y 30% los porcentajes de sustitución de ceniza de cascarilla de arroz por cemento hidráulico y Conarroz brindó este material de tres cosechas distintas por lo que se realizaron nueve diseños de mezcla contemplando las posibles combinaciones de ceniza de cascarilla de arroz y porcentajes de sustitución, y un diseño de mezcla del concreto control.

Por mezcla, se elaboraron 45 especímenes cilíndricos de concreto que se fallaron a 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia a la compresión de los concretos. Los resultados se sometieron a un tratamiento estadístico para verificar la confiabilidad de los datos y determinar posibles fuentes de variación.

Se demostró que la implementación de la ceniza de cascarilla de arroz impacta negativamente el desarrollo de la resistencia en los concretos y ninguno de los concretos elaborados con este material sobrepasa la resistencia alcanzada por el concreto control a los 28 días.

Palabras clave: concreto hidráulico, ceniza de cascarilla de arroz, cemento hidráulico, sustitutos de materiales cementicios

Análisis del desempeño de la ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento hidráulico en el concreto

DIEGO ESTEBAN CALDERÓN SOLANO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Agosto del 2022

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Contenido.....	1
Prefacio	2
Resumen ejecutivo	4
Introducción.....	6
Marco Teórico	8
Metodología	14
Resultados	26
Análisis de Resultados.....	36
Conclusiones.....	43
Recomendaciones	45
Apéndices	46
Referencias	47

Prefacio

Según Enshassi et al., (2014), “el sector de la construcción es considerado mundialmente como una de las principales fuentes de contaminación ambiental, pues produce enormes efectos medioambientales de forma directa e indirecta”.

Si bien es cierto, existen muchas posibles fuentes de contaminación en la industria de la construcción, la producción del cemento se puede considerar como la mayor fuente de contaminación. “La producción de cemento representa entre el 8 y el 10% de las emisiones globales de dióxido de carbono. La producción de una tonelada de cemento Portland, libera alrededor de una tonelada de dióxido de carbono” (Vargas & Rigamonti, 2020).

Una de las principales causas del calentamiento global es la emisión de gases de efecto invernadero. “La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera es ahora más alta que en cualquier momento en los últimos 800.000 años” (National Appropriate Mitigation Actions [NAMA], 2018).

Es claro que la producción del cemento es un gran participante en el calentamiento global debido a sus emisiones y, con la misión de Costa Rica de ser carbono neutral para el año 2100, se deben buscar materiales alternativos que reduzcan la contaminación proveniente de la producción de cemento. “Para mitigar este efecto, la comunidad de investigación ha investigado el uso de materiales de desecho que poseen propiedades químicas similares a las del cemento, como sustituto parcial de este. La ceniza de cascarilla de arroz ha mostrado ser un material contendiente en estas investigaciones” (Adnan et al., 2021).

La producción de arroz es una de las actividades agrícola más importantes en el mundo, la cual genera una gran cantidad de desechos. Los granos de arroz están dentro de una capa

protectora conocida como cascarilla de arroz y a la hora de cosechar, los granos deben separarse de esta cascarilla generando así un subproducto. “Aproximadamente 1.000 millones de toneladas de arroz son producidas anualmente, cantidad que generalmente deja 400 millones de toneladas de cascarilla de arroz como material de desecho” (Asmahani et al., 2015).

En un entorno nacional, a la Corporación Arrocera Nacional (Conarroz), la cual es responsable de proteger y promover la actividad arrocera nacional en forma integrada, se le presenta la misma situación con este subproducto ya que tienen grandes cantidades de cascarilla de arroz provenientes de la cosecha de los granos. Según reporta Conarroz, la producción de arroz en el periodo 2020-2021 fue de 152.271 toneladas métricas, de las cuales un 23,17% son de cascarilla de arroz. También reporta que no toda la cascarilla de arroz la incineran, sin embargo, gran parte de este porcentaje si se procesa para obtener ceniza.

La cascarilla de arroz cuenta con una estructura interna compuesta por lignina (25-35%), celulosa (50%), humedad (10-15%) y sílice (15-20%) (Gravitt, 2013). Es este último rubro el cual hace que la ceniza obtenida de la cascarilla de arroz sea un material con gran potencial para utilizarse como sustituto parcial del cemento en las mezclas de concreto. “Uno de los criterios importantes de los materiales de cementación suplementarios es que posean un alto contenido de sílice reactivo, el cuál es esencial para el desarrollo de resistencia en el concreto. Está probado que la ceniza de cascarilla de arroz contiene un alto contenido de óxido de sílice, haciéndolo un material puzolánico altamente reactivo” (Asmahani et al., 2015).

Existe una amplia cantidad de investigaciones internacionales relacionadas al

uso de la ceniza de cascarilla de arroz, sin embargo, en el ámbito nacional no se encontraron investigaciones relacionadas al uso de la ceniza de cascarilla de arroz en los concreto.

A partir de lo anterior, y consecuentemente con los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de la Naciones Unidas (ONU); puntualmente los objetivos 9. Industria, Innovación e Infraestructura, el cual se enfoca en la construcción de infraestructuras resilientes, en la promoción de la industrialización sostenible y en la fomentación de la innovación, y 12. Producción y Consumo Responsables el cual se enfoca en garantizar modelos de consumo y producción sostenibles, el uso de la ceniza de la cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento hidráulico en la elaboración de concreto amerita su estudio.

Se propuso, por medio del objetivo general del proyecto y con la ayuda de Conarroz, la evaluación del desempeño mecánico de los concretos con 10%, 20% y 30% de sustitución para determinar si existe afectación alguna en el desarrollo de la resistencia del concreto y valorar la posible implementación de este material en las mezclas de concreto hidráulico.

El agradecimiento de este trabajo va dirigido primeramente a mi familia que me ha dado todo para desarrollar mi educación y me ha brindado su apoyo incondicional durante mis años de estudio. A mi profesor Rommel Cuevas, el cual no solo fue mi guía en el proyecto, sino que también durante toda la carrera y fue quién despertó mi pasión por la investigación. También quiero agradecer a los técnicos de laboratorio Eduardo Arce, Heiner Navarro, Juan Carlos Coto Luis Carlos Calvo y al estudiante Jean Paul Ramírez. Sin su apoyo y ayuda no hubiera podido desarrollar este proyecto. Finalmente agradezco la confianza y apoyo que me brindó Conarroz para desarrollar esta investigación con su producto.

Resumen ejecutivo

El presente estudio fue realizado en el laboratorio de concreto de las instalaciones del Centro Experimental de Construcción (CECO), perteneciente al Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO).

Como objetivo general del estudio se planteó evaluar el desempeño del concreto hidráulico con el uso de ceniza de cascarilla de arroz como un sustituto parcial del cemento hidráulico manteniendo constante el tipo de cemento, los agregados y la relación agua cemento. De este objetivo general surgieron los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los agregados a utilizar en la elaboración del concreto hidráulico.
- Identificar los elementos y compuestos que componen la estructura interna de la ceniza de cascarilla de arroz.
- Determinar el desempeño mecánico de los concretos elaborados.
- Evaluar el efecto que tiene la implementación de la ceniza de cascarilla de arroz en el desempeño mecánico de los concretos y determinar el porcentaje de sustitución óptimo de este material en una mezcla de concreto.

El objetivo general nació de la necesidad de la Conarroz de encontrar posibles usos a este material, el cual es un subproducto que se genera de la cosecha de los granos de arroz.

Conarroz brindó ceniza de cascarilla de arroz de tres fuentes distintas y se definieron los como 10%, 20% y 30% los porcentajes de sustitución. Para poder evaluar su desempeño, se realizó un diseño de mezcla de concreto control y nueve diseños de mezcla que contemplan las

posibles combinaciones entre fuentes de ceniza y porcentajes de sustitución. Estos diseños de mezcla se realizaron siguiendo lo establecido en la guía ACI 211.1-91.

Las fuentes de ceniza de cascarilla de arroz se identificaron como MP MC y MPC y las mezclas de concretos se identificaron de la siguiente manera:

- La mezcla de concreto control se identificó como CC.
- Las mezclas de concreto con ceniza de la fuente MP se identificaron como MP 90-10, MP 80-20, MP 70-30. El primer número es el porcentaje de cemento hidráulico y el segundo es el porcentaje de sustitución de ceniza de cascarilla de arroz.
- Las mezclas de concreto con ceniza de la fuente MC se identificaron como MC 90-10, MC 80-20, MC 70-30.
- Las mezclas de concreto con ceniza de la fuente MPC se identificaron como MPC 90-10, MPC 80-20, MPC 70-30.

Para desarrollar este estudio se siguió la filosofía de la guía ACI 214R-11 la cual establece la cantidad de especímenes de concreto y cuales parámetros estadísticos utilizar para una correcta interpretación de los resultados de resistencia a la compresión del concreto. Siguiendo las recomendaciones de la guía, se determinó una cantidad de 45 especímenes cilíndricos de 100x200 mm por mezcla los cuales se dividieron en 15 cilindros por edad de falla (7,14 y 28 días).

Se elaboraron las diez mezclas de concreto y se moldearon los especímenes, los cuales fueron desmoldados luego de 24 horas y se

colocaron en una cámara húmeda hasta el momento de la falla para determinar la resistencia a la compresión.

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión fueron sometidos a un tratamiento estadístico para verificar la confiabilidad de los datos y determinar posibles fuentes de variación utilizando el software estadístico Minitab. El tratamiento estadístico abarcó los aspectos de dispersión de datos, determinación de valores atípicos, normalidad de los datos y determinación de parámetros de estadística descriptiva.

Luego del tratamiento estadístico se determinaron como posibles fuentes de variación las siguiente:

- Presentar tiempos de moldeo altos ocasiona pérdida en la trabajabilidad de las mezclas.
- La composición química de las cenizas de cascarilla de arroz varía según la fuente como se puede observar en el Cuadro 31.
- Variaciones en el proceso de compactación de los especímenes.
- Pérdida de agua a través de los moldes.
- Agotamiento de los operarios.

En cuanto a la resistencia a la compresión de los concretos, se obtuvo que solo el concreto control sobrepasó la resistencia de diseño (f'_c). Comparando la resistencia a la compresión del concreto control con los concretos realizados con ceniza de cascarilla de arroz se determinó que la ceniza tiene un impacto negativo en el desarrollo de la resistencia del concreto.

En cuanto a las cenizas de cascarilla de arroz, por medio de un análisis comparativo se determinó que la fuente que genera el menor impacto en el desarrollo de la resistencia es la MP y el porcentaje de sustitución que genera una mayor resistencia al concreto es el de 10% por lo que la mezcla MP 90-10 es la que presentó un mejor desempeño mecánico.

Introducción

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el desempeño del concreto hidráulico con el uso de ceniza de cascarilla de arroz como un sustituto parcial del cemento hidráulico. Se plantea este objetivo con la finalidad de comparar de manera experimental el comportamiento de un concreto hidráulico convencional y un concreto hidráulico con ceniza de cascarilla de arroz.

En el ámbito internacional se han realizado investigaciones utilizando este material. Un estudio realizado por Muthadhi y Kothandaraman en el 2013, compara los resultados del desempeño mecánico de concreto elaborados con sustituciones parciales de cemento Portland por ceniza de cascarilla de arroz. Dicho estudio contempla cuatro concretos elaborados con 10%, 15%, 20% y 30% de sustitución y determina que el porcentaje de sustitución óptimo es el de 20%.

Asimismo, se demostró que la ceniza de cascarilla de arroz posee un gran potencial para el desarrollo de resistencia en el concreto hidráulico. “Uno de los criterios importantes de los materiales de cementación suplementarios es que posean un alto contenido de sílice reactivo, el cuál es esencial para el desarrollo de resistencia en el concreto, Está probado que la ceniza de cascarilla de arroz contiene un alto contenido de óxido de sílice, haciéndolo un material puzolánico altamente reactivo” (Asmahani et al., 2021).

Por otra parte, en Costa Rica, a la fecha, no se han realizado estudios con este material por lo que se está generando un antecedente.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el desempeño del concreto hidráulico con el uso de ceniza de cascarilla de arroz como un sustituto parcial del cemento hidráulico manteniendo constante el tipo de cemento, los agregados y la relación agua cemento.

Objetivos Específicos

- Caracterizar los agregados a utilizar en la elaboración del concreto hidráulico.
- Identificar los elementos y compuestos que componen la estructura interna de la ceniza de cascarilla de arroz.
- Determinar el desempeño mecánico de los concretos elaborados.
- Evaluar el efecto que tiene la implementación de la ceniza de cascarilla de arroz en el desempeño mecánico de los concretos y determinar cuál es el porcentaje de sustitución de este material que genera el mejor desempeño mecánico de los concretos.

Para el cumplimiento del objetivo general, Conarroz brindó ceniza de cascarilla de arroz de tres fuentes distintas, las cuales fueron identificadas por Conarroz como MP, MC y MPC. También se definieron, según lo demostrado en investigaciones previas, los porcentajes de sustitución de 10%, 20% y 30%.

Con esto se realizaron 10 mezclas de concreto, una de concreto convencional la cual se identificó como CC y nueve mezclas de concreto

con ceniza de cascarilla de arroz las cuales fueron identificadas con la fuente de la ceniza y luego con porcentaje de cemento hidráulico y el porcentaje de ceniza, por ejemplo, MP 90-10.

Marco Teórico

Cemento hidráulico

Este es un material inorgánico finamente molido que, al ser mezclado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación. Cuando esta pasta endurece, conserva su resistencia y estabilidad. El cemento hidráulico está compuesto por clinker de cemento Portland y sulfato de calcio (INTE C147, 2021).

La resistencia que debe cumplir el cemento hidráulico depende de la clase de resistencia que este posea. Se contemplan 5 clases de resistencia: clase 17, clase 21, clase 25, clase 28 y clase AR (Alta Resistencia Inicial). Los requisitos de resistencia a la compresión de las clases anteriores se indican en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Resistencia a la compresión del cemento hidráulico.				
Clases de Resistencia	Resistencia a la compresión (MPa)			
	1 día	3 días	7 días	28 días
17	-	-	7	17
21	-	5	11	21
25	-	11	18	25
28	-	13	20	28
AR	12	24	-	-

Fuente: INTE C147, 2021

Agregados

Agregado Fino

Los materiales que se pueden considerar como agregado fino son arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas que tiene un tamaño inferior 4,75 mm (tamiz N°4) y es superior a 0,075 mm (tamiz N°200).

Agregado Grueso

El agregado grueso consiste en grava, piedra, o una combinación de estos materiales tiene un tamaño superior a 4,75 mm (tamiz N°4).

Concreto hidráulico

El concreto hidráulico es un material obtenido de la mezcla de un conglomerante, agregados y agua. El conglomerante que se utilizado en este tipo de concreto es el cemento hidráulico y este inicia su reacción al entrar en contacto con el agua.

Este material es excelente para resistir la aplicación de cargas de compresión. Un factor de suma importancia a considerar en cuanto a la resistencia a la compresión del concreto es relación entre el agua y el cemento (A/C) ya que la cantidad de agua puede afectar el desarrollo de resistencia. “Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión tienen un grado alto de dependencia de la relación Agua/Cemento (A/C), de hecho, son inversamente proporcionales” (Zúñiga, 2020).

Lo mencionado anteriormente quiere decir que mientras más agua se le agregue a la mezcla,

aumenta su trabajabilidad al hacerse más fluida, pero su resistencia disminuye.

La resistencia a la compresión obtenida a los 28 días sin importar el método de diseño es especificada como f_c . El Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-10) establece que este valor debe ser mínimo de 210 kg/cm² (20,59 MPa) por lo que es la resistencia base de los diseños de mezcla utilizados en el desarrollo de este estudio.

Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

Los granos de arroz están recubiertos por una capa protectora natural llamada por los científicos botánicos, escamas de flores y es comúnmente conocida como cascarilla de arroz.

Esta cascarilla es un subproducto de la cosecha del arroz y al ser incinerada, la ceniza obtenida presenta niveles de sílice reactiva, sin embargo, las características de la ceniza dependen del contenido químico de la cascarilla y de la temperatura de incineración. “Debido a su alto contenido de óxido de silicio, la ceniza de cascarilla de arroz es un material puzolánico extremadamente activo” (Amran et al., 2021). De este punto en adelante, la ceniza de cascarilla de arroz será identificada como “CCA”.

Normas Técnicas

Las normas técnicas utilizadas en el desarrollo de este proyecto son del “American Society of Testing and Materials” (ASTM) y del “American Concrete Institute” (ACI) y se describen brevemente a continuación.

ASTM D75-19

Standard Practice for Sampling Aggregates:

Esta práctica establece los métodos de muestreo de agregados tanto finos como gruesos

y establece las condiciones de aceptación o rechazo de los materiales.

ASTM C702-18

Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size:

Esta práctica abarca los métodos con los que se pueden reducir los tamaños de muestras de los agregados para obtener un tamaño representativo y aleatorio para los ensayos a realizar.

ASTM C136-19

Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates:

Este método cubre el procedimiento para tamizar tanto el agregado fino como el agregado grueso y de esta manera determinar el tamaño máximo nominal de la piedra y el módulo de finura de la arena, los cuales son parámetros de gran importancia para realizar el diseño de mezcla.

ASTM C117-17

Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing:

Este método abarca el procedimiento para determinar, por medio de un lavado, el material fino que tiene un tamaño de partícula menor a 0,075 mm (tamiz N°200).

ASTM C127-17

Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Coarse Aggregate:

Este método abarca los procedimientos para determinar la gravedad específica seca al horno, la gravedad específica saturada superficie seca y la gravedad aparente y contenido de absorción de los agregados gruesos.

ASTM C128-15

Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Fine Aggregate:

Este método abarca los procedimientos para determinar la gravedad específica seca al horno, la gravedad específica saturada superficie seca y la gravedad aparente y contenido de absorción de los agregados finos.

ASTM C29-17

Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate:

Este método cubre los procedimientos para determinar el peso unitario de los agregados tanto finos como grueso en condición suelta y compactada.

ASTM C192-19

Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory:

Esta práctica abarca los procedimientos para la fabricación del concreto, los especímenes de concreto y el curado de estos especímenes en condiciones de laboratorio.

ASTM C143-20

Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete:

Este método cubre el procedimiento para determinar el asentamiento del concreto elaborado con cemento hidráulico.

ASTM C1064-17

Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete:

Este método abarca el procedimiento para la determinación de la temperatura de concreto en estado fresco elaborado con cemento hidráulico.

ASTM C39-21

Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens:

Este método cubre el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

ACI-211.1-91

Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete:

Esta práctica abarca el procedimiento para la determinación de la dosificación de material para la elaboración del concreto hidráulico. Al ser una práctica estándar para los Estados Unidos, se deben realizar concretos de calibración para ajustar la dosificación a una que contemple las características tanto de los cementos hidráulicos como de los agregados que se utilizan en Costa Rica.

ACI 214R-11

Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete:

Esta guía contempla los parámetros necesarios para una correcta evaluación de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto. Parámetros como la media aritmética o promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el rango de una muestra.

También establece, en el apartado 2 del capítulo 5, que los resultados de resistencia a la compresión utilizados para determinar estos parámetros estadísticos deben obtenerse de un grupo de al menos 30 especímenes por edad de falla.

ACI 318-19

Building Code Requirements for Structural Concrete:

Este código contiene una excepción al tamaño mínimo del grupo de especímenes por edad definido en la guía anterior.

Establece en el capítulo 5 que, si no se cuenta con las condiciones necesarias para realizar 30 especímenes por edad de falla, se permite realizar las pruebas con un mínimo de 15 especímenes por edad de falla para determinar los parámetros estadísticos.

Parámetros estadísticos

A continuación, se describen los parámetros estadísticos necesarios para utilizar la guía ACI 214R-11.

Promedio

El promedio de una muestra de n mediciones es la suma de las mediciones que conforman la muestra dividida entre el número de mediciones (n) que conforman la muestra.

Varianza

La varianza de una muestra de n mediciones es la suma elevada al cuadrado de la diferencia entre una medición de la muestra y el promedio de la muestra dividido entre $n-1$.

Desviación estándar

La desviación estándar de una muestra de n mediciones se determina como raíz cuadrada de la varianza determinada para la misma muestra. Este es el parámetro más común para medir la dispersión de datos en una muestra.

Coeficiente de variación

El coeficiente de variación se determina como el promedio de una muestra entre la desviación estándar de la misma muestra y se expresa en porcentaje.

Rango

El rango de una muestra de n mediciones se determina como la diferencia entre la medición de mayor magnitud y la medición de menor magnitud.

Distribución normal

La distribución normal es definida matemáticamente por los parámetros estadísticos promedio y desviación estándar de una muestra. Esta distribución tiene la característica que el 68,27% de los datos analizados caen dentro de una desviación estándar del promedio y el 95,45% de los datos analizados caen dentro de dos desviaciones estándar.

En la Figura 1 se muestra una distribución normal de datos. Cada punto en el gráfico representa una medición.

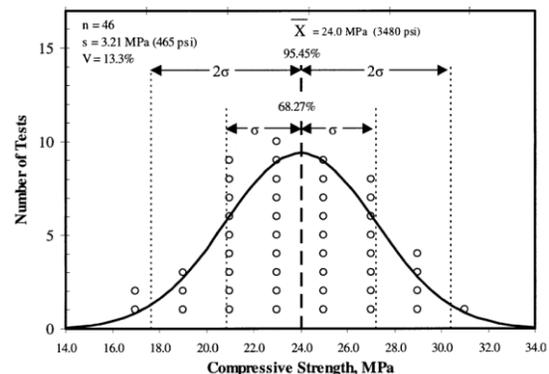


Figura 1. Distribución normal de un conjunto de datos de resistencia a la compresión.

Fuente: ACI 214R-11

Nivel de confianza

El nivel de confianza representa el porcentaje de intervalos que incluirán el parámetro de población al tomar muestras de esta. Generalmente se define al 95% y esto indica que, si se tienen cien muestras, aproximadamente el 95% de estas incluyen el parámetro de población y media (Minitab, 2018).

Pruebas de hipótesis

Una prueba de hipótesis es una regla que especifica si se puede aceptar o rechazar una afirmación de una población (Minitab, 2018). Para realizar esta prueba definen dos hipótesis diferentes, primero se tiene la hipótesis nula (H_0) la cual dice que caso en estudio se probará. Por otra parte, se tiene la hipótesis alternativa (H_1) que niega la hipótesis nula.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula se debe hacer uso del valor de probabilidad o Valor-P.

Valor de probabilidad (Valor-P) y nivel de significancia

El nivel de significancia es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula. Si se define un nivel de confianza del 95%, se tiene que el nivel de significancia deber ser del 5%.

Por otra parte, el valor de probabilidad es la probabilidad de obtener un efecto por lo menos tan extremo como el de los datos de la muestra, asumiendo que la hipótesis nula es verdadera (Minitab, 2018). Si el valor de probabilidad es menor que el nivel de significancia, la hipótesis nula debe ser rechazada. Mientras que, si el valor de probabilidad es mayor al nivel de significancia, la hipótesis nula debe ser aceptada.

Valores atípicos

Un valor atípico es un valor que parece desviarse en cualquier dirección de los demás valores que

conforman el grupo de datos. Para verificar si los grupos de datos presentan valores atípicos se deben plantear la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 = el conjunto de datos no presenta valores atípicos.

H_1 = el conjunto de datos presenta valores atípicos.

Con las hipótesis definidas, se valúan los datos por medio de una prueba de valores atípicos. En este estudio se utiliza la prueba de Grubbs.

Prueba de normalidad

Para determinar si un conjunto de datos cuenta con una distribución normal se deben plantear la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 = el conjunto de datos es normalmente distribuido.

H_1 = el conjunto de datos no es normalmente distribuido.

Con las hipótesis definidas, se evalúan los datos por medio de una prueba de normalidad. En este estudio se utilizan las pruebas Anderson-Darling y Ryan-Joiner.

Antecedentes

En el contexto de estudios realizados a nivel nacional, no se tienen trabajos que estudien la implementación de CCA en la elaboración de concreto hidráulico. Por otra parte, a nivel internacional si es un tema ampliamente estudiado.

Un estudio realizado por Muthadhi y Kothandaraman en el 2013 titulado “Experimental Investigations of Performance Characteristics of Rice Husk Ash-Blended Concrete”, compara los resultados del desempeño mecánico de concreto elaborados con sustituciones parciales de cemento Portland por CCA. Dicho estudio contempló cuatro concretos elaborados con 10, 15, 20 y 30% de sustitución y determinó que el porcentaje de sustitución óptimo es el de 20%.

Asimismo, se demostró, en el proyecto “Pozzolanic Reaction Mechanism of Rice Husk Ash in Concrete – A Review” por Asmahani et al., 2015, que la CCA posee un gran potencial para el

desarrollo de resistencia en el concreto hidráulico. “Uno de los criterios importantes de los materiales de cementación suplementarios es que posean un alto contenido de sílice reactivo, el cuál es esencial para el desarrollo de resistencia en el concreto, Está probado que la ceniza de cascarilla de arroz contiene un alto contenido de óxido de sílice, haciéndolo un material puzolánico altamente reactivo” (Asmahani et al., 2015).

De igual forma, el proyecto “The Effect of Incineration Temperature to Chemical and Physical Properties of Ultrafine Treated Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material – A Comprehensive Review” por Asmahani et al., 2016, analizó el efecto que tiene la temperatura de incineración y el tiempo de incinerado en la calidad de la ceniza producida y determinó que incinerar la cascarilla del arroz a una temperatura que está entre 500 y 700 °C por un tiempo de 120 minutos produce la mayor cantidad de sílice reactivo.

Thomas Blessen Skariah (2018), desarrolló un estudio titulado “Green Concrete Partially Comprised of Rice Husk Ash as a Supplementary Cementitious Material – A Comprehensive Review”, comprobó que la implementación de CCA tiene efectos diferentes en el concreto fresco y en el concreto endurecido. Determinó que un porcentaje de sustitución de CCA mayor al 10% reduce la trabajabilidad del concreto fresco ya que la ceniza demanda más agua y se debe corregir ajustando el agua de la mezcla o utilizando un aditivo supe plastificante.

Por otra parte, determinó que un porcentaje de sustitución de CCA entre 10 y 20% incrementa significativamente la resistencia a la compresión del concreto.

Metodología

Para el desarrollo del presente estudio fue necesaria la realización de ensayos, los cuales se realizaron en conformidad con las normas de ACI y ASTM. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de concreto de las instalaciones del Centro Experimental de Construcción (CECO), perteneciente al Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO).

Los procedimientos realizados para el desarrollo de este estudio se mencionan a continuación:

- Caracterización de los agregados.
- Diseño de mezcla de concreto.
- Elaboración, curado y falla a compresión de los especímenes de concreto.
- Tratamiento estadístico de los resultados de resistencia a la compresión de los concretos realizados.

Caracterización de los agregados

Los ensayos realizados para determinar necesarios las propiedades de los agregados se detallan a continuación y se realizaron de acuerdo con la normativa ASTM.

Muestreo de agregados y reducción de la muestra

El muestreo de los agregados se realizó de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma ASTM D75-19.

El agregado grueso se encontraba en un silo del perteneciente al laboratorio de Concreto del CECO. Se homogenizó el material por completo. Por otra parte, el agregado fino se encontraba almacenado en sacos ya que este era material sobrante de una investigación estudiantil realizada en el CECO. Este también se homogenizó por completo.



Figura 2. Muestreo del agregado grueso.

La reducción de muestras se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C702-18.

De los tres métodos permitidos por la norma, se utilizó el método que utiliza un divisor mecánico (método A). Este divisor debe contar con al menos ocho aberturas para agregado grueso y 12 para agregado fino. Este método se utilizó para ambos agregados.



Figura 3. Divisor mecánico para agregados grueso.

Los pasos seguidos para obtener las muestras se describen a continuación:

1. Se identificaron y pesaron todas las bandejas y recipientes en los que cae el material.
2. Se llenó uno de los recipientes distribuyendo el material para asegurar que no hubiera más cantidad en un extremo del recipiente.
3. Se introdujo el material del recipiente al divisor mecánico dejándolo caer en las aberturas a una velocidad que permitiera el flujo libre de las partículas.
4. Se repitió el proceso hasta reducir la muestra a los tamaños especificados para cada ensayo.

Lavado de material más fino que el tamiz 0,075 mm

El lavado de material más fino que el tamiz 0,075 mm se realizó siguiendo lo indicado en la norma ASTM C117-17 y el procedimiento se menciona a continuación:

1. Se introdujo la muestra al horno y se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.
2. Se colocó el tamiz de 1,18 mm y por debajo el tamiz de 0,075 mm sobre la pila.

3. Se colocó la muestra en un recipiente con agua y se agitó para que el material fino quedara en suspensión.
4. Se vertió el agua con el material fino en suspensión a través de los tamices.
5. Se repitieron los pasos 3 y 4 hasta que el agua estuviera clara después de agitar el material.
6. El material retenido en los tamices se introdujo al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.

Para determinar este material se utilizó la siguiente ecuación:

$$A = \frac{B - C}{B} * 100$$

Donde:

A = porcentaje de material más fino que el tamiz de 0,075 mm

B = masa inicial seca al horno, g

C = masa seca al horno después de lavar, g

Determinación de la granulometría

Este ensayo se realizó siguiendo lo indicado en la norma ASTM C136-19. El procedimiento seguido se aplica para ambos agregados y se menciona a continuación:

1. Se introdujo la muestra al horno y se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.
2. Se acomodaron los tamices de forma tal que el de mayor tamaño fuera el primero en utilizarse y el de menor tamaño fuera el último.
3. Se inició a tamizar el material utilizando cada tamiz individualmente hasta que todas las partículas de menor tamaño que la abertura pasaran por el tamiz.
4. Las partículas retenidas por los tamices se pesaron para determinar la masa retenida por cada tamiz y por ende la masa pasando por cada tamiz.

5. Se continuó con el proceso hasta que se utilizó el último tamiz y se verificó que la masa muestra final no variara en más de un 0,3% con respecto a la masa original de la muestra.

En la Figura 4 se puede observar los tamices utilizados para determinar la granulometría del agregado grueso, así como los recipientes para pesar las masas retenidas por cada tamiz.



Figura 4. Equipo utilizado para el análisis granulométrico del agregado grueso.

Determinación de impurezas en agregado fino

Este ensayo se realizó en siguiendo lo indicado en la norma ASTM C40-20. El procedimiento se muestra a continuación:

1. Se agregó la muestra a una botella hasta que marcara 130 ml.
2. Se agregó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) hasta la marca de 200 ml.
3. Se tapó la botella y se agitó para mezclar bien la solución y el agregado y se dejó reposar durante 24 horas.
4. Después de 24 horas se comparó el color de la muestra en la botella con una escala de color.



Figura 5. Comparación de la muestra con la escala de color.

Determinación de los pesos unitarios

Este ensayo se realizó de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma ASTM C-29-17.

Para este ensayo el procedimiento establece que se debe determinar el volumen del recipiente que se vaya a utilizar, sin embargo, el Laboratorio de Concreto del CIVCO realiza este ensayo con regularidad por lo que cuenta con recipientes designados específicamente para determinar los pesos unitarios y ya tienen su volumen determinado.

La norma establece un método para determinar el peso unitario suelto y un método para determinar el peso unitario compactado. En ambos métodos se utilizó la misma muestra y esta se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.

En la Figura 6 se muestra el equipo utilizado para obtener ambos pesos unitarios de los agregados.



Figura 6. Equipo utilizado para determinar el peso unitario del agregado.

El procedimiento utilizado para determinar el peso unitario suelto de ambos agregados se describe a continuación:

1. Se determinó la masa del recipiente en el que se va a introducir el agregado.
2. Se llenó el recipiente con una pala dejando caer el material a una altura de 25 mm aproximadamente.
3. Se enrasó la superficie para nivelarla de tal forma que no sobresalieran partículas.
4. Se pesó el recipiente lleno con el material.
5. Se repitió el proceso una vez más para promediar el peso obtenido.

El procedimiento utilizado para determinar el peso unitario compactado se describe a continuación:

1. Se determinó la masa del recipiente en el que se va a introducir el agregado.
2. Se llenó aproximadamente un tercio del recipiente.
3. Se compactó esta primera capa introduciendo una varilla 25 veces de manera uniforme sobre toda la superficie.
4. Se llenó aproximadamente dos tercios del recipiente.
5. Se compactó la segunda capa introduciendo la varilla 25 veces de manera uniforme sobre toda la superficie.
6. Se llenó el último tercio del recipiente hasta que el material se rebalsara.
7. Se compactó esta última capa introduciendo la varilla 25 veces de manera uniforme sobre toda la superficie.

8. Se enrasó la superficie para nivelarla de tal forma que no sobresalieran partículas.
9. Se pesó el recipiente lleno con el material.
10. Se repitió el proceso una vez más para promediar el peso obtenido.

Para determinar los pesos unitarios se utilizó la siguiente ecuación:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

Donde:

M = peso unitario, kg/m³

G = masa del agregado y el recipiente, kg

T = masa del recipiente, kg

V = volumen del recipiente, m³

Determinación de la densidad relativa y el porcentaje de absorción

El ensayo para determinar la densidad relativa el porcentaje de absorción del agregado grueso se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C127-17. Los pasos seguidos se describen a continuación:

1. Se introdujo la muestra al horno y se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.
2. Se dejó enfriar el material hasta que se pudiera manejar y luego se sumergió en agua a temperatura ambiente durante 24 ± 4 horas.
3. Luego se removió del agua y se secó el material con un paño hasta que ya no hubiera agua visible.
4. Se pesó el material para obtener la masa saturada superficie seca.
5. Inmediatamente, se sumergió el material en un contenedor lleno de agua a una temperatura de 23 ± 2 °C y se agitó dentro del agua para remover el aire atrapado.
6. Luego de remover el aire atrapado se pesó el material para determinar la masa saturada sumergida.
7. Se introdujo de nuevo la muestra al horno y se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.

- Se dejó enfriar el material hasta que se pudiera manejar y se pesó para determinar la masa seca al horno del material.

Para obtener la gravedad específica seca al horno (G_{bs}), la gravedad específica saturada superficie seca (G_{bss}), la gravedad aparente (G_s) y el porcentaje de absorción ($\%D$) se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$G_{bs} = \frac{A}{B - C}$$

$$G_{bss} = \frac{B}{B - C}$$

$$G_s = \frac{A}{A - C}$$

$$\%D = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

- A = masa seca al horno, g
- B = masa saturada superficie seca, g
- C = masa saturada sumergida, g

En la Figura 7 se puede observar la muestra saturada superficie seca siendo pesada, así como el contenedor en el que se sumergió la muestra para determinar la masa sumergida.



Figura 7. Determinación de la masa saturada superficie seca del material.

El ensayo para determinar la densidad relativa el porcentaje de absorción del agregado grueso se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C128-15. Los pasos seguidos se describen a continuación:

- Se colocó la muestra en un recipiente y se saturó con agua durante 24 horas.
- Se retiró el agua del recipiente.
- Con la ayuda de una secadora de aire, se eliminó el agua libre presente en la muestra para llevarlo a una condición saturada superficie seca.
- Luego se introdujo el material en un cono metálico y se apisonó levemente 25 veces.
- Se retiró el cono y se observó el comportamiento del material. La forma de cono se mantuvo luego de retirar el cono lo cual indicó que el material se encontraba en condición saturada.
- Luego se golpeó ligeramente la base del cono y este se desplomó lo que indicó que se encontraba en la condición requerida para continuar con el ensayo.
- Luego se introdujeron 500 g de la muestra a un picnómetro previamente pesado y se agregó agua hasta sobrepasar el nivel del agregado.
- Se agitó el picnómetro para mezclar el agua y el agregado y se eliminó el aire dentro de las partículas del agregado fino por medio de una bomba de vacío.
- Cuando el agregado no presentaba burbujas, se agregó agua hasta la línea del picnómetro y se determinó su masa.
- Luego se colocó el material en un recipiente y se introdujo al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que alcanzara la masa constante.
- Finalmente se llenó el picnómetro de agua y se determinó su masa.

Para obtener la gravedad específica seca al horno (G_{bs}), la gravedad específica saturada superficie seca (G_{bss}), la gravedad aparente (G_s) y el porcentaje de absorción ($\%D$) se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$G_{bs} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$Gbss = \frac{S}{B + S - C}$$

$$Gs = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\%D = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

A = masa inicial seca al horno, g

B = masa del picnómetro lleno de agua, g

C = masa del picnómetro con la muestra y agua, g

S = masa de la muestra saturada superficie seca, g

Ensayos complementarios

Para determinar la composición química de la ceniza de cascarilla de arroz, se realizaron los siguientes ensayos complementarios.

Microscopía Electrónica de Barrido

Se solicitó al Laboratorio Institucional de Microscopía, el cual es una unidad de la Dirección de Proyectos de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, la realización de un ensayo de microscopía electrónica de barrido para determinar los elementos químicos presentes en la CCA y poder obtener imágenes de la estructura de la ceniza a un nivel microscópico.

Este ensayo fue realizado por el técnico de laboratorio y se utilizaron los Microscopios Electrónicos de Barrido Hitachi TM-1000 y Hitachi TM-3000 para determinar los elementos presentes en la muestra.



Figura 8. Microscopio Electrónico de Barrido modelo TM-3000.



Figura 9. Microscopio Electrónico de Barrido modelo TM-1000.

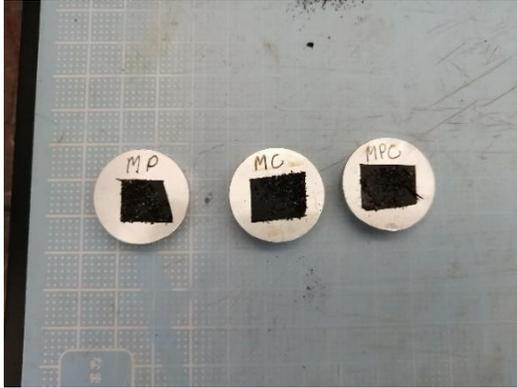


Figura 10. Muestras de CCA sometidas al ensayo de microscopía electrónica de barrido.

Difractometría de Rayos X

Se solicitó a la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Tecnológico de Costa Rica (TEC), la realización de un ensayo de difracción de rayos X para determinar los compuestos químicos presentes en la CCA. Dicha escuela comunicó que el Ministerio de Salud de Costa Rica ordenó suspender temporalmente la realización de este ensayo debido que tenían que medir los niveles de radiación de rayos X que genera. Por esta razón, no se pudo realizar este ensayo en la presente investigación.

Diseño de mezcla

El diseño de mezcla se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ACI 211.1-91. Esta norma tiene necesidad como insumos las siguientes propiedades:

- El tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino.
- Los pesos unitarios sueltos y compactados de ambos agregados.
- Las gravedades específicas, así como el porcentaje de absorción de ambos agregados.

Estas propiedades son las que se determinaron en la caracterización de los agregados. También requiere como insumo la condición de humedad tanto de los materiales como del laboratorio, sin embargo, estas se determinaron individualmente para cada mezcla.

El procedimiento que se siguió para realizar el diseño de mezcla se describe a continuación:

1. Se determinó el peso bruto suelto y compactado de ambos agregados.
2. Se definió la resistencia de diseño del concreto.
3. Se definió el asentamiento esperado y se determinó la cantidad de agua a utilizar y el porcentaje de aire.
4. Luego se determinó la relación A/C a utilizar y con esta se determinó la cantidad de cemento a utilizar.
5. Se determinaron las cantidades de agregado grueso y de agregado fino a utilizar.
6. Considerando el contenido de humedad del material, se realizó una corrección por humedad para ajustar la cantidad de agua a utilizar.
7. Finalmente, se obtiene la dosificación de materiales para una mezcla de concreto.

Diseño experimental

Para el desarrollo de este proyecto se decidió, en coordinación con Conarroz, estudiar cenizas de tres fuentes de cosechas de arroz distintas. Según estudio previos, el porcentaje óptimo de sustitución de CCA es de 20%, por lo que se decidió realizar concretos con 10, 20 y 30% de sustitución.

Para incorporar todos los porcentajes de sustitución con las tres fuentes de ceniza distintas, se realizaron 10 diseños de mezcla en los que las constantes fueron los agregados utilizados y el tipo de cemento hidráulico y la variable fue la CCA. Las mezclas realizadas se identificaron de la siguiente manera:

- La mezcla de concreto control se identificó como CC.

- Las mezclas de concreto con ceniza de la fuente MP se identificaron como MP 90-10, MP 80-20, MP 70-30. El primer número es el porcentaje de cemento hidráulico y el segundo es el porcentaje de sustitución de CCA.
- Las mezclas de concreto con ceniza de la fuente MC se identificaron como MC 90-10, MC 80-20, MC 70-30.
- Las mezclas de concreto con ceniza de la fuente MPC se identificaron como MPC 90-10, MPC 80-20, MPC 70-30.

Selección de tamaño de molde y de tamaño de muestra

La norma ASTM C192-19 estipula que “el diámetro de un espécimen cilíndrico debe ser al menos tres veces mayor al tamaño máximo nominal del agregado grueso”. Con esto presente se decidió utilizar moldes cilíndricos de 100x200 mm, ya que el agregado grueso posee un tamaño máximo nominal de 12,5 mm.

Para determinar la cantidad de especímenes a realizar se consultó la guía ACI 214R-11. Esta establece que las pruebas de resistencia para estimar la desviación estándar o el coeficiente de variación deben representar un grupo de al menos 30 especímenes por edad de falla.

Sin embargo, el laboratorio de concreto del CECO no cuenta con los recursos para realizar esta cantidad de especímenes ya que cuenta con 51 moldes cilíndricos.

Con esta limitación presente, se consultó la norma ACI 318-19 y esta establece que, si no se cuenta con las condiciones necesarias para realizar 30 especímenes por edad de falla, se permite realizar las pruebas con un mínimo de 15 especímenes por edad de falla para estimar la desviación estándar, por lo que se decidió que la cantidad de especímenes a realizar por edad de falla es de 15.

Especímenes de concreto hidráulico

Para llevar un control adecuado del estado de los materiales y equipo, los tiempos de mezclado, la fabricación y el curado de los especímenes se generó una lista de verificación en la cual se determina si se cumplió con los procedimientos establecidos por las distintas normas y la cual sirve como insumo de trazabilidad en caso de presentarse un resultado fuera de lo esperado.

Esta lista de verificación se puede observar en el Apéndice 3.

Preparación de equipo y materiales

Los moldes cilíndricos se encontraban en el inventario del laboratorio de concreto. Se les aplicó un desmoldante a los moldes y se colocaron en la zona de trabajo preparada.



Figura 11. Zona de trabajo lista para el moldeo de los especímenes de concreto.

En cuanto a los materiales, tanto los agregados como la CCA se encontraban almacenados en el laboratorio, en sacos para asegurar una condición de humedad constante. El cemento hidráulico se colocó sobre una tarima para evitar el contacto con el piso y estaba dentro de bolsas plásticas para asegurar la integridad del saco.

Para determinar la humedad que presentaban estos materiales en el sitio, se introdujeron, el día previo a la realización de cada mezcla, muestras representativas del agregado fino, grueso y de la ceniza a un horno con una temperatura de 110 ± 5 °C hasta obtener masa constante.

Se pesaron las cantidades de materiales y se colocaron en cubetas para tener una mayor facilidad a la hora de colocarlos dentro de la mezcladora.

En el siguiente cuadro se muestran las cantidades de materiales



Figura 12. Materiales pesados para una mezcla de concreto hidráulico.

Elaboración de la mezcla de concreto hidráulico

La elaboración de mezcla de concreto hidráulico se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C192-19. Este procedimiento se describe a continuación:

1. Se introdujo la totalidad el agregado grueso en la mezcladora y un tercio del agua y se mezcló durante 10 segundos para humedecer todo el agregado.
2. Luego, con la mezcladora encendida, se adicionó la totalidad de la arena, el cemento hidráulico, la CCA en las mezclas que se utilizó, y el agua restante.

3. Se mezcló durante tres minutos.
4. Luego de los tres minutos se apagó la mezcladora y se dejó reposar la mezcla durante tres minutos. Durante este reposo, se cubrió la entrada de la mezcladora para evitar la pérdida de humedad.
5. Finalmente, se encendió la mezcladora y se mezcló durante dos minutos más.

Una vez finalizado el proceso de mezcla, esta se vació en un carrito previamente humedecido y se determinó el asentamiento y la temperatura de la mezcla siguiendo lo establecido en las normas ASTM C143-20 y ASTM C1064-17 respectivamente.

Es importante resaltar que se realizaron tres tandas por mezcla de concreto, para tener un mejor control del tiempo de moldeo. En cada tanda se mezcló concreto suficiente para 15 cilindros.



Figura 13. Elaboración de una mezcla de concreto hidráulico.



Figura 14. Elaboración del ensayo para determinar el asentamiento.



Figura 15. Compactado de los especímenes de concreto.

Moldeo de los especímenes concreto hidráulico

El moldeo de los especímenes de concreto se realizó de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma ASTM C192-19 y se describe a continuación.

1. Se llenó el molde cilíndrico hasta aproximadamente la mitad.
2. Se compactó utilizando una varilla 25 veces en toda la superficie.
3. Se golpeó el molde por fuera 12 veces con un mazo.
4. Se llenó la mitad restante del molde.
5. Se compactó la nueva mitad 25 veces utilizando una varilla.
6. Se golpeó el molde por fuera 12 veces con un mazo.
7. Se eliminó el exceso de mezcla enrasando con la varilla y luego se le dio un acabado liso a la superficie con una llaneta.



Figura 16. Especímenes de concreto finalizados.

Curado de los especímenes concreto hidráulico

Los especímenes fueron desmoldados luego de 24 ± 8 horas, se identificaron con el identificador de la mezcla de concreto y se enumeraron y luego se introdujeron a la cámara húmeda del laboratorio de concreto.

La cámara húmeda se debe mantener a una temperatura constante de 23 ± 2 °C según lo

indicado en la norma ASTM C511-19. Los especímenes de concreto permanecieron en la cámara húmeda hasta que cumplieran con la edad de falla deseada.



Figura 17. Desmolde e identificación de los especímenes.

los ensayos de resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días, reportando la resistencia a la compresión como el promedio de 15 cilindros en cada edad de falla.

La medición de los especímenes fue realizada por el estudiante, sin embargo, los ensayos de resistencia a compresión fueron realizados por los técnicos del laboratorio de concreto.



Figura 19. Determinación de las dimensiones del espécimen de concreto.



Figura 18. Curado de los especímenes en la cámara húmeda.

Falla de los especímenes concreto hidráulico

Las fallas de cilindros de concreto se realizaron siguiendo la norma ASTM C39-20. Se realizaron



Figura 20. Especimen de concreto fallado a compresión.

Tratamiento estadístico de los resultados

Para asegurar la confiabilidad de los resultados de resistencia a la compresión, estos se sometieron a un tratamiento estadístico para el cual se utilizó el software estadístico Minitab.

Dispersión de datos

Para tener una representación visual y un mejor entendimiento del comportamiento de los resultados de resistencia a la compresión, se realizaron gráficos de caja en los que se pudo apreciar la dispersión de los datos.

Determinación de valores atípicos

Los gráficos de caja elaborados también permitieron observar posibles valores atípicos en resultados que se alejan mucho del grupo de datos.

Para verificar si los datos marcados como posibles valores atípicos realmente lo son, se realizó la prueba de Grubbs que ofrece Minitab en su catálogo, la cual se enfoca en determinar si existen valores típicos en el valor más pequeño o grande del grupo de datos.

Normalidad de datos

Según la guía ACI 214R-11, “la suposición básica es que los resultados de resistencia a la

compresión del concreto presentan una distribución normal” (p.4).

La verificación de la normalidad de los datos se realizó utilizando las pruebas de normalidad Anderson-Darling y Ryan-Joiner que ofrece Minitab en su catálogo.

Estadística descriptiva

Una vez que se aseguró el comportamiento normal de los resultados y su confiabilidad estadística, se determinaron los parámetros de estadística descriptiva que solicita la guía ACI 214R-11.

Estos parámetros son el promedio o la media aritmética, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el rango.

Estándar de control

Los parámetros estadísticos descriptivos determinados se utilizaron para comparar los resultados obtenidos contra el estándar de control establecido por la guía ACI 214R-11 en el apartado 5 del capítulo 4. Este estándar se puede observar en el siguiente cuadro.

Clasificación	Desviación estándar de especímenes realizados en laboratorio (MPa)
Excelente	Menor a 1,4
Muy Bueno	Entre 1,4 y 1,7
Bueno	Entre 1,7 y 2,1
Aceptable	Entre 2,1 y 2,4
Pobre	Mayor a 2,4

Fuente: ACI 214R-11

Resultados

Caracterización de los agregados

Agregado Grueso

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización del agregado grueso. Es importante resaltar que se utilizaron los límites superior e inferior de la clasificación 8 de la norma ASTM C33-18.

Tamiz (mm)	% Pasando	Límite inferior y superior (ASTM C33)
19,0	100	100
12,5	98	90 a 100
9,5	76	40 a 70
4,75	13	0 a 15
2,36	4	0 a 5

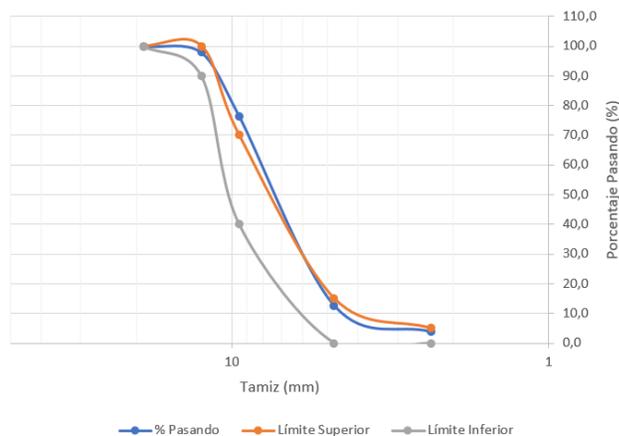


Figura 21. Curva granulométrica del agregado grueso.

El análisis granulométrico completo del agregado grueso se puede observar en el Apéndice 1.

Propiedad	Resultado
Error obtenido en la granulometría	0,096%
Tamaño máximo nominal	12,5 mm
Peso unitario suelto (kg/cm ³)	1343
Peso unitario compactado (kg/cm ³)	1485
Gs	2,74
Gbs	2,53
Gbss	2,61
Porcentaje de absorción	3,0%

Agregado Fino

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización del agregado fino. Es importante resaltar que la norma ASTM C33-18 establece como requisito que el agregado fino no puede tener más de un 5% de material pasando el tamiz de abertura de 0,075 mm por lo que se definieron los límites inferior y superior como 0% y 5% respectivamente.

Tamiz (mm)	% Pasando	Límite inferior y superior (ASTM C33)
9,5	100	100
4,75	100	95 a 100
2,36	89	80 a 100

1,18	66	50 a 85
0,60	37	25 a 60
0,30	14	0 a 30
0,15	4	0 a 10
0,075	0,8	0 a 5

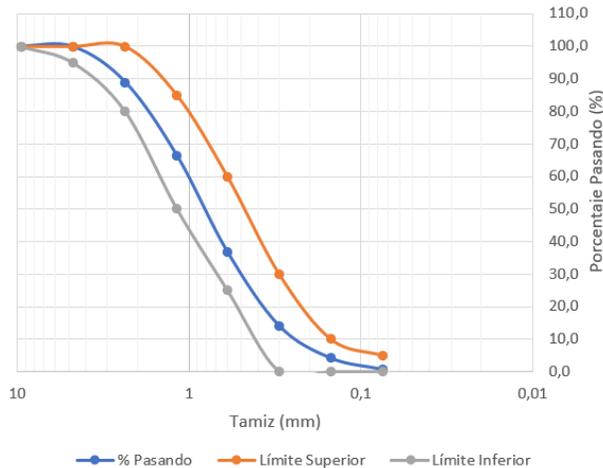


Figura 22. Curva granulométrica del agregado fino.

El análisis granulométrico completo del agregado fino se puede observar en el Apéndice 2.

Cuadro 6. Propiedades del agregado fino y las distintas CCA	
Propiedad	Resultado
Porcentaje pasando el tamiz 0,075 mm	0,8%
Error obtenido en la granulometría	0,041%
Módulo de finura	2,89
Peso unitario suelto (kg/cm ³)	1510
Peso unitario compactado (kg/cm ³)	1629
Gs	2,74
Gbs	2,44
Gbss	2,55
Porcentaje de absorción agregado fino	4,5%
Porcentaje de absorción CCA MP	8,4%
Porcentaje de absorción CCA MC	9,1%
Porcentaje de absorción CCA MPC	9,2%

Ensayos complementarios

Microscopía electrónica de barrido

A continuación, se muestran los elementos químicos detectados en las CCA utilizadas en la elaboración de las mezclas de concreto.

Cuadro 7. Elementos químicos detectados en las CCA.			
Elemento	Fuentes de CCA		
	MP	MC	MPC
Aluminio (Al)	-	2,7%	4,2%
Germanio (Ge)	1,1%	-	-
Indio (In)	1,3%	2,6%	3,6%
Mercurio (Hg)	-	2,0%	1,7%
Oro (Au)	-	1,2%	4,0%
Oxígeno (O)	71,4%	60,6%	56,6%
Platino (Pt)	-	3,1%	-
Rubidio (Rb)	26,2%	26,1%	27,6%
Silicio (Si)	-	1,6%	2,3%

Concreto fresco

Con el concreto en estado fresco se determinó el asentamiento y la temperatura de la mezcla de concreto según las normas ASTM C143-20 y ASTM C-1064-17 respectivamente. Estos resultados se pueden observar en el siguiente cuadro.

Cuadro 8. Asentamiento y temperatura de las mezclas realizadas.		
Mezcla	Ensayos	
	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)
CC	105	26,0
MP 90-10	105	24,5
MP 80-20	110	27,0
MP 70-30	95	25,5
MC 90-10	90	25,5
MC 80-20	85	26,0
MC 70-30	95	27,0
MPC 90-10	90	25,5
MPC 80-20	90	25,0
MPC 70-30	95	26,5

Al realizar tres tandas por mezcla, estos resultados reportados son promedios de los resultados obtenidos en las tres tandas.

También se registraron los tiempos de moldeo de los especímenes cilíndrico de cada tanda. Esto se muestran a continuación.

Cuadro 9. Tiempos de moldeo de los especímenes cilíndricos.			
Mezcla	Tiempo (min)		
	Tanda 1	Tanda 2	Tanda 3
CC	35	35	35
MP 90-10	25	27	25
MP 80-20	27	27	30
MP 70-30	30	27	30
MC 90-10	25	25	25
MC 80-20	25	27	27
MC 70-30	30	30	30
MPC 90-10	27	27	27
MPC 80-20	27	27	30
MPC 70-30	30	30	30

Concreto endurecido

Falla de los especímenes de concreto

Los resultados obtenidos tanto de la falla como del tipo de falla de cilindro de cada mezcla se muestran en el Apéndice 4.

Tratamiento estadístico

Dispersión de datos

Los gráficos de caja generados para tener una presentación visual y poder interpretar la dispersión de los datos se muestran a continuación.

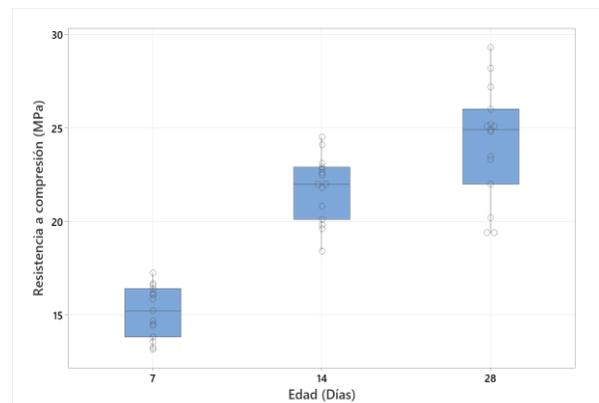


Figura 23. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla CC.

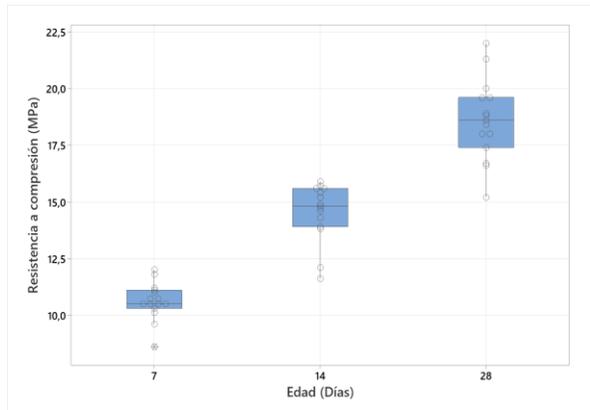


Figura 24. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MP 90-10.

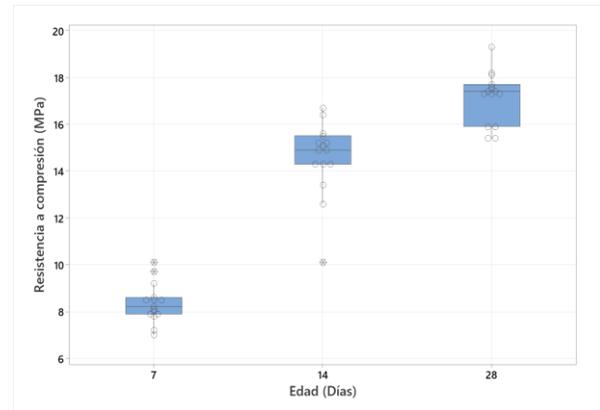


Figura 27. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MC 90-10.

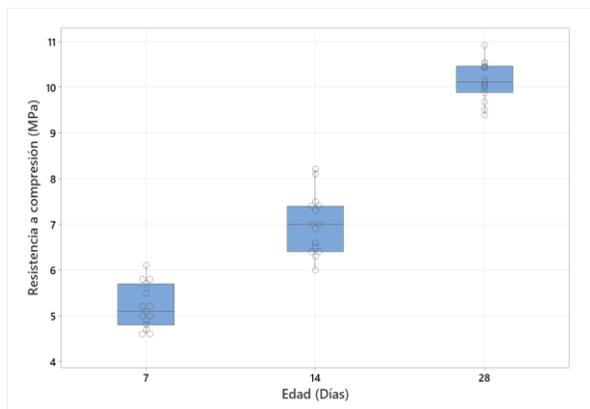


Figura 25. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MP 80-20.

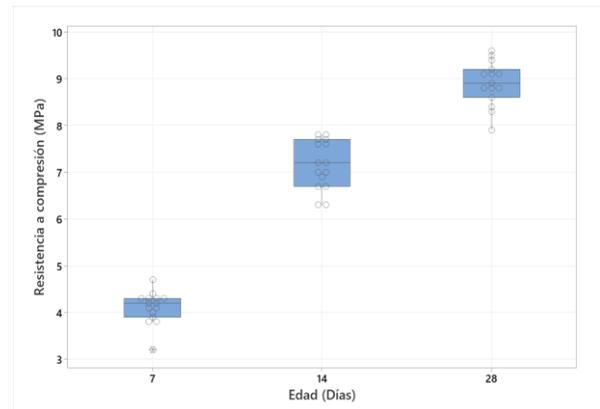


Figura 28. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MC 80-20.

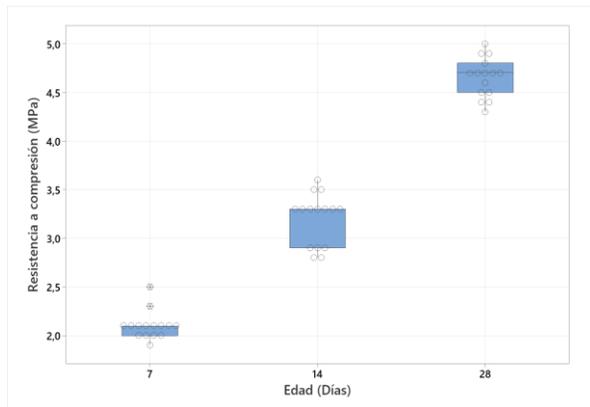


Figura 26. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MP 70-30.

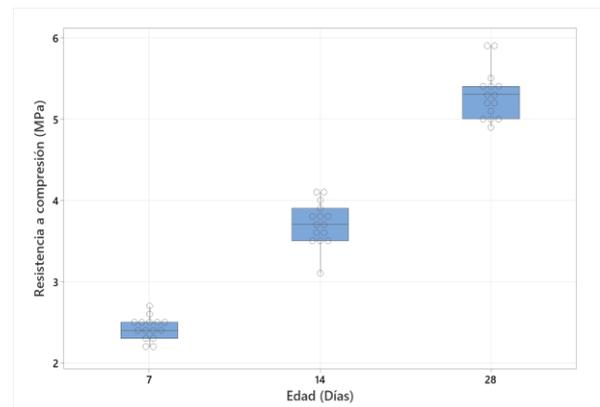


Figura 29. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MC 70-30.

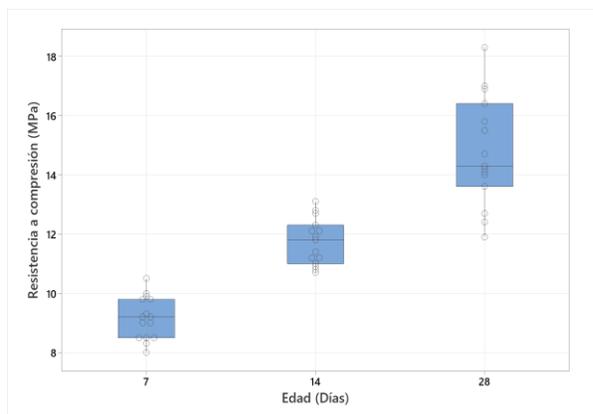


Figura 30. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MPC 90-10.

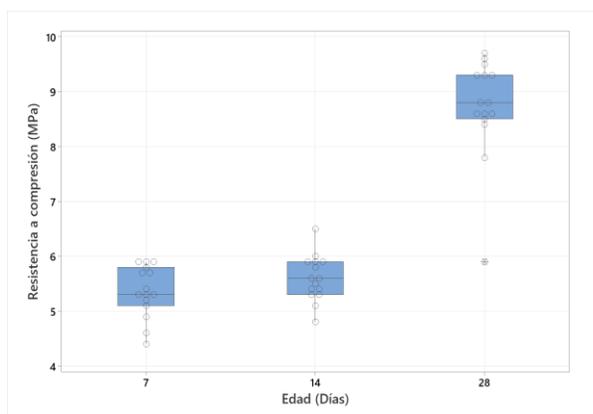


Figura 31. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MPC 80-20.

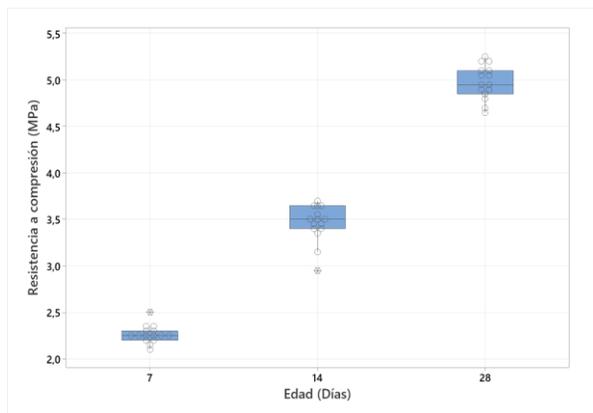


Figura 32. Gráficos de caja de los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla MPC 70-30.

Valores Atípicos

Para complementar la dispersión observada en los gráficos de caja, se realizó la prueba de Grubbs para verificar si existen valores atípicos en los grupos de datos. En los siguientes cuadros se muestran los resultados de estas pruebas. Los cuadros contienen la cantidad de datos (N), el valor de Grubbs (G) y el valor-p.

En caso de que en los cuadros se muestre que si existe un valor atípico en el grupo de datos (tener un valor-p menor a 0,05), se marcará el grupo de datos en amarillo.

Cuadro 10. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla CC.

Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	1,52	0,884
14	15	1,96	0,813
28	15	1,69	0,596

Cuadro 11. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MP 90-10.

Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	2,43	0,092
14	15	2,32	0,148
28	15	1,91	0,634

Cuadro 12. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MP 80-20.

Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	1,89	0,686
14	15	1,84	0,784
28	15	1,85	0,760

Cuadro 13. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MP 70-30.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	2,83	0,008
14	15	1,50	1,000
28	15	1,74	1,000

En el Cuadro 13 se marca que existe un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 7 días. Este valor atípico se decide eliminar luego de su análisis lo cual, ocasiona que la cantidad de datos (N) en ese grupo sea de 14.

Cuadro 14. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MC 90-10.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	2,10	0,352
14	15	2,76	0,013
28	15	1,94	0,584

En el Cuadro 14 se marca que existe un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 14 días. Este valor atípico se decide eliminar luego de su análisis lo cual, ocasiona que la cantidad de datos (N) en ese grupo sea de 14.

Cuadro 15. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MC 80-20.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	2,63	0,032
14	15	1,66	1,000
28	15	2,15	0,295

En el Cuadro 15 se marca que existe un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 7 días. Este valor atípico se

decide eliminar luego de su análisis lo cual, ocasiona que la cantidad de datos (N) en ese grupo sea de 14.

Cuadro 16. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MC 70-30.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	1,97	0,534
14	15	2,32	0,148
28	15	1,98	0,511

Cuadro 17. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MPC 90-10.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	1,84	0,784
14	15	1,76	0,977
28	15	1,91	0,641

Cuadro 18. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MPC 80-20.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	2,03	0,434
14	15	2,16	2,84
28	15	2,99	0,002

En el Cuadro 18 se marca que existe un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 28 días. Este valor atípico se decide eliminar luego de su análisis lo cual, ocasiona que la cantidad de datos (N) en ese grupo sea de 14.

Cuadro 19. Prueba de Grubbs aplicada a los resultados de la mezcla MPC 70-30.			
Edad (días)	N	G	Valor-p
7	15	2,53	0,055
14	15	2,55	0,051
28	15	1,80	0,875

Normalidad de los datos

Luego de realizar la prueba de Grubbs y eliminar los valores atípicos existentes, se verificó que los grupos de datos presenten una distribución normal.

En los siguientes cuadros se muestran los resultados obtenidos de Valor-p de las pruebas de normalidad Anderson-Darling y Ryan-Joiner. En caso de que en los cuadros se muestre que si existe un grupo de datos no presente una distribución normal (tener un valor-p menor a 0,05), se marcará el grupo de datos en amarillo.

Cuadro 20. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla CC.			
Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,345
14	15	>0,100	0,438
28	15	>0,100	0,417

Cuadro 21. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MP 90-10.			
Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,234
14	15	0,033	0,031
28	15	>0,100	0,927

En el Cuadro 21 se marca que el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 14 días no presenta una distribución normal. Los valores que generan esta situación se deciden eliminar posterior a su análisis, lo cual ocasiona que la cantidad de datos (N) en ese grupo sea de 13.

Cuadro 22. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MP 80-20.			
Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,321
14	15	>0,100	0,550
28	15	>0,100	0,749

Cuadro 23. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MP 70-30.			
Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	14	>0,100	0,074
14	15	>0,100	0,089
28	15	>0,100	0,420

Cuadro 24. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MC 90-10.			
Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,322
14	14	>0,100	0,539
28	15	>0,100	0,097

Cuadro 25. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MC 80-20.			
Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	14	>0,100	0,424

14	15	>0,100	0,209
28	15	>0,100	0,766

Cuadro 26. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MC 70-30.

Edad (días)	6	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,247
14	15	>0,100	0,553
28	15	>0,100	0,156

Cuadro 27. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MPC 90-10.

Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,544
14	15	>0,100	0,486
28	15	>0,100	0,829

Cuadro 28. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MPC 80-20.

Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,263
14	15	>0,100	0,736
28	14	>0,100	0,254

Cuadro 29. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados de la mezcla MPC 70-30.

Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
7	15	>0,100	0,090
14	15	0,060	0,079
28	15	>0,100	0,845

Estadística descriptiva

En los siguientes cuadros se muestran los parámetros de estadística descriptiva necesarios según la guía ACI 214R-11. La resistencia a la compresión se reporta como el promedio de los grupos de datos previamente sometidos a las pruebas de valores atípicos y de normalidad.

Cuadro 30. Parámetros de estadística descriptiva de los resultados de resistencia a la compresión. (1/2)

Mezcla	Edad (días)	Resistencia a la compresión (MPa)	Desviación estándar (MPa)
CC	7	15,17	1,36
	14	21,80	1,73
	28	24,24	3,00
MP 90-10	7	10,61	0,83
	14	14,95	0,69
	28	18,61	1,78
MP 80-20	7	5,20	0,48
	14	7,00	0,65
	28	10,14	0,42
MP 70-30	7	2,05	0,07
	14	3,20	0,27
	28	4,65	0,20
MC 90-10	7	8,35	0,84
	14	14,89	1,08
	28	17,18	1,09
MC 80-20	7	4,17	0,25
	14	7,17	0,52
	28	8,90	0,47
MC 70-30	7	2,43	0,14
	14	3,71	0,26
	28	5,30	0,30
MPC 90-10	7	9,17	0,72
	14	11,73	0,78
	28	14,79	1,84
MPC 80-20	7	5,36	0,47
	14	5,60	0,42
	28	8,91	0,55
MPC 70-30	7	2,26	0,09
	14	3,46	0,20
	28	4,98	0,18

Cuadro 31. Parámetros de estadística descriptiva de los resultados de resistencia a la compresión. (2/2)			
Mezcla	Edad (días)	Coefficiente de variación (%)	Rango (MPa)
CC	7	9,84	4,09
	14	7,94	6,10
	28	12,37	9,90
MP 90-10	7	7,79	3,40
	14	4,58	2,10
	28	9,56	6,80
MP 80-20	7	9,71	1,50
	14	9,31	2,20
	28	4,14	1,52
MP 70-30	7	3,21	0,20
	14	8,35	0,80
	28	4,36	0,70
MC 90-10	7	10,02	3,10
	14	7,26	4,10
	28	6,35	3,90
MC 80-20	7	5,90	0,90
	14	7,28	1,50
	28	5,24	1,70
MC 70-30	7	5,72	0,50
	14	7,12	1,00
	28	5,71	1,00
MPC 90-10	7	7,90	2,50
	14	6,61	2,40
	28	12,43	6,40
MPC 80-20	7	8,80	1,50
	14	7,45	1,70
	28	6,13	1,90
MPC 70-30	7	4,13	0,40
	14	5,76	0,75
	28	3,64	0,60

Estándar de control

La guía ACI 214R-11 establece que el estándar de control mostrado en el Cuadro 2 es aplicable a los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días.

Por esta razón se generó el siguiente cuadro clasificando las desviaciones estándar

obtenidas a los 28 días de cada mezcla según se observan en el Cuadro 29.

Cuadro 32. Clasificación de las desviaciones estándar a los 28 días de cada mezcla en comparación con el estándar de control.		
Mezcla	Desviación Estándar (MPa)	Clasificación
CC	3,00	Pobre
MP 90-10	1,78	Bueno
MP 80-20	0,42	Excelente
MP 70-30	0,20	Excelente
MC 90-10	1,09	Excelente
MC 80-20	0,47	Excelente
MC 70-30	0,30	Excelente
MPC 90-10	1,84	Bueno
MPC 80-20	0,55	Excelente
MPC 70-30	0,18	Excelente

Resistencia a la compresión

De los valores de resistencia a la compresión mostrados en el Cuadro 29, se generaron las curvas de resistencia a la compresión. En las siguientes figuras se observan dichas curvas. Para efectos de comparación visual, en todas se puso la curva de la mezcla CC.

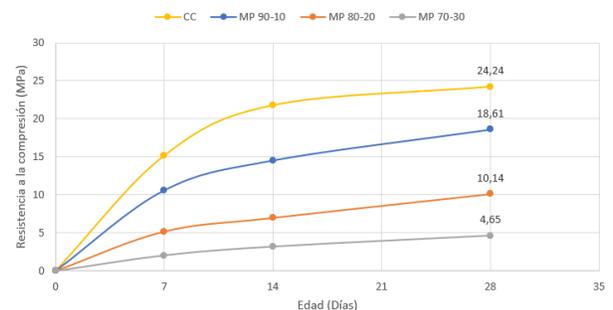


Figura 33. Curvas de resistencia a la compresión de las mezclas CC, MP 90-10, MP 80-20 y MP 70-30.

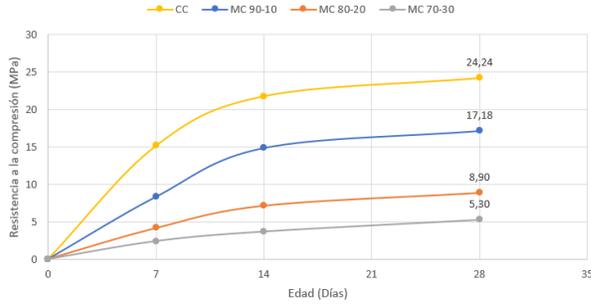


Figura 34. Curvas de resistencia a la compresión de las mezclas CC, MC 90-10, MC 80-20 y MC 70-30.

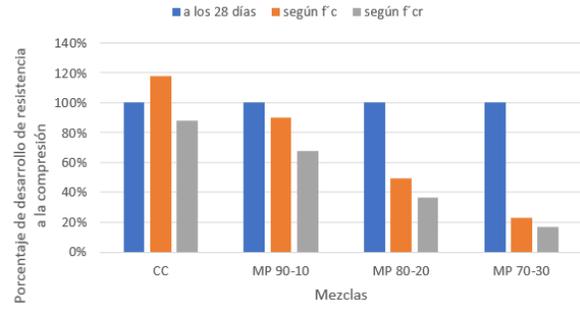


Figura 36. Porcentaje de desarrollo de resistencia a la compresión de las mezclas CC, MP 90-10, MP 80-20 y MP 70-30.

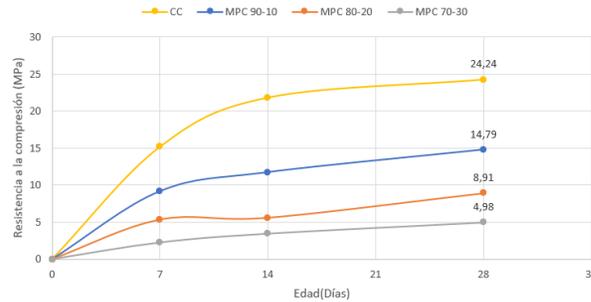


Figura 35. Curvas de resistencia a la compresión de las mezclas CC, MPC 90-10, MPC 80-20 y MPC 70-30.

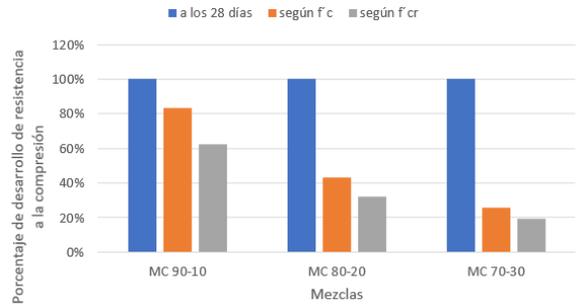


Figura 37. Porcentaje de desarrollo de resistencia a la compresión de las mezclas MC 90-10, MC 80-20 y MC 70-30.

También se generaron gráficos de porcentaje de desarrollo de resistencia para tener una herramienta visual que permita comparar la resistencia a la compresión a los 28 días con $f'c$ (20,59 MPa) y $f'cr$ (27,59 MPa).

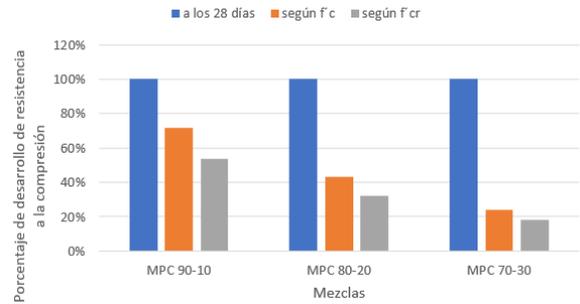


Figura 38. Porcentaje de desarrollo de resistencia a la compresión de las mezclas MPC 90-10, MPC 80-20 y MPC 70-30.

Análisis de Resultados

Agregados

Agregado Grueso

En la Figura 21 se presenta la curva granulométrica del agregado grueso generada a partir de los resultados presentes en el Cuadro 3.

En esta curva granulométrica se puede observar que el material pasando por el tamiz de 9,5 mm sobrepasa el límite superior establecido en un 6%, sin embargo, se considera que este porcentaje de material pasando se encuentra cercano a la especificación. La curva granulométrica muestra una adecuada distribución a lo largo de todos los límites establecidos.

Los resultados del ensayo granulométrico presentaron un porcentaje de error del 0,096%, como se puede observar en el Cuadro 4, lo que quiere decir que los resultados del ensayo están en cumplimiento con la norma ASTM C136-19 la cual establece un porcentaje de error de 0,3%.

Con estos resultados se obtuvo que el tamaño máximo nominal del agregado grueso es de 12,5 mm el cual se considera apto para realizar mezclas de concreto hidráulico. También es apto para utilizar en moldes cilíndricos de 100x200mm, ya que la norma ASTM C192-19 establece que el diámetro del molde debe ser al menos tres veces mayor que el tamaño máximo nominal del agregado.

Agregado fino

En la Figura 22 se muestra la curva granulométrica del agregado fino generada a partir de los resultados presentes en el Cuadro 5.

Como se puede observar en la curva granulométrica, todos los porcentajes de masa pasando están dentro de los límites superior e inferior establecidos.

Los resultados del ensayo granulométrico presentaron un porcentaje de error del 0,041%, como se puede observar en el Cuadro 6, lo que quiere decir que los resultados del ensayo están en cumplimiento con la norma ASTM C136-19 la cual establece un porcentaje de error de 0,3%.

De igual forma, en la Figura 5 se puede observar que el resultado que se obtuvo del ensayo de colorimetría es el color número uno en la escala de color. Este resultado está en cumplimiento con la norma ASTM C40-20, ya que esta indica que el resultado debe ser el color número tres o más claro. Al obtener el color número uno, se asegura que el agregado fino no contiene posibles impurezas orgánicas.

El módulo de finura obtenido fue de 2,89. Según la norma ASTM C 33-18, este módulo debe encontrarse dentro del rango de 2,4 y 3,1 por lo que este valor es aceptable.

Ensayos complementarios

Microscopía electrónica de barrido

En el Cuadro 7 se muestran los resultados del ensayo de microscopía electrónica de barrido. De este cuadro se puede observar que existen diferencias en la composición química de las CCA ya que la MP solo comparte tres de los elementos detectados los cuales son Indio, oxígeno y rubidio y es la única con Germanio dentro de su composición.

Por otra parte, la MC y MPC comparten siete elementos con la única diferencia es que la MC cuenta con Platino dentro de su composición.

De este cuadro se puede determinar que los porcentajes de elementos compartidos por todas las CCA son muy similares. De igual forma se puede decir que la fuente de MP presenta diferencias con las demás fuentes ya que su composición química es muy diferente a la de las fuentes MC y MPC, las cuales poseen una composición muy similar.

Estas variaciones entre las CCA se pueden deber a diferencias en las zonas de sembrado, diferencias en el proceso de cosechado y diferencias en el proceso de incinerado.

Concreto fresco

En cuanto a los resultados del ensayo de asentamiento, estos se muestran en el Cuadro 8. Si se comparan estos resultados con el asentamiento definido en el diseño de mezcla, el cual es de 100 mm, se puede observar que todos se aproximaron a este valor de diseño, sin embargo, ninguna mezcla alcanzó el valor con exactitud.

Como se mencionó en la sección de Metodología, el diseño de mezcla se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la

norma ACI 211.1-91, pero esta es una guía estadounidense por lo que utiliza agregados con distintas propiedades y un cemento distinto al utilizado en este estudio. Estas variaciones en los diseños de mezcla son posibles causas de que los asentamientos de las mezclas no alcancen 100 mm exactos.

Otra posible causa de la diferencia en asentamientos es que las CCA presentan diferentes porcentajes de absorción. Como se puede observar en el Cuadro 6, los porcentajes de absorción de las cenizas se encuentran entre 8,43% y 9,23%. Debido a esto se corrigió la cantidad de agua en las mezclas con CCA para saturar la ceniza y que esta no absorbiera el agua de los demás materiales.

En el Cuadro 8 se puede observar que los asentamientos que más se alejaron del asentamiento de diseño son los de las mezclas con ceniza MC y MPC, las cuales tienen mayores porcentajes de absorción que la ceniza MP.

En cuanto al tiempo de moldeo de los especímenes cilíndricos, estos se muestran en el Cuadro 9. Se puede observar que la mezcla CC presentó el mayor tiempo de moldeo de todas las mezclas. Esto se debe a que esta fue la primera mezcla realizada y no se contaba con la experiencia de hacer tandas tan grandes ni con un proceso optimizado para realizar los ensayos de concreto fresco y el moldeo de los cilindros.

En cuanto al comportamiento de las demás mezclas, es evidente que el tiempo de moldeo incrementó conforme aumentó el porcentaje de CCA utilizado en la mezcla.

Lo anterior se notó durante la realización de las mezclas ya que las que contenían 20% y 30% de sustitución de CCA eran menos trabajables que las que contenían 10% o la mezcla CC. Esto ocasiona variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión, lo cual se analizará en la sección de Dispersión de Datos y Valores Atípicos.

Concreto endurecido

Tratamiento estadístico

Dispersión de datos

Analizando los resultados de la mezcla MP 90-10 los cuales se muestran en la Figura 24, se tiene que a los 7 días el menor valor del grupo de datos (8,6 MPa) se encuentra por debajo del valor mínimo del gráfico de caja (9,6 MPa) por lo que se identifica como un posible valor atípico. De igual forma, a los 14 días se pueden observar que los dos valores menores (11,6 MPa y 12,1 MPa), se encuentran separados del resto de datos los cuales se ubican todos entre el primer y el tercer cuartil. Aunque se encuentren dentro de los límites del gráfico de caja, este sesgo puede afectar la normalidad de este grupo de datos.

En cuanto a la mezcla MP 70-30, cuyos resultados se muestran en la Figura 26, se tiene que los dos mayores resultados (2,3 MPa y 2,5 MPa) son posibles valores atípico en comparación con el resto de los datos, los cuales se encuentran en su mayoría en el primer y tercer cuartil.

Continuando los resultados de la mezcla MC 90-10, los cuales se muestran en la Figura 27, se pueden observar dos posibles valores atípicos en el grupo de datos de resistencia de compresión a los 7 días (9,7 MPa y 10,1 MPa) al estar por fuera del valor máximo (9,2 MPa). De igual forma, se tiene que a los 14 días se puede observar un dato (10,1 MPa) que se encuentra por debajo del valor mínimo del gráfico de caja (12,6 MPa). Debido a la gran separación, con solo el análisis visual, se puede asegurar que 10,1 MPa es un valor atípico en este grupo de datos.

En cuanto a la mezcla MC 80-20, los resultados se presentan en la Figura 28. Estos resultados muestran que en el grupo de resistencia a la compresión a los 7 días se encuentra un posible valor atípico (3,2 MPa) ya que se encuentra por debajo del valor mínimo del gráfico de caja (3,9 MPa).

Pasando a la mezcla MPC 80-20, cuyos resultados se pueden observar en la Figura 31, se tiene que en el grupo de resistencia a la compresión a los 28 días presenta un dato (5,9 MPa) que se encuentra por debajo del valor mínimo del gráfico de caja (7,8 MPa). Debido a la gran separación, con solo el análisis visual, se puede asegurar que 5,9 MPa es un valor atípico en este grupo de datos.

Posibles fuentes de la variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión de diferentes mezclas se mencionan a continuación:

- Presentar tiempos de moldeo altos ocasiona pérdida en la trabajabilidad de las mezclas.
- La composición química de las CCA varía según la fuente como se puede observar en el Cuadro 7.
- Variaciones en el proceso de compactación de los especímenes.
- Pérdida de agua a través de los moldes.
- Agotamiento de los operarios.

Valores atípicos

Los resultados de la prueba de Grubbs muestran que las mezclas CC, MP 90-10, MP 80-20, MC 70-30, MPC 90-10 y MPC 70-30, cuyos resultados se pueden observar en el Cuadro 10, Cuadro 11, Cuadro 12, Cuadro 16, Cuadro 17 y Cuadro 19 respectivamente, presentan un Valor-p mayor a 0,05 (nivel de significancia) en todos los grupos de datos.

Lo anterior indica que la hipótesis nula “el conjunto de datos no presenta valores atípicos” planteada en el marco teórico, se puede aceptar en estas mezclas en específico.

Por otra parte, la mezcla MP 70-30 presenta un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 7 días ya que tiene un Valor-p de 0,008, como se puede observar en el Cuadro 13. Este valor atípico corresponde al cilindro 15 cuya resistencia a la compresión fue de 2,5 MPa.

En el Cuadro 14 se puede observar que la mezcla MC 90-10 presenta, en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 14 días, un Valor-p de 0,013, indicando que este grupo de datos presenta un valor atípico. Este valor atípico corresponde al cilindro 14 cuya resistencia a la compresión fue de 10,1 MPa.

La mezcla MC 80-20, cuyos resultados de la prueba de Grubbs se pueden observar en el Cuadro 15, también presenta un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 7 días ya que tiene un Valor-p de 0,032. Este

valor atípico corresponde al cilindro 8 cuya resistencia a la compresión fue de 3,2 MPa.

Finalmente, la mezcla MPC 80-20 presenta un valor atípico en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 28 días, ya que presenta un Valor-p de 0,002. Este valor atípico corresponde al cilindro 33 cuya resistencia a la compresión fue de 5,9 MPa.

Las variaciones de estos especímenes con respecto a los demás se puede deber a las causas mencionadas en el apartado anterior.

Estos valores atípicos identificados generan altos coeficientes de variación y ocasionan que el promedio real de los grupos de datos se vea afectado. Debido a esto se deciden eliminar estos datos de sus grupos de datos respectivos.

Normalidad de los datos

En los cuadros del 20 al 29 se muestran los resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a los de resistencia a la compresión de todas las mezclas realizadas.

Se puede observar que, con la excepción de la mezcla MP 90-10, las mezclas presentan un Valor-p mayor a 0,05 en todas las edades de falla tanto en la prueba Ryan-Joiner como en la prueba Anderson-Darling. Esto indica que la hipótesis nula "el conjunto de datos es normalmente distribuido" planteada en el marco teórico, se puede aceptar en estas mezclas.

Por otra parte, en el Cuadro 21 se puede observar que la mezcla MP 90-10 presenta un Valor-p de 0,031 en el grupo de datos de resistencia a la compresión a los 14 días. Esto indica que este grupo de datos no presenta una distribución normal.

Debido a que la guía ACI 214R-11 supone una distribución normal para poder determinar los parámetros de estadística descriptiva y poder llevar a cabo el análisis del estándar de calidad del concreto elaborado y que establece que "una distribución normal es apropiada en la mayoría de los casos cuando el concreto no exceda los 70 MPa de resistencia a la compresión" se decide analizar el grupo de datos en cuestión.

Se genera el histograma para tener una representación visual del comportamiento del grupo de datos. Este se muestra a continuación.

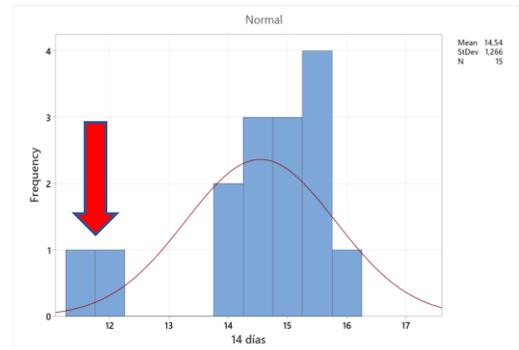


Figura 39. Gráfico de distribución del grupo de datos de resistencia a la compresión a los 14 días de la mezcla MP 90-10.

Como se puede observar en la figura anterior, los dos valores marcados por la flecha roja generan una distribución sesgada. Los valores marcados corresponden a los cilindros 23 y 28, los cuales presentan resistencias de 11,6 MPa y 12,1 MPa respectivamente.

Estos cilindros fueron moldeados al final de la tanda tres de la mezcla MP 90-10 cuando se había perdido trabajabilidad en la mezcla y la fatiga de los operarios era significativamente mayor que en las dos tandas previas. Por lo que es muy probable que el sesgo se genere debido a estas causas.

Debido a que es necesario que el grupo de datos presente una distribución normal para poder continuar con la guía ACI 214R-11, se decide eliminar estos dos valores del grupo de datos de resistencia a la compresión a los 14 días.

A continuación, se muestra el histograma generado y los resultados de las pruebas de normalidad realizadas al nuevo grupo de datos que cuenta con 13 mediciones.

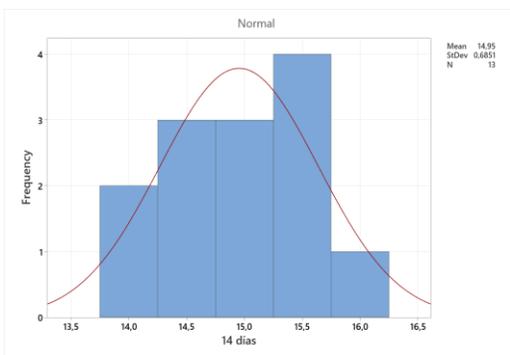


Figura 40. Gráfico de distribución del grupo de datos modificado de resistencia a la compresión a los 14 días de la mezcla MP 90-10.

Cuadro 33. Pruebas de normalidad aplicadas a los resultados modificados de la mezcla MP 90-10.

Edad (días)	N	Valor-p	
		Ryan-Joiner	Anderson-Darling
14	13	>0,100	0,614

Como se puede observar en la figura y cuadro anterior, con eliminar los dos valores que generaban el sesgo, el grupo de datos ahora presenta una distribución normal y se puede continuar la guía ACI 214R-11 para analizar los resultados de compresión.

Estándar de control

Como se puede observar en el Cuadro 32, en general, la clasificación de las desviaciones estándar es excelente. Las únicas mezclas que difieren de esta clasificación son la CC la cual obtuvo una clasificación pobre y las mezclas MP 90-10 y MPC 90-10 las cuales obtuvieron una clasificación buena.

La clasificación pobre de la mezcla CC tiene como posibles causas el elevado tiempo de moldeo que se presentó, la pérdida de trabajabilidad debido a este tiempo y la inexperiencia en cuanto a la realización de mezclas de gran tamaño.

En cuanto al resto de las mezclas, no se presentó una variación significativa en los

resultados, lo que indica que, en general, el proceso de preparación de mezcla y fabricación de especímenes fue bueno.

Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión a todas las edades de falla cuales se muestran en el Cuadro 30. Estos resultados se utilizaron para generar las curvas de resistencia a la compresión de cada concreto realizado.

En la Figura 33 se observan las curvas de resistencia a la compresión de las mezclas CC, MP 90-10, MP 80-20 y MP 70-30. De esta figura se tiene que la mezcla CC tuvo una resistencia a la compresión a los 28 días 24,24 MPa, la cual fue mayor que los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días de todas las mezclas en las que se utilizó CCA de la fuente MP.

Analizando las curvas de las mezclas con CCA de la fuente MP se puede observar que, conforme se utilizó un mayor porcentaje de sustitución de CCA, la resistencia a la compresión del concreto fue menor.

Continuando con la Figura 34, en esta se muestran las curvas de resistencia a la compresión de las mezclas CC, MC 90-10, MC 80-20 y MC 70-30. En esta figura se puede observar el mismo comportamiento en cuanto a la mezcla CC, ya que es la que generó mayor resistencia a la compresión a los 28 días.

Las curvas de resistencia a la compresión de las mezclas con CCA de la fuente MC también presentaron el mismo comportamiento que la CCA pasada ya que conforme mayor aumentó el porcentaje de ceniza utilizado menor fue la resistencia generada en el concreto.

En cuanto a la CCA de la fuente MPC, las curvas de resistencia a la compresión se muestran en la Figura 35. De igual manera que las dos fuentes de CCA anteriores, estas generaron una menor resistencia a la compresión a los 28 días que la mezcla CC y el comportamiento en cuanto al incremento del porcentaje de CCA fue el mismo, teniendo una menor resistencia conforme se aumentó el uso de CCA.

De forma general se puede observar que en todas las curvas aumentó la resistencia

conforme aumentó la edad del concreto por lo que las CCA no afectó el comportamiento normal del desarrollo de resistencia.

Por otra parte, el comportamiento de los concretos a los 28 días se debe analizar ya que a esta edad se realizó el diseño de mezcla y se planteó la resistencia mínima ($f'c$) y requerida ($f'cr$) para el concreto. Estos valores de resistencia son 20,59 MPa y 27,59 MPa respectivamente.

En las figuras 36 a la 38 se muestran el porcentaje de desarrollo de la resistencia a la compresión a los 28 días de las mezclas de concreto realizadas.

Las barras azules en estas figuras representan la resistencia a la compresión alcanzada a los 28 días por cada mezcla. En términos porcentuales, este es el 100% de resistencia desarrollado por cada mezcla.

Las barras anaranjadas representan el porcentaje de desarrollo de resistencia en comparación con $f'c$. Todas las barras anaranjadas deberían ser mayores al 100% ya que $f'c$ es la resistencia mínima que deberían alcanzar todas las mezclas, sin embargo, se muestra en la figura que solo la mezcla CC superó la resistencia de diseño al haber alcanzado una resistencia de 24,24 MPa a los 28 días lo que significa un desarrollo de resistencia del 118%.

Las barras grises representan el porcentaje de desarrollo en comparación con $f'cr$. Esta es la resistencia a la que deberían llegar todas las mezclas ya que es la resistencia a la que se realizó el diseño de mezcla. Como se muestra en las figuras, ninguna mezcla alcanzó esta resistencia y la que más se acercó fue la mezcla CC con un 88% de resistencia desarrollada.

De forma general, se puede observar en las figuras que las mezclas de concreto con un porcentaje de sustitución de CCA del 10% presentaron un porcentaje de desarrollo de resistencia entre el 72 y el 90% en comparación con la resistencia mínima y entre 54% y 64 % en comparación con la resistencia requerida.

Las mezclas con porcentaje de sustitución del 20% contaron con un desarrollo de resistencia entre 43 y 49 % en comparación con la resistencia mínima y entre 32 y 37 % en comparación con la resistencia requerida, mientras que las mezclas con un porcentaje de

sustitución del 30% contaron con un desarrollo de resistencia entre 23 y 26 % en comparación con la resistencia mínima y entre 17 y 19 % en comparación con la resistencia requerida.

Del comportamiento descrito anteriormente se puede determinar que el uso de CCA afecta el desarrollo de la resistencia del concreto ya que mientras más se CCA se utilizó, menor fue la resistencia que desarrolló.

Análisis comparativo entre las fuentes de CCA

Para facilitar la comparación entre las mezclas que contienen CCA se agruparon las curvas de resistencia de las tres mezclas que contienen 10% de CCA, las tres mezclas que contienen 20% de CCA y las tres mezclas que contienen 30% de CCA como se muestra en las siguientes figuras.

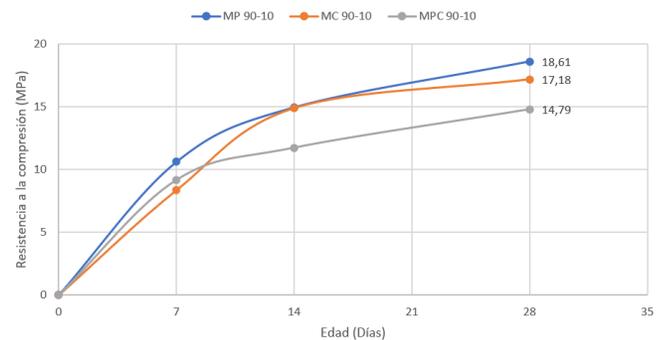


Figura 41. Curvas de resistencia a la compresión de las mezclas con 10% de CCA.

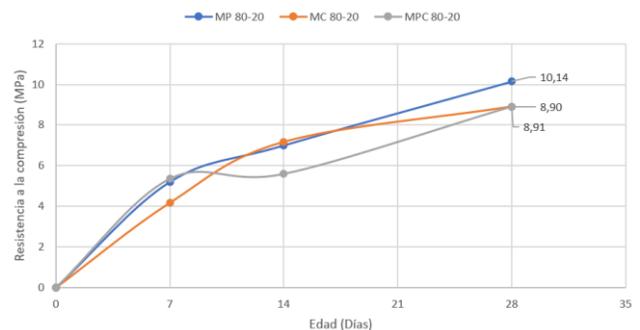


Figura 42. Curvas de resistencia a la compresión de las mezclas con 20% de CCA.

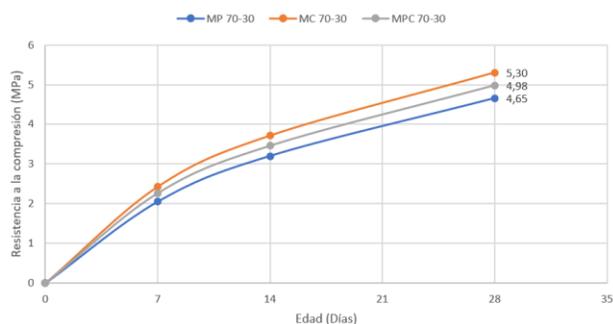


Figura 43. Curvas de resistencia a la compresión de las mezclas con 30% de CCA.

Analizando el comportamiento de las curvas de resistencia a la compresión de las mezclas con 10 % de CCA, las cuales se muestran en la Figura 41, se puede observar que la mezcla con fuente MP es la que generó la mayor resistencia inicial teniendo 10,61 MPa a los 7 días, mientras que la mezcla MPC generó 9,17 MPa y la mezcla MC generó 8,35 MPa.

Conforme avanza la edad, se puede observar que el comportamiento de la resistencia cambia. A los 14 días las mezclas MP y MC generaron valores muy similares cercanos a 14,90 MPa, mientras que las mezclas MC y MPC solamente generaron 8,90 MPa.

En la Figura 43 se pueden observar las curvas de resistencia a la compresión de las mezclas con 30 % de CCA. El comportamiento de estas curvas si es diferente a las analizadas anteriormente, ya que en todas las edades la mezcla MP es la que generó la menor resistencia obteniendo 4,65 MPa a los 28 días. Por otra parte, la mezcla MPC generó 4,98 MPa a los 28 días y la mezcla MC es la que generó la mayor resistencia con 5,30 MPa.

Aunque el comportamiento si varió con las mezclas con 30% de CCA, los valores generados de resistencia son tan bajos que no se pueden tomar en consideración a la hora de determinar cuál es el porcentaje de sustitución óptimo.

Como se mencionó en el análisis de desarrollo de resistencia, solo la mezcla sin ceniza cumplió con la resistencia a la compresión mínima, por lo que la implementación de este material no se puede recomendar, sin embargo, del análisis comparativo se determinó que el porcentaje de CCA que generó la mayor resistencia fue el de

MPa, mientras que la mezcla MPC generó solamente 11,73 MPa.

Por otra parte, se puede observar que a los 28 días la mezcla MP es la que generó la mayor resistencia de todas al obtener 18,61 MPa mientras que la mezcla MC generó 17,18 MPa y la mezcla MPC 14,79 MPa. A lo largo de todas las edades de falla, la mezcla MP fue la que generó la mayor resistencia mientras que la mezcla MPC fue la que generó la menor resistencia.

Continuando con el análisis comparativo del comportamiento de las curvas de resistencia a la compresión se tienen las curvas de las mezclas con 20% de CCA que se observan en la Figura 42. De esta figura se tiene que el comportamiento a los 7 días es muy similar entre las mezclas MP y MPC, ya que generaron resistencias cercanas a 5,30 MPa, mientras que la mezcla MC generó 4,17 MPa.

A los 14 días, la mezcla MPC generó 5,60 MPa la cual es un incremento de solamente 0,32 MPa en comparación a los 7 días. Las mezclas MP y MC generaron una resistencia similar a esta edad de 7,17 MPa. A los 28 días la mezcla MP es la que, de nuevo, generó la mayor resistencia con 10% y la fuente que tuvo el menor impacto en el desarrollo de la resistencia fue la MP por lo que la mezcla MP 90-10 fue la que presentó el mejor desempeño mecánico.

Conclusiones

- La caracterización granulométrica del agregado grueso presenta un incumplimiento en el porcentaje de material pasando el tamiz de 9,5 mm. Sin embargo, la mezcla CC alcanzó $f'c$ por lo que el incumplimiento no afectó significativamente el desarrollo del estudio.
- Se determinó que el Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso es de 12,5 mm.
- Se demostró por medio del ensayo de colorimetría que este agregado no contiene impurezas al nivel del material pasando el tamiz 0,075 mm.
- Se determinó que el módulo de finura del agregado fino es de 2,89, lo que indica que se trabajó con una arena de graduación media.
- Se demostró que los resultados del ensayo de asentamiento no alcanzan el asentamiento de diseño de 100 mm en ninguna mezcla, sin embargo, los asentamientos se mantuvieron en un rango entre 85 y 110 mm. Contemplando que existen fuentes de variación, al tener que el método de diseño de mezcla ACI 211.1-91 es un método aproximado y que las CCA poseen diferentes porcentajes de absorción, se determina que los asentamientos se mantuvieron en valores muy cercanos al asentamiento de diseño.
- Se determinó experimentalmente, por medio de mediciones de tiempo de moldeo, que conforme el porcentaje de CCA es mayor, la mezcla de concreto es menos trabajable y por ende se dura más moldeando los especímenes.
- Se identificaron como posibles causas de variación que afectaron los resultados en cuanto a dispersión de datos, valores atípicos y normalidad de datos fueron las siguientes:
 - Tiempos de moldeo distintos
 - Diferencias en la composición químicas de las CCA
 - Variaciones en la compactación de los especímenes
 - Agotamiento de los operarios.
- La comparación de las desviaciones estándar obtenidas a los 28 días con el estándar de control de la guía ACI 214R-11 demostró que a lo largo de la elaboración de las mezclas se mantuvo un buen control de calidad.
- Aunque todas las mezclas se diseñaron para la misma resistencia de diseño ($f'c$) y resistencia requerida ($f'cr$) solo la mezcla CC superó $f'c$ al sobrepasarla en un 18% y ninguna mezcla superó $f'cr$.
- Se demostró que el porcentaje de sustitución de CCA tiene un impacto negativo en el desarrollo de la resistencia del concreto. Mientras mayor sea el porcentaje de sustitución menor es el desarrollo de resistencia.
- Se determinó que la fuente que genera el menor impacto en el desarrollo de resistencia es la MP y el porcentaje que genera una mayor resistencia en el concreto es el de 10%, por lo que la mezcla MP 90-10 es la que presentó un mejor desempeño mecánico.
- La CCA utilizada en el desarrollo de este estudio no debe ser implementada en

concretos con fines estructurales, ya que no alcanza del mínimo de 210 kg/cm² (20,59 MPa) establecido en el CSCR-10.

Recomendaciones

- Se recomienda asegurar el cumplimiento del análisis granulométrico del agregado grueso para eliminarlo como posible fuente de variación.
- Realizar el ensayo de difracción de rayos x a las CCA para determinar cuáles son los compuestos químicos presentes en las distintas fuentes.
- Se recomienda realizar tandas de calibración para ajustar de mejor manera el diseño de mezcla y reducir las fuentes de variabilidad en cuanto a las aproximaciones del ACI 211.1-91.
- Realizar tandas de práctica para familiarizar a los operarios con proceso de elaboración de mezcla y moldeo y poder optimizar para eliminarlo como posible fuente de error.
- Aumentar los recursos materiales del laboratorio de concreto en general ya que, en muchas situaciones, se utilizó el equipo de los técnicos.
- Para poder realizar un estudio estadístico con las cantidades de especímenes por edad de falla mínimos establecidos por la guía ACI 214R-11, se recomienda verificar que el laboratorio cuente con el inventario suficiente.
- Se recomienda analizar la cantidad de operadores necesarios en caso de replicar o ampliar las cantidades de especímenes ya que este trabajo se realizó con dos operadores, lo cual limita las tareas que se pueden realizar de manera simultánea.
- Se recomienda realizar un estudio químico de los suelos en los que se cosechan los granos de arroz que generan el material utilizado en el presente estudio para determinar si el suelo es factor que aporte a las diferencias de la composición química de las CCA.
- Se recomienda realizar un estudio del proceso de incineración de la cascarilla de arroz para normalizar el proceso de obtención de CCA y eliminar fuentes de variación que afecten el desempeño de la CCA como material.
- Se recomienda normalizar el proceso de empaquetado de la CCA para evitar que durante el transporte y almacenamiento del material, este se pueda ver afectado.

Apéndices

A continuación, se detallan los apéndices que se adjuntan a este documento:

- Apéndice 1: Caracterización del agregado grueso
- Apéndice 2: Caracterización del agregado Fino
- Apéndice 3: Lista de verificación
- Apéndice 4: Resultados de resistencia a la compresión de cada mezcla

Referencias

- ACI 211.1 Committee. (1991). ACI 221.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions of Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Farmington Hills, MI, USA
- ACI 214 Committee. (2011). ACI 214R-11 Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills, MI, USA
- ACI 318 Committee. (2014). ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, MI, USA
- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C-128)
- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete (ASTM C-172)
- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (No.200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing (ASTM C-117)
- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C-127)
- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate (ASTM C-29)
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C-192)
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C-39)
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C-33)
- American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size (ASTM C-702)
- American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Practice for Sampling Aggregates (ASTM D-75)
- American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C-136)
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C-143)
- Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Vatin, N., Karelina, M., Ozbakkaloglu, T., Krishna, R., Kumar-Sahoo, A., Kumar-Das, S., Mishra, J. (2021). Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications. Crystals, 11-168.
- Asmahani-Saad, S., Fadhil-Nuruddin, M., 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*, 163-167.
- level/?msckid=b5027450c64c11ecbf7b7bae112eb5a
- Asmahani-Saad, S., Fadhil-Nuruddin, M., Shafiq, N., Ali, M. (2015). Pozzolan Reaction Mechanism of Rice Husk Ash in Concrete – A Review. *Applied Mechanics and Materials*, 1143-1147.
- Blessen-Skariah, T. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3913-3923.
- Cambio Climático: National Appropriate Mitigation Actions Café de Costa Rica. (09 de octubre de 2021). Obtenido de National Appropriate Mitigation Actions Café de Costa Rica: <https://www.namacafe.org/es/informacion-acerca-del-cambio-climatico>
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., Rizq, E. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Rev. ing. constr.* vol.29 no.3. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732014000300002
- Gravitt, D. (2013). Eco-efficient construction and building materials. *Construction Management and Economics*, 1164-1165.
- INTECO. (2021). INTE C147:2021. San José, Costa Rica.
- Minitab (2018). ¿Qué es una prueba de hipótesis? Recuperado el 25 de mayo de 2022 de, <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/what-is-a-hypothesis-test/>
- Minitab (2018). ¿Qué es un nivel de confianza? Recuperado el 25 de mayo de 2022 de, <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/what-is-a-confidence->
- Minitab Blog Editor (2019). Entendiendo las pruebas de hipótesis: niveles de significancia y valores p en estadística. Recuperado el 25 de mayo de 2022 de, <https://blog.minitab.com/es/entendiendo-las-pruebas-de-hipotesis-niveles-de-significancia-alfa-y-valores-p-en-estadistica?msckid=7d8d19a3c64d11eca963c58e46537dc0>
- Muthadhi, A., Kothandaraman, S. (2013). Experimental Investigations of Performance Characteristics of Rice Husk Ash-Blended Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 1115-1118.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. Objetivos de Desarrollo. <https://onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/>
- Vargas, F., Rigamonti, L. (2020). Environmental evaluation of treated tailing as a Supplementary Cementitious Material. *Procedia CIRP*, 280-284.