

**Evaluación del efecto de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición sobre las propiedades mecánicas del mortero de pega.**

**Andrés Alfredo badillo Hernández**

**Vidal Antonio Mojica Duran**

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Luis Alberto Capacho Silva**

**Ingeniero civil. PhD**

**Codirector**

**Sergio Ruiz Martínez**

**Ingeniero civil. MsC**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga**

**2020**

*A Dios por darme sabiduría y fortaleza en todo momento, para poder culminar exitosamente esta etapa de mi vida.*

*A todos mis familiares, especialmente a mi madre, tías y abuela, fuente de motivación y de apoyo constante, quienes, con sus palabras a aliento constante, permitieron alcanzar este gran logro, el cual les pertenece.*

*A mis amigos y compañeros de estudio, quienes facilitaron y ayudaron con la ejecución de este trabajo.*

*A mi director y codirector, los profesores Luis Alberto Capacho Silva y Sergio Ruiz Martínez, por estar siempre atentos y en disposición de ayudar, su colaboración fue fundamental para el desarrollo del este proyecto.*

*Un agradecimiento y dedicatoria especial a mi novia, quien estuvo presente en todo el proceso académico vivido, dando su apoyo, motivación y colaboración.*

*Mil gracias.*

***Andres Badillo Hernandez***

*Quiero agradecer a Dios, a mi familia y en especial a mi madre quien fue mi pilar y mi apoyo incondicional, a mi hermana por su motivación y a todas las personas que hicieron posible este título universitario.*

*Agradecimiento especial a mis formadores durante toda mi carrera universitaria, al director y codirector de este proyecto sin los cuales esto no habría sido posible*

*A mi compañero y amigo Diego Esteban Leal Poveda, quien nos acompañó y colaboro en todo el proceso de ejecución del proyecto de grado. A Kim Tschie quien siempre me brindo su apoyo y motivación.*

*Al técnico encargado de los laboratorios de ingeniería civil Jairo Hernandez Salazar, quien facilitó la ejecución de los ensayos, brindándonos sus conocimientos y acompañamiento constante.*

*Mil gracias.*

**Vidal Antonio Mojica Duran**

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	10
1. Objetivos .....	12
1.1 Objetivo General .....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco teórico .....	13
3. Metodología .....	14
3.1. Materiales.....	15
3.1.1. Cemento:.....	15
3.1.2. Ceniza volante:.....	15
3.1.3. Arena convencional: .....	16
3.1.4. Residuo de arena de fundición:.....	16
3.2. Diseño de la mezcla de referencia .....	17
3.3. Diseño del experimento .....	18
3.4. Diseño de las mezclas .....	19
3.5. Realización y curado de las probetas .....	20
3.6. Ensayos de las probetas. ....	21
4. Resultados .....	21
3.1. Análisis de la fluidez.....	22
3.2. Análisis de la resistencia a la compresión.....	25
3.3. Análisis de la resistencia a la tracción .....	27

5. Conclusiones..... 31

Referencias..... 33

**Lista de Tablas**

Tabla 1. <i>Composición de la ceniza volante con bajo nivel de calcio (ceniza tipo F)</i> .....	15
Tabla 2. <i>Granulometría de la arena de río</i> .....	16
Tabla 3. <i>Granulometría del residuo de arena de fundición</i> .....	17
Tabla 4. <i>Dosificación de las mezclas de mortero en Kg para 1 m<sup>3</sup> de mortero</i> . ....	19
Tabla 5. <i>Fluidez de las mezclas de mortero en porcentaje</i> . ....	20
Tabla 6. <i>Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la fluidez</i> . ....	22
Tabla 7. <i>Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la compresión a los 7 días</i> .....	25
Tabla 8. <i>Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la compresión a los 28 días</i> .....	26
Tabla 9. <i>Resistencia a la compresión de las mezclas de mortero para 7 y 28 días de curado</i> .....	27
Tabla 10. <i>Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la tracción a los 7 días</i> .....	27
Tabla 11. <i>Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la tracción a los 28 días</i> .....	28
Tabla 12. <i>Residuo de la ceniza volante vs resistencia a la tracción del mortero de pega para 7 y 28 días de curado a RAF contante (50%)</i> .....	30

**Lista de Figuras**

Figura 1. <i>Esquema de diseño estadístico del experimento.</i> .....	18
Figura 2. <i>Fluidez vs ceniza volante en porcentajes a residuo de arena de fundición constante del 50%.</i> .....	23
Figura 3. <i>Fluidez vs residuo de arena de fundición en porcentajes a ceniza volante constante del 15%.</i> .....	24
Figura 4. <i>Ceniza volante vs resistencia a la compresión del mortero de pega para 7 y 28 días de curado a RAF constante de 50%.</i> .....	26
Figura 5. <i>Residuo de arena de fundición vs RAF para 7 y 28 días de curado a CV contante del 15%.</i> .....	29
Figura 6. <i>Residuo de la ceniza volante vs resistencia a la tracción del mortero de pega para 7 y 28 días de curado a RAF contante del 50%.</i> .....	29

## Resumen

**Título:** Evaluación del efecto de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición sobre las propiedades mecánicas del mortero de pega.\*

**Autor:** Andres Alfredo Badillo Hernandez, Vidal Antonio Mojica Duran\*\*

**Palabras Clave:** mortero de pega; ceniza volante; residuo de arena de fundición.

**Descripción:** Este artículo presenta los resultados de un experimento estadístico enfocado en determinar el efecto de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición sobre las propiedades mecánicas de un mortero de pega tipo M. Para determinar el efecto estos materiales se realizó un diseño estadístico experimental del tipo central compuesto en conjunto con un análisis de varianza ANOVA. El diseño presentó 9 puntos en donde se midió el efecto de las variables sobre la fluidez de las mezclas además del efecto sobre la resistencia a la compresión y la tracción para un tiempo de curado de 7 y 28 días. Los resultados indican que la ceniza volante afecta negativamente las propiedades mecánicas del mortero de pega en sustituciones mayores al 15%; además se encontró que el residuo de arena de fundición puede ser utilizado en altas proporciones sin afectaciones estadísticamente significativas sobre las propiedades de estos morteros.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva Ingeniero Civil. PhD. Codirector: Sergio Ruiz Martínez Ingeniero Civil MsC.

**Abstract**

**Title:** Evaluation of the effect of fly ash and foundry sand residue on the mechanical properties of adhesive mortar.\*

**Author:** Andres Alfredo Badillo Hernandez, Vidal Antonio Mojica Duran \*\*

**Key Words:** glue mortar; fly ash; I reside in foundry sand.

**Description:** This article presents the results of a statistical experiment focused on determining the effect of fly ash and foundry sand residue on the mechanical properties of a type M mortar. To determine the effect of these materials, an experimental statistical design of the composite central rate in conjunction with ANOVA analysis of variance. The design presented 9 points where the effect of the variables on the fluidity of the mixtures was measured in addition to the effect on the resistance to compression and traction for a cure time of 7 and 28 days. The results indicate that fly ash negatively affects the mechanical properties of the glue mortar in substitutions greater than 15%; Furthermore, you can find the sand residue from the financing can be used in high proportions without statistically specific effects on the properties of these mortars.

---

\* Degree Work

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva Ingeniero Civil. PhD. Codirector: Serio Ruiz Martínez. Ingeniero Civil. MsC

## Introducción

El cemento es un material esencial para el desarrollo de la civilización contemporánea. Aun así, es un gran foco de contaminación, la cual es generada principalmente por la explotación de las materias primas requeridas en su elaboración, como es la piedra caliza y la arcilla, pero el proceso que más afecta al medio ambiente es la fabricación del Clinker que según la Agencia de Evaluación Ambiental de países Bajos PBL produce entre el 5% al 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (Rendón, Martínez, Martínez, & Arroyo, 2019).

El Clinker se genera por la calcinación de piedra caliza y arcilla pulverizada a temperaturas que rondan los 1400 °C; en este proceso se requieren grandes cantidades de energía y es en donde se generan enormes cantidades de dióxido de carbono, tanto así que en la elaboración de una tonelada de Clinker se produce una tonelada de CO<sub>2</sub> (Johansen & Calleja, 1977).

Por otro lado, la explotación de arena de río para la elaboración de concretos y morteros ha traído graves consecuencias ambientales, como la socavación de las laderas, aumento de la turbidez del agua, alteraciones en el cauce del río y aumento del riesgo por inundaciones entre otros problemas (Nochebuena Reyes, 2010). Pese a toda esta problemática, el concreto sigue siendo el material más importante en la fabricación de obras civiles (Crespo Escobar, 2013), por este motivo se requiere de una reformulación que permita disminuir los niveles de contaminación causado por su utilización.

Como respuesta a esta problemática medioambiental muchos estudios se han dirigido a la sustitución del cemento por ceniza volante. Esta ceniza surge como residuo de la generación de electricidad en las termoeléctricas (Sánchez Molina, Corpas Iglesias, & Rojas Suárez, 2019), y se

ha demostrado que, a dosificaciones adecuadas, puede aumentar la resistencia del concreto y su durabilidad, además del hecho que es mucho más económico que el cemento.

La utilización de ceniza volante resulta más factible en los diferentes tipos de mortero, debido a la incertidumbre de su composición ya que la calidad de la ceniza depende de múltiples factores. Los morteros regularmente están expuestos a cargas no tan altas lo que facilita la sustitución de materiales cumpliendo con los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento (Burgos, Angulo, & Mejía, 2012).

Por otro lado, un material que puede ser utilizado en el mortero como sustitución de la arena convencional de río, es el residuo de arena de fundición que proviene de los moldes desechados por la fabricación de piezas metálicas. Esta arena es muy económica ya que en ocasiones no se le da ningún uso, lo que genera una acumulación excesiva del material y dificultades para su disposición final en lotes a cielo abierto (Noriega, Sota, & Miguel, 2007). Se ha comprobado, en investigaciones como la desarrollada por Lauber Mathieu, que algunos tipos de residuo de arena de fundición pueden ser utilizados sin afectaciones en las características mecánicas de los morteros (Mathien, 2018).

Con base en lo anterior, este proyecto plantea evaluar el efecto tanto de la ceniza volante como del residuo de arena de fundición, sobre las propiedades mecánicas del mortero de pega en estado fresco y endurecido para diferentes tiempos de curado.

Este documento muestra los resultados obtenidos de la sustitución conjunta del cemento por ceniza volante en proporciones del 0 al 30%, y de la arena convencional por residuo de arena de fundición del 0 al 100%, manteniendo una relación agua/aglomerante constante, con base en un diseño estadístico central compuesto.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Determinar el efecto de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición sobre las propiedades mecánicas del mortero de pega.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar el efecto de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición en el estado fresco del mortero.

- Valorar el efecto de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición en el estado endurecido.

-Realizar un análisis de los datos mediante análisis de varianza ANOVA.

## 2. Marco teórico

Las cenizas volantes se generan como residuo de la combustión de carbón, utilizado en la termoeléctricas para la creación de vapor de agua que genera energía eléctrica al pasar por unas turbinas. Estas cenizas están compuestas por partículas muy finas que pueden ser elevadas por los gases que sale del horno; estos gases son tratados antes de ser vertidos al ambiente recolectando así las cenizas (Guilarducci, Beltramini, Carrasco, Grether, & Romano, 2014).

La normativa americana ASTM C618-12 / NTC 3493 (Coal Fly ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete) clasifica la ceniza volante de acuerdo con su composición química así:

**Clase N:** Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para la clase, como algunas tierras de diatomeas; lutitas, tobas y cenizas volcánicas y materiales diversos que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y lutitas.

**Clase F:** Este tipo de ceniza posee propiedades puzolánicas, son cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de antracita, carbón bituminoso, a partir de carbón sub- bituminoso y lignito.

**Clase C:** Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, posee propiedades cementantes, cenizas con alto contenido de carbón proveniente de la quema de carbón sub- bituminoso o lignito y que a su vez puede presentar propiedades hidráulicas (Robayo, 2013).

Por otro lado, el residuo de arena de fundición se obtiene de los moldes utilizados para la fabricación de piezas metálicas. El proceso consiste en reutilizar la arena silíceo, arcilla, y otros aditivos para la creación de moldes, hasta que la mezcla presente un alto grado de deterioro, posteriormente es desechada en lotes a cielo abierto. Así, las arenas que ya no cumplan con las características necesarias para la fabricación de los moldes son reemplazadas totalmente (Garcés García, 2016).

La composición de las arenas residuales es variable dependiendo de las diversas etapas del proceso, de los materiales empleados y de las tecnologías utilizadas en el proceso de fundición. De todas formas, los aspectos más importantes en la calidad de estas arenas son los restos de metales pesados provenientes del material de fundición (cobre, plomo, níquel) y los aglomerados y otros aditivos químicos utilizados en buena parte de las arenas de moldeo como el fenol formaldehído. Si estos contaminantes están en concentraciones muy altas, se pueden producir efectos negativos tanto en la salud de las personas como en los ecosistemas (Gómez, Ramirez, & Aristizábal, 2014).

### **3. Metodología**

A continuación, se presentan los procedimientos y resultados obtenidos en la caracterización de los materiales, las dosificaciones de las mezclas obtenidas del diseño del experimento, y la evaluación del estado fresco y endurecido de las mezclas. Todas las estimaciones iniciales para

el diseño del experimento están sustentadas en investigaciones anteriores y en ensayos de fluidez y manejabilidad de las mezclas, realizados en el laboratorio.

### 3.1. Materiales

Los materiales utilizados en los ensayos fueron: cemento gris, ceniza volante, arena de río, residuo de arena de fundición y agua. A continuación, se mostrará su caracterización:

**3.1.1. Cemento:** el cemento utilizado fue cemento hidráulico Portland, adquirido en la ciudad de Bucaramanga. Sobre este material se aplicaron los ensayos para determinar su densidad y tiempo de fraguado según la norma NTC 221 (ICONTEC, NTC 221,2009) y la norma NTC 4088 (ICONTEC, NTC 4048, 2009) respectivamente, obteniendo una densidad de 2.96 gr/cm<sup>3</sup>, un tiempo de fraguado inicial de 69 minutos y un tiempo de fraguado final de 101 minutos.

**3.1.2. Ceniza volante:** La ceniza volante utilizada se obtuvo de una termoeléctrica local. Las cenizas volantes producidas en Colombia están catalogadas en el grupo F así que en general se componen de los elementos mostrados en la tabla 1. La densidad de la ceniza se calculó según modificación de la norma NTC 221 (ICONTEC, NTC 221, 2009), obteniendo una densidad de 2.14 gr/cm<sup>3</sup>.

Tabla 1.

*Composición de la ceniza volante con bajo nivel de calcio (ceniza tipo F).*

Compuesto	Porcentaje
SiO <sub>2</sub>	42,6-59,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,8-34,5

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,3-18,1
CaO	2,8-7,0
SO <sub>3</sub>	0,19-1,9
MgO	1,2-2,6
K <sub>2</sub> O	0,38-6,0
Na <sub>2</sub> O	0,15-0,94
Sílice reactiva	0,94
Cal libre	0-0,74
Carbono total	0,27-3,9

Fuente: Centro de estudios y experimentación de obras públicas de España (CEDEX, 2017).

**3.1.3. Arena convencional:** la arena que se usó cumple con las características granulométricas para mortero de pega. Es una arena fina de río, de procedencia local, sobre la cual se realizó una granulometría según la norma NTC 77 (ICONTEC, NTC 77, 2007), y el ensayo de gravedad específica y absorción de agregados finos según la norma NTC 237 (ICONTEC, NTC 237, 1995), obteniendo una densidad específica aparente de 2.53 gr/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de absorción de 2.73%.

Tabla 2.

*Granulometría de la arena de río.*

Tamiz	Abertura (MM)	(% Retenido parcial)	(% Que pasa)
N° 4	4,75	0%	100%
N° 8	2,36	1%	99%
N° 16	1,18	3%	97%
N° 30	0,6	10%	90%
N° 50	0,3	42%	58%
N° 100	0,149	34%	66%
N° 200	0,074	8%	92%
Fondo	...	2%	0%

**3.1.4. Residuo de arena de fundición:** Este material fue traído de una fuente local. Se pudo observar que la arena tenía gran cantidad de trozos de metal y tiende a formar terrones que deben

ser desmenuzados para la creación de las mezclas. Sobre esta arena se realizaron al igual que la arena de río una granulometría según la norma NTC 77 (ICONTEC, NTC 77, 2007), y el ensayo de gravedad específica y absorción de agregados finos según la norma NTC 237 (ICONTEC, NTC 237, 1995), encontrando una densidad específica aparente de  $2.46 \text{ gr/cm}^3$  y un porcentaje de absorción de 1.30%.

Tabla 3.

*Granulometría del residuo de arena de fundición.*

<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (MM)</b>	<b>(% Retenido parcial)</b>	<b>(% Que pasa)</b>
N° 4	4,75	0%	100%
N° 8	2,36	0%	100%
N° 16	1,18	1%	98%
N° 30	0,6	19%	79%
N° 50	0,3	57%	22%
N° 100	0,149	17%	6%
N° 200	0,074	4%	2%
Fondo	„	2%	0%

### 3.2. Diseño de la mezcla de referencia

El diseño de la mezcla limpia o de referencia se obtuvo de las indicaciones sobre mortero de pega de la norma sismo resistente NRS-10 de la tabla D.3.4-1 (MinAmbiente, 2010). Para el proyecto se eligió un mortero de pega tipo M, para una resistencia mínima a la compresión de  $f'c = 17.5 \text{ MPa}$ . Según la norma las proporciones de cemento y arena para este tipo de morteros debe ser máximo de 1:3, tomando esta relación para la ejecución del proyecto.

Para determinar la relación agua/aglomerante se buscó la cantidad máxima sustituible de ceniza volante y de residuo de arena de fundición (teniendo como referencia los antecedentes

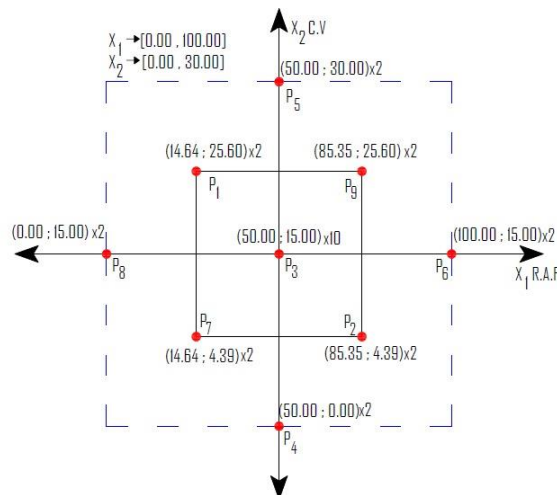
bibliográficos), que permitiera una fluidez y trabajabilidad adecuada de la mezcla, sin sobrepasar el límite máximo de dicha relación, definida previamente como 0.6. De esta manera se llegó a una relación agua/aglomerante de 0.6, una sustitución máxima de ceniza volante por cemento gris del 30% y una sustitución máxima de residuo de arena de fundición por arena de río del 100%.

**3.3. Diseño del experimento**

Se realizó un diseño estadístico experimental del tipo central compuesto en conjunto con un análisis de superficie de respuesta y análisis de varianza ANOVA, con el fin de determinar el efecto de los factores de análisis (variables independientes) sobre las propiedades estudiadas: flujo en estado fresco, resistencia a la tracción y resistencia a la compresión a 7 y 28 días, mediante el software Minitab V.19®.

Figura 1.

*Esquema de diseño estadístico del experimento.*



Las variables consideradas para el diseño fueron el porcentaje de ceniza volante (CV) (0.0-30.0%) y el porcentaje de residuo de arena de fundición (RAF) (0.0-100.0%) (Figura 1). El diseño presentó 9 puntos, ver Figura 1, de los cuales 8 de estos presentaron doble réplica, mientras que el punto central se replicó 10 veces para un total de 26 baches. Estos baches representan las combinaciones de los porcentajes de uso de las dos variables.

### 3.4. Diseño de las mezclas

Tabla 4.

*Dosificación de las mezclas de mortero en Kg para 1 m<sup>3</sup> de mortero.*

Mezcla	RAF [Kg/m <sup>3</sup> ]	CV [Kg/m <sup>3</sup> ]	Arena de río [Kg/m <sup>3</sup> ]	Cemento [Kg/m <sup>3</sup> ]	Aguan [Kg/m <sup>3</sup> ]
50-0	872,2	0,0	872,2	581,4	348,9
14,65-4,4	257,4	25,7	1499,5	559,9	351,4
85,36-4,4	1468,7	25,2	251,9	548,4	344,1
0-15	0,0	87,5	1750,5	496,0	350,1
50-15	862,4	86,2	862,4	488,7	345,0
100-15	1699,9	85,0	0,0	481,6	340,0
14,65-25,6	253,3	147,6	1475,8	428,8	345,8
85,36-25,6	1446,3	144,6	248,1	420,1	338,9
50-30	852,9	170,6	852,9	398,0	341,2

Para el diseño de las mezclas se mantuvo una relación aglomerante-arena de 1:3 y una relación agua/aglomerante de 0.6. La nomenclatura de la mezcla indica el porcentaje sustituido de residuo de arena de fundición y de ceniza volante respectivamente. Por ejemplo, en el caso de la mezcla 50-15, se realizó una sustitución del 50% de la arena de río por residuo de arena de fundición y una sustitución del 15% del cemento por ceniza volante, estas sustituciones en porcentaje de masa de los materiales.

En la tabla 4 se muestra el diseño de las 9 mezclas en dosificación para 1 m<sup>3</sup> de mortero, en donde se da el peso en kilogramos de los cinco materiales utilizados.

### 3.5. Realización y curado de las probetas

Una vez obtenidas las dosificaciones se procedió a preparar la mezcla según la norma NTC 112 (ICONTEC, NTC 112, 1995) que estipula el procedimiento para la realización mecánica de mezclas de mortero de consistencia plástica. Lugo de esto, se midió la fluidez de las mezclas según la norma NTC 111 (ICONTEC, NTC 111, 1995) obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5.

*Fluidez de las mezclas de mortero en porcentaje.*

<b>Mezcla</b>	<b>Fluidez [%]</b>
50-0	118,1
14,65-4,4	118,4
85,36-4,4	116,1
0-15	114,1
50-15	114,2
100-15	113,8
14,65-25,6	111,1
85,36-25,6	109,9
50-30	108,1

Con cada una de estas mezclas se fundieron 6 probetas cúbicas para determinar la resistencia a la compresión y 6 probetas para determinar la resistencia a la tracción. Las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas de ser fundidas e introducidas en las piletas de curado.

### 3.6. Ensayos de las probetas.

Las probetas cúbicas se utilizaron para determinar la resistencia a la compresión y fueron ensayadas según la norma NTC 220 (ICONTEC, NTC 220, 2004). En el caso de las probetas en forma de briqueta, se emplearon para determinar la resistencia a la tracción según la norma I.N.V. E – 327 – 07 (I.N.V, E -327, 2007). Estos dos ensayos se realizaron para tiempos de curado de 7 y 28 días, utilizando 3 probetas en cada ensayo para un total de 312 probetas falladas.

## 4. Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos del análisis estadístico ANOVA por el cual se determinó la relación que tienen las variables (ceniza volante y residuo de arena de fundición) sobre la fluidez de la mezcla y su resistencia a la compresión y a la tracción para tiempos de curado de 7 y 28 días. Dicho análisis estadístico tiene un nivel de significancia del 5%.

Para determinar si alguna de las variables es estadísticamente significativa, se tuvo en cuenta el valor p de la tabla de análisis de varianza, en donde se define como criterio de aceptación de la prueba un valor P menor a la significancia, es decir, menor al 5%.

Las tablas de análisis de varianza están constituidas por seis casillas en donde se muestra: Primero: fuente del análisis, segundo: grados de libertad de la prueba (GL), tercero: sumatoria

cuadrática ajustada (SC. Aj), cuarto: Cuadrado medio ajustado (MC. Aj), quinto: valor F (Val. F), sexto: valor P (Val. P).

### 3.1. Análisis de la fluidez

Se encontró que tanto el residuo de arena de fundición, como la ceniza volante fueron estadísticamente significativas afectando la fluidez de las mezclas.

Se puede observar en la tabla 4 que el residuo de arena de fundición (RAF), y la ceniza volante (CV) presentan valores de P menores a 0.05 lo que traduce que su efecto lineal es significativo; además la ceniza volante tiene un valor P menor a 0.05 su efecto cuadrático, lo que las hace estadísticamente significativa.

Tabla 6.

*Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la fluidez.*

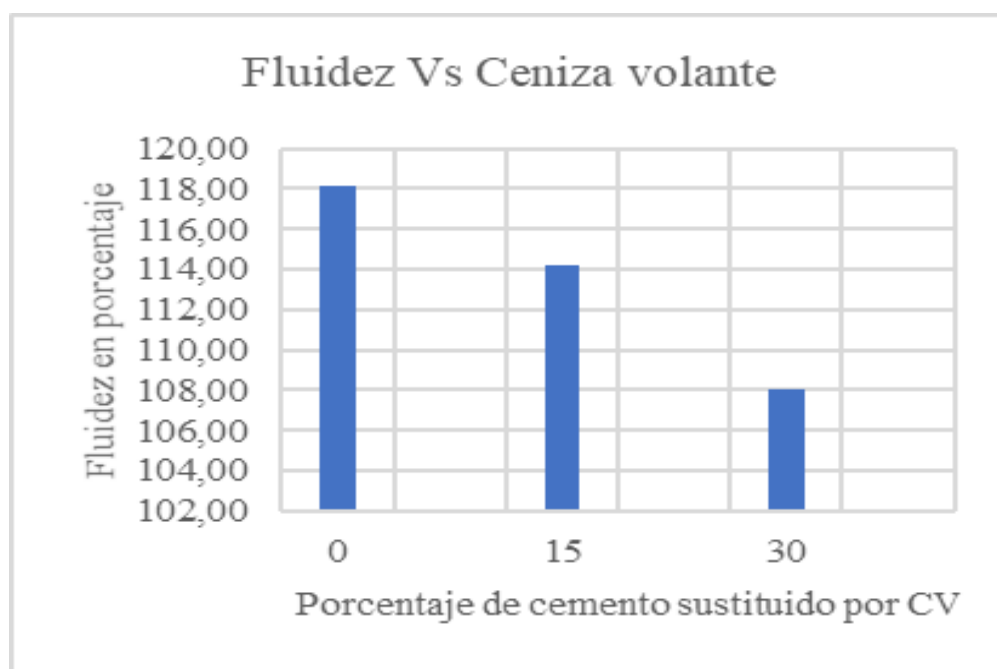
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Lineal	2	195,316	97,658	232,3	0	
RAF	1	3,936	3,936	9,36	0,006	SI
CV	1	191,38	191,38	455,24	0	SI
Cuadrado	2	3,146	1,573	3,74	0,042	
RAF*RAF	1	0,057	0,057	0,14	0,716	NO
CV*CV	1	3,146	3,146	7,48	0,013	SI
Interacción de 2 factores	1	0,656	0,656	1,56	0,226	
RAF*CV	1	0,656	0,656	1,56	0,226	NO

Al ser significativas las dos variables, se acepta la hipótesis de que estas afectan la fluidez de las mezclas.

En la gráfica 1 se puede evidenciar que la fluidez de las mezclas disminuye a medida que aumenta el porcentaje sustituido por ceniza volante, para un porcentaje de sustitución constante del residuo de área de fundición de 50%.

Figura 2.

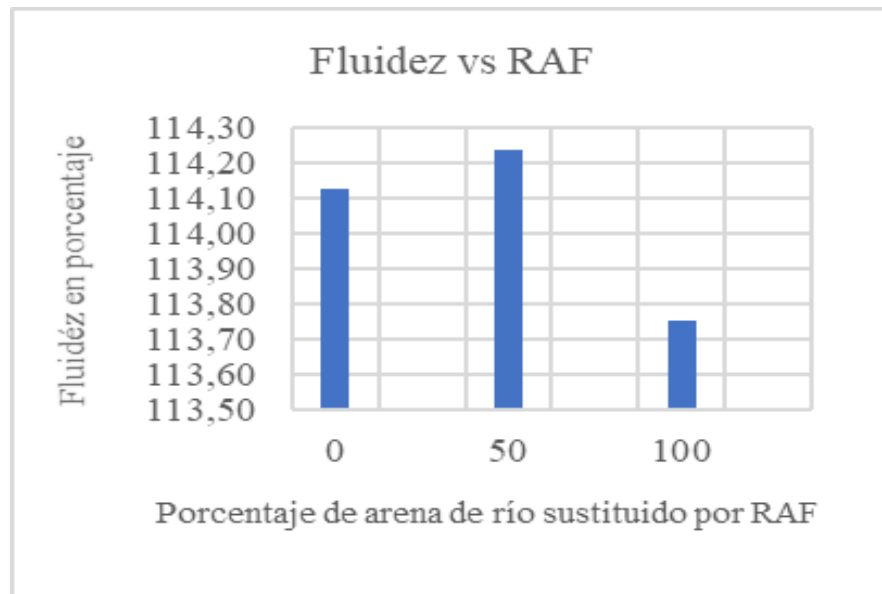
*Fluidez vs ceniza volante en porcentajes a residuo de arena de fundición constante del 50%.*



Para un valor constante de ceniza volante del 15%, el residuo de arena de fundición tiende a disminuir la fluidez de las mezclas, pero no del mismo modo que lo hace de la ceniza, tal como lo muestra la gráfica 2, la cual presenta un pico para un porcentaje de sustitución de residuo de arena de fundición del 50%.

Figura 3.

*Fluidez vs residuo de arena de fundición en porcentajes a ceniza volante constante del 15%.*



Aun con el efecto de disminución de la fluidez causada por los materiales, todas las mezclas cumplen con los requisitos de fluidez de la norma NSR-10 que establece una fluidez mínima para morteros de pega del 105% (ICONTEC, 1997).

Si consideramos ahora las especiaciones de fluidez para un mortero tipo M, la norma NSR-10 establece que debe estar entre el 115% al 125%, de este modo, mezclan con sustituciones de ceniza volante cercanas o superiores al 15% y alto contenido de residuo de arena de fundición (valores cercanos al 100%), se descartan para la fabricación de este tipo de morteros de pega como se evidencia en la tabla 5.

### 3.2. Análisis de la resistencia a la compresión

Este análisis arrojó que solamente la ceniza volante tiene efectos estadísticamente significativos en la resistencia a la compresión tanto a 7 como a 28 días de curado. El residuo de arena de fundición no fue estadísticamente significativo en la prueba, lo que significa que este material se puede utilizar en cualquier proporción sin afectar la resistencia a la compresión del mortero.

Tabla 7.

*Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la compresión a los 7 días.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Lineal	2	90,184	45,0918	38,3	0	
RAF	1	0,085	0,0854	0,07	0,79	NO
CV	1	90,098	90,0982	76,53	0	SI
Cuadrado	2	9,949	4,9743	4,22	0,029	
RAF*RAF	1	1,832	1,8325	1,56	0,227	NO
CV*CV	1	9,007	9,0067	7,65	0,012	SI
Interacción de 2 factores	1	3,042	3,0422	2,58	0,124	
RAF*CV	1	3,042	3,0422	2,58	0,124	NO

Se evidencia, por el valor P menor a 0.05, que la ceniza volante afecta la resistencia a la compresión a los 7 días, en el efecto lineal y cuadrático de dicha variable.

A los 28 días solo existe un efecto lineal significativo de la ceniza volante en la resistencia a la compresión.

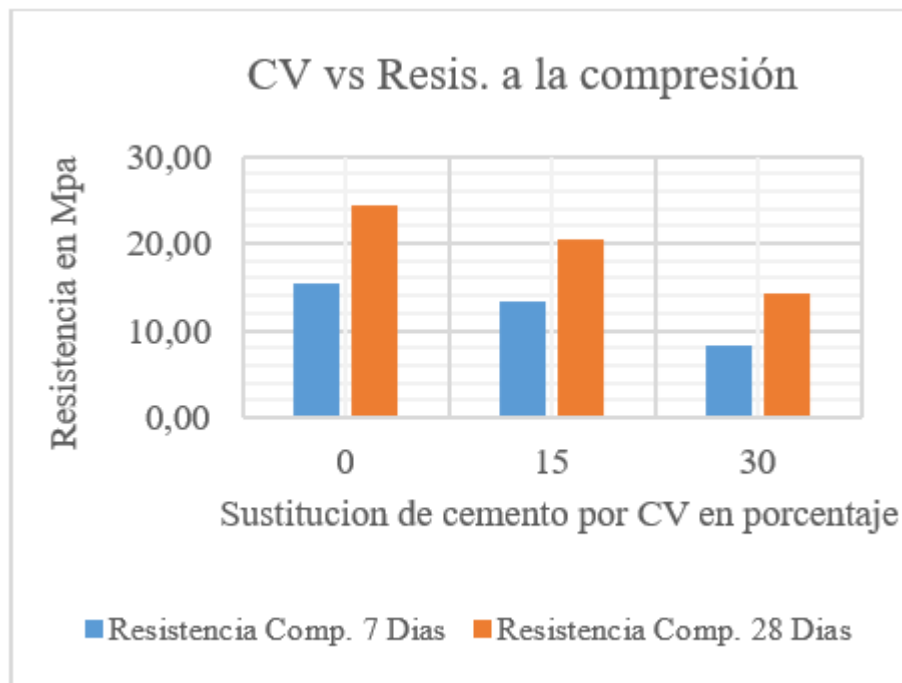
Tabla 8.

Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la compresión a los 28 días.

Fuente	GL	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor p	Significancia
Lineal	2	126,858	63,429	10,79	0,001	
RAF	1	0,001	0,001	0	0,991	NO
CV	1	126,857	126,857	21,58	0	SI
Cuadrado	2	10,487	5,244	0,89	0,426	
RAF*RAF	1	0,248	0,248	0,04	0,839	NO
CV*CV	1	9,657	9,657	1,64	0,215	NO
Interacción de 2 factores	1	5,837	5,837	0,99	0,331	
RAF*CV	1	5,837	5,837	0,99	0,331	NO

Figura 4.

Ceniza volante vs resistencia a la compresión del mortero de pega para 7 y 28 días de curado a RAF constante de 50%.



En la gráfica 3 se puede notar la tendencia que tienen los morteros a disminuir la resistencia a la compresión cuando aumentan el porcentaje de sustitución de la ceniza volante a un valor constante de residuo de arena de fundición de 15%, sin importar el tiempo de curado.

Tabla 9.

*Resistencia a la compresión de las mezclas de mortero para 7 y 28 días de curado.*

<b>Mezcla</b>	<b>R.C.7D [MPa]</b>	<b>R.C.28D [MPa]</b>
50-0	15,3	24,5
14,65-4,4	15,0	22,5
85,36-4,4	14,0	20,0
0-15	12,6	20,7
50-15	13,4	20,5
100-15	12,7	21,9
14,65-25,6	9,3	16,8
85,36-25,6	10,8	17,7
50-30	8,2	14,2

En la tabla 9 se encuentran registrados los resultados promedio de la resistencia a la compresión de cada uno de los puntos estadísticos para un tiempo de curado de 7 días (R.C.7D) y de 28 días (R.C.28D) en MPa.

### **3.3. Análisis de la resistencia a la tracción**

En cuanto a las resistencias a la tracción a los 7 días de curado, se encontró que la ceniza volante y el residuo de arena de fundición son estadísticamente significativos en el efecto lineal del comportamiento a tracción de los morteros.

Los posibles efectos significativos del residuo de arena de fundición en cuanto a la resistencia a la tracción, en comparación con la resistencia a la compresión, en donde este material no fue

estadísticamente significativo, puede deberse a los químicos utilizados en las arenas que generan una posible disminución en las características mecánicas del mortero de pega, siendo mas notable en presencia de esfuerzos de tracción que de compresión.

Tabla 10.

*Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la tracción a los 7 días.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Lineal	2	24372,1	12186	21,78	0	
RAF	1	8529,5	8529,5	15,24	0,001	SI
CV	1	15842,6	15842,6	28,31	0	SI
Cuadrado	2	2971,6	1485,8	2,66	0,095	
RAF*RAF	1	2064,3	2064,3	3,69	0,069	SI
CV*CV	1	1280,9	1280,9	2,29	0,146	NO
Interacción de 2 factores	1	5,9	5,9	0,01	0,919	
RAF*CV	1	5,9	5,9	0,01	0,919	NO

Por otro lado, la resistencia a la tracción a los 28 días de curado solamente se ve afectada por el residuo de arena de fundición. Es decir que la ceniza volante no afecta significativamente la resistencia a la tracción del mortero a los 28 días.

Tabla 11.

*Análisis de varianza, para la medición del efecto de las variables en la resistencia a la tracción a los 28 días.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
Lineal	2	34354,5	17177,2	12,57	0	
RAF	1	28937	28937	21,18	0	SI
CV	1	5417,5	5417,5	3,96	0,06	NO
Cuadrado	2	934,2	467,1	0,34	0,715	
RAF*RAF	1	224,3	224,3	0,16	0,69	NO
CV*CV	1	804,8	804,8	0,59	0,452	NO
Interacción de 2 factores	1	1925,3	1925,3	1,41	0,249	
RAF*CV	1	1925,3	1925,3	1,41	0,249	NO

Figura 5.

*Residuo de arena de fundición vs RAF para 7 y 28 días de curado a CV contante del 15%.*

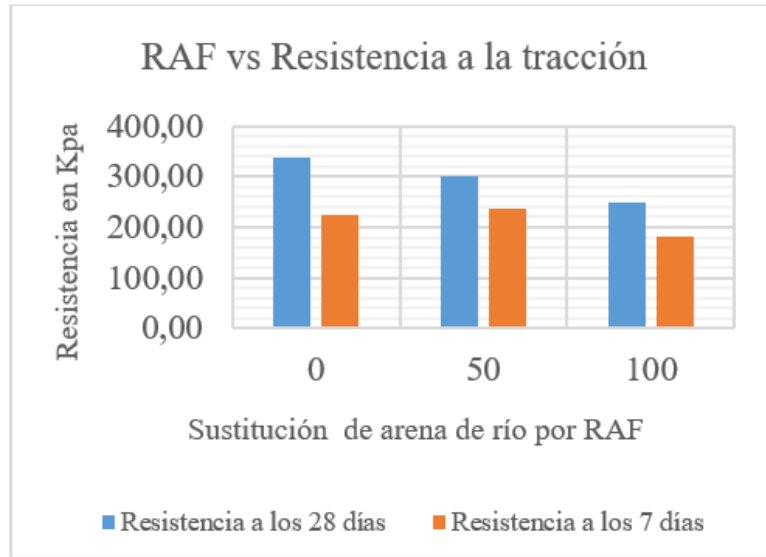
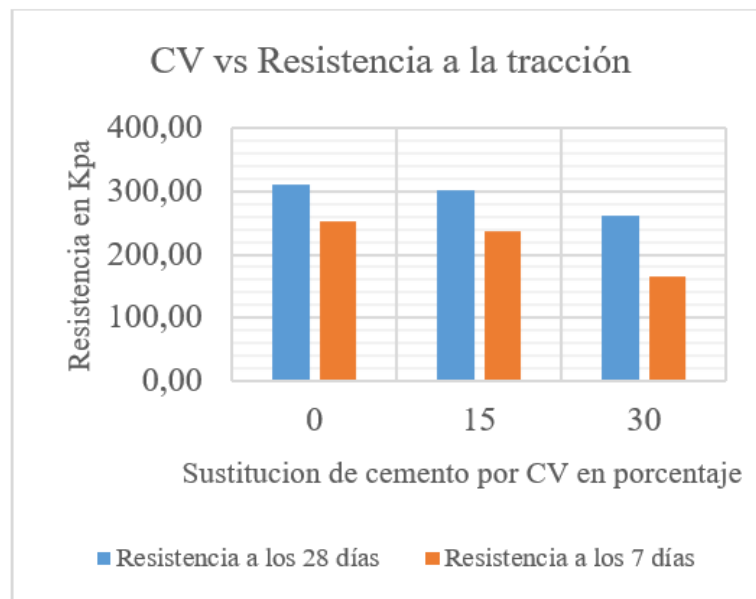


Figura 6.

*Residuo de la ceniza volante vs resistencia a la tracción del mortero de pega para 7 y 28 días de curado a RAF contante del 50%.*



A medida que aumenta la cantidad de residuo de arena de fundación disminuye la resistencia a la tracción del mortero como lo indica la gráfica 4.

Lo mismo pasa con la ceniza volante en las probetas evaluadas a los 7 días, pero este fenómeno disminuye para las probetas con un tiempo de curado de 28 días, llegando al punto en que el efecto producido no es estadísticamente significativo.

El hecho de que la ceniza volante a los 28 días deje de ser estadísticamente representativo puede deberse al efecto retardante en el endurecimiento producido por la ceniza volante, como se explica en la investigación del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) titulada “Concretos híbridos durables y sustentables, con contenidos de ceniza volante” (Rendón, Martínez, Martínez, & Arroyo, 2019). Allí se menciona que la ceniza volante es utilizada para prolongar el tiempo de fraguado y endurecido del cemento hidráulico.

Tabla 12.

*Residuo de la ceniza volante vs resistencia a la tracción del mortero de pega para 7 y 28 días de curado a RAF contante (50%).*

<b>Mezcla</b>	<b>R.T.7 [KPa]</b>	<b>R.T.28 [KPa]</b>
50-0	251,7	310,8
14,65-4,4	286,1	378,1
85,36-4,4	222,9	237,9
0-15	225,2	336,7
50-15	235,8	300,8
100-15	181,6	250,5
14,65-25,6	219,5	308,0
85,36-25,6	159,7	229,8
50-30	165,5	262,0

En la tabla 10 se encuentran registrados los demás resultados promedio de la resistencia a la tracción de todos los puntos estadísticos para un tiempo de curado de 7 días (R.T.7D) y de 28 días (R.T.28D) en KPa.

## 5. Conclusiones

Se ha demostrado que a medida que se aumenta los porcentajes de sustitución de la ceniza volante y del residuo de arena de fundición en el mortero de pega, la fluidez de la mezcla disminuye. Esto quiere decir que no es recomendable sustituir mayores o iguales al 15% de ceniza volante, ni sustituciones cercanas al 100% de residuo de arena de fundición en la elaboración de morteros de pega tipo M, pues la fluidez puede resultar significativamente afectada, siendo la ceniza volante el material que más variabilidad produce en este valor.

De este modo, sustituciones como la realizada en la mezcla (85,36 - 4,4) son recomendables, ya que el bajo porcentaje de ceniza volante sustituida (4.4%) permite un porcentaje aceptable de sustitución de residuo de arena de fundición (85.36%), consiguiendo una fluidez del que ronda un 116% (tabla 3), cumpliendo con las especificaciones de la normativa colombiana para dicho parámetro (de 115% a 125% para mortero de pega tipo M) (MinAmbiente, 2010).

En cuanto a la resistencia a la compresión, se demostró que la ceniza volante tiene un efecto negativo tanto a los 7 como a los 28 días de curado, por lo que no se recomienda sustituciones superiores al 15% que producen resistencias promedio a la compresión de 20 MPa (gráfica 3), cumpliendo con la norma colombiana para el parámetro ( $f'c$  mínimo de 17.5 MPa para de pega

tipo M) (MinAmbiente, 2010). Es de resaltar que el efecto del residuo de arena de fundición no es estadísticamente significativo, es decir que no importa el porcentaje de arena de río que sea sustituido por este material ya que estadísticamente no se afectará la resistencia a la compresión. Por último, la resistencia a la tracción se ve afectada por los dos materiales para una edad de curado de 7 días, pero este efecto deja de ser estadísticamente significativo en la ceniza volante en un tiempo de curado de 28 días ya que este material tiende a provocar un endurecimiento más lento de los morteros (Rendón, Martínez, Martínez, & Arroyo, 2019).

Es importante mencionar la importancia que tuvo el diseño estadístico y el análisis de variable ANOVA de los resultados en el experimento, ya que permitió la ejecución de unos puntos específicos, disminuyendo la incertidumbre del proyecto y el número de probetas necesarias para que este experimento fuera estadísticamente representativo.

### Referencias

- Ansen, V., & Calleja, J. (1977). *Cocción de clínker de cemento portland en hornos rotatorios*. España: matercostrucc.
- Bolaños Noboa, J. S. (2015). *Estudio del uso de materiales reciclados como hormigones, cerámicas y otros productos de derrocamiento o desperdicio de obra como agregados para un hormigón*. Quito: Quito / UIDE / 2015.
- Burgos, D., Angulo, D., & Mejía, R. (2012). *Durabilidad de morteros adicionales con cenizas volantes de alto contenido de carbón*. Cali: Scielo.
- Castellano, J. M., Stefos, E., Sánchez, M., Torres, K., & Reiban, D. (2018). *Un caso de estudio sobre conocimiento previo en tres universidades ecuatorianas: UC, UDA y UNAE*. Scielo.
- CEDEX, & España, C. d. (s.f.). *CEDEX MATERIALES*. Obtenido de <http://www.cedexmateriales.es/>
- Certificación, E. I. (s.f.). *Norma Técnica Colombiana NTC*. Colombia: Mineducacion.
- Crespo Escobar, S. (2013). *Materiales de construcción para edificación y obra civil*. San Vicente: Club Universitario.
- Garcés García, M. (2016). *Diseño, construcción y simulación del llenado de un molde en arena en verde para fundición de piezas de aluminio blanco*. Quito: EPN.
- Gómez, G., Ramirez, D., & Aristizábal, R. (2014). *Estudio de la variación de las propiedades mecánicas y químicas de las arenas en verde para fundición al se sometidas a ciclos de vaciado de aluminio fundido*. Medellín: Revista Colombiana de Materiales.

- Guilarducci, A., Beltramini, L., Carrasco, M., Grether, R., & Romano, M. (2014). *Residuos industriales de una central termoeléctrica. Utilización como adiciones puzolánicas*. Santa Fe, Argentina: Public Domain.
- I.N.V, & Vías, I. N. (2007). *I.N.V. E – 327 – 07. Resistencia a la tensión de morteros de cemento hidráulico*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (1995). *NTC 112. Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (1995). *NTC 237. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (1997). *Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (2003). *NTC 2240. Agregados usados en mortero de mampostería*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (2004). *NTC 220. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (2007). *NTC 77. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (2009). *NTC 221. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*. Bogotá.
- ICONTEC, I. C. (2009). *NTC 4088. Método para determinar el tiempo de fraguado de morteros de cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat modificado*. Santafé de Bogotá.
- Johansen, V., & Calleja, J. (1977). *Cocción de clínker de cemento portland en hornos rotatorios*. España: Matercostruc.

- Lauber, M. (2009). *Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón*. Cataluña: UPC.
- Mathien, L. (2018). *Influencia de la calidad de los residuos metalurgicos granulados como aridos en las propiedades del hormigon*.
- MinAmbiente, M. d. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
- Nochebuena Reyes, G. (2010). *Estudio de la utilización de la arena de fundición automotriz para el desarrollo de materiales de construcción sustentables*. Ciudad de México.
- Noriega, R., Sota, J., & Miguel, R. (2007). *Residuos de arenas de fundición. Bases para la gestión sustentable*. Buenos Aires.
- Oropeza, R., Sánchez, E., & Aviles, R. (2012). *La Arena Residual de Fundición y su revaloración para la industria de construcción*.
- Rendón, M., Martínez, M., Martínez, R., & Arroyo, M. (2019). *Concretos Hidratados durables y sustentables, con contenidos de ceniza volante*. Ciudad de México.
- Robayo, E. (2013). *Comportamiento mecánico de durabilidad de morteros de cenizas volantes activas alcalinamente*. Bogotá.
- Sánchez Molina, J., Corpas Iglesias, F., & Rojas Suárez, J. (2019). *Cenizas Volantes de Termoeléctrica como Materia Prima para la Fabricación de Materiales Cerámicos de Construcción: Efecto de la Temperatura de Cocción sobre el Material*. Cúcuta: Scielo.