

Estado del Arte de la Aplicación de Materiales como Cementantes Alternativos Nacionales en
la Fabricación de Mezclas Cementicias (Pastas, Morteros y Concretos)

Nathalia Andrea Gómez Figueroa

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Civil

Director

Luis Eduardo Zapata Orduz

Doctor en Ingeniería

Codirector

Sergio Ruiz Martínez

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mis padres, por este gran regalo.

A mis abuelos, por ser unos segundos padres.

A Aria, por su amor y compañía.

A Santiago, por creer en mí, y ser un gran apoyo.

A mis herman@s, por las enseñanzas brindadas a lo largo de estos años.

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Marco teórico	13
2.1. Materiales cementicios alternativos	13
3. Metodología	14
3.1 Búsqueda de la información.	15
3.2 Organización de la información.	15
3.3 Análisis de la información.	15
4. Resultados	17
4.1 Mezclas binarias.	17
4.1.1 Calizas de carbonato de calcio.	17
4.1.2 Ceniza volante.	18
4.1.3 Ceniza volante y escoria de alto horno.	22
4.1.4 Ceniza volante y escoria de combustión de carbón.	28
4.1.5 Ceniza volante y humo de sílice.	30
4.1.6 Ceniza volante y escoria de parrilla.	32
4.1.7 Nanosílice y humo de sílice	35
4.1.8 Escoria de parrilla	36
4.1.9 Lodo calcáreo y caliza comercial molida.	37

4.1.10 Material volcánico del Tolima.	39
4.1.11 Residuo de mampostería.	40
4.1.12 Ceniza de cascarilla de arroz y humo de sílice.....	42
4.1.13 Ceniza de cascarilla de arroz, humo de sílice y metacaolín	45
4.1.14 Pigmento azul de ultramar.	47
4.1.15 Catalizador de craqueo catalítico	48
4.1.16 Catalizador de craqueo catalítico, humo de sílice y metacaolín	49
4.1.17 Metacaolín y humo de sílice	52
4.1.18 Escoria de alto horno.....	58
4.1.19 Microsílice.....	59
4.1.20 Nanotubos de carbono y nanosílice.....	59
4.2 Mezclas ternarias.....	60
4.2.1 Ceniza volante y escoria de alto horno.	60
4.2.2 Ceniza volante y humo de sílice.....	62
4.2.3 Escoria de alto horno y piedra caliza.	63
4.2.4 Nanotubos de carbono y nanosílice.....	65
5. Conclusiones	66
6. Recomendaciones.....	67
Referencias bibliográficas	68

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Materiales cementantes alternativos	16
<i>Figura 2.</i> Número de publicaciones por año.....	16
<i>Figura 3.</i> Variación de la corriente durante el tratamiento: probetas curadas al aire libre.....	21
<i>Figura 4.</i> Variación de la corriente durante el tratamiento: probetas curadas en agua.....	21
<i>Figura 5.</i> Curvas de polarización potenciodinámicas corriente- voltaje desarrolladas a 118 días en probetas en condiciones normales.....	23
<i>Figura 6.</i> Curvas de polarización potenciodinámicas corriente- voltaje desarrolladas a 118 días en probetas con carbonatación artificial.....	24
<i>Figura 7.</i> Corrosión en agua potable.....	56
<i>Figura 8.</i> Corrosión en carbonatación acelerada.....	57
<i>Figura 9.</i> Corrosión en cloruros acelerados OCP.....	58
<i>Figura 10.</i> Corrosión en ambiente mixto.....	59

Resumen en español

Título: Estado del Arte de la Aplicación de Materiales como Cementantes Alternativos Nacionales en la Fabricación de Mezclas Cementicias (Pastas, Morteros y Concretos) *

Autora: Nathalia Andrea Gómez Figueroa**

Palabras Clave: Cemento, Concreto, Materiales cementicios suplementarios de origen colombiano, Mezclas cementicias.

Descripción:

Con el fin de reducir las emisiones de dióxido de carbono por tonelada de cemento, y al mismo tiempo reducir costos en la producción de cemento Portland, varios investigadores en el transcurso de los años se han dedicado a estudiar materiales cementicios suplementarios que proporcionen un buen desempeño en la mezcla resultante. El estudio consistió en una amplia revisión de diferentes publicaciones, consultadas a través de plataformas académicas y revistas indexadas, empleando palabras de búsqueda que englobarán la temática a tratar, y abreviaturas de estas mismas, en el idioma inglés y español. El contenido se centró en la evaluación de propiedades en estado fresco, endurecido y de durabilidad en mezclas cementicias (pastas, morteros y concretos) a las cuales se adiciono o reemplazo de forma parcial o total el cemento Portland por materiales cementicios alternativos de origen colombiano, dividiendo la temática en mezclas binarias y mezclas ternarias. Entre los resultados más importantes se encontró que los materiales cementicios alternativos con mayor número de publicaciones fueron humo de sílice, ceniza volante, metacaolín y escoria de alto horno, y los menos investigados fueron lodo calcáreo, ceniza volcánica y nanotubos de carbono. Adicionalmente, se evidenciaron falencias en algunas publicaciones como comparaciones erróneas, falta de argumentación y ausencia de una muestra control.¹

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: Sergio Ruiz Martínez.

Abstract

Title: State of the art of the application of materials as national alternative to cements in the manufacture of cementitious mixtures (pastes, mortars, and concrete) *

Author: Nathalia Andrea Gómez Figueroa**

Key Words: Cement, Concrete, Supplementary cementitious materials of Colombian origin, Cementitious mixtures.

Description:

In order to reduce carbon dioxide emissions per ton of cement, and at the same time reduce costs in the production of Portland cement, several researchers over the years have been devoted to studying supplementary cementitious materials that provide good performance in the resulting mixture. The study consists of an extensive review of different publications, consulted through academic platforms and indexed journals, using search words that will cover the subject to be treated, and abbreviations thereof, in the English and Spanish language. The content focused on the evaluation of properties in a fresh, resistant and durable state in cementitious mixtures (pastes, mortars and concrete) to which Portland cement was partially or totally added or replaced by alternative cementitious materials of Colombian origin, dividing the subject into binary mixtures and ternary mixtures. Among the most important results were that the alternative cementitious materials with the highest number of publications were silica smoke, fly ash, metakaolin and blast furnace slag, and the least investigated were calcareous mud, volcanic ash and carbon nanotubes. In addition, flaws in some publications were evidenced as erroneous comparisons, lack of argumentation and absence of a control sample.²

*Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: Sergio Ruiz Martínez.

Introducción

El sector de la construcción es considerado mundialmente como una de las principales fuentes de contaminación ambiental, pues produce enormes efectos negativos en el medioambiente, ya sea directa o indirectamente (Enshassi, Rizq & Kochendoerfer, 2014). El concreto es el material más empleado en la industria de la construcción por su resistencia, impermeabilidad, facilidad de producción y economía (Gutiérrez, 2003). Sin embargo, la producción del concreto no es amigable con el medio ambiente. Específicamente el cemento, componente aglomerante en el concreto, requiere un alto consumo de energía en su fabricación, además, representa una parte significativa de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (Berry, Cross & Stephens, 2009). En ese orden de ideas, es un compromiso humano investigar sobre nuevos materiales, técnicas y tecnologías que abran paso a la construcción responsable y sostenible.

El uso de los nuevos materiales cementicios suplementarios surgió con el empleo de adiciones minerales, por ejemplo, la escoria de alto horno ha sido incluida en mezclas con cementos portland desde hace más de un siglo de historia, y se ha demostrado que es posible fabricar cementos con características especiales (Siddique & Khan, 2011). Además, claramente el número de estos materiales alternativos es amplio, puesto que existen de tipo puzolánicos como las puzolanas (naturales o naturales calcinadas), ceniza volante baja en cal y de tipo latentes hidráulicos, como ceniza volante alta en cal y humo de sílice (Soria, 1963); por lo que se requiere una considerable investigación para su desarrollo y aplicación en la producción de concreto.

Ante los avances en el uso de materiales alternativos al cemento para la fabricación de mezclas cementicias (pastas, morteros y concretos), es preciso realizar una revisión del estado del arte cuyo

enfoque este dirigido a materiales cementicios suplementarios nacionales, debido a que Colombia parece ser uno de los países más perjudicados, aunque solo contribuya con un 0.37 % de las emisiones mundiales (Andrade, Arteaga & Segura, 2017). Por tal motivo este trabajo tiene como objetivo consolidar los conocimientos recopilados de distintas investigaciones en los últimos veinte años, exponiendo las propiedades en estado fresco, estado endurecido y de durabilidad de cada material cementicio alternativo nacional relacionado con fines aplicativos en el sector industrial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Elaborar un sondeo descriptivo, sinóptico y analítico del estado del arte de materiales nacionales alternativos al cemento en la fabricación de mezclas cementantes (pastas, morteros, y concretos).

1.2 Objetivos específicos

Describir las propiedades y ventajas de las mezclas cementicias (pastas, morteros, concretos) producidas con los materiales cementicios alternativos.

Identificar avances y limitaciones referentes al objeto de investigación.

2. Marco teórico

2.1. Materiales cementicios alternativos

Según la Sociedad Americana para pruebas y materiales, los materiales cementantes suplementarios son materiales inorgánicos que contribuyen en las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas. Por su parte, el estándar británico, define las adiciones como “materiales finamente divididos utilizados en concreto con el fin de mejorar ciertas propiedades o alcanzar propiedades especiales”. En general, se denomina material cementante, aquel capaz por sí solo o en combinación con otros materiales, de formar productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio (C-S-H), hidratos de aluminosilicatos (A-S-H) o también hidratos de aluminosilicatos de calcio (C-A-S-H). Dentro de esta clasificación se puede encontrar materiales como el cemento, las cenizas volantes o “Fly Ash” las puzolanas naturales o artificiales, el humo de sílice o “Silica Fume” y la escoria granulada de alto horno o “Ground Granulated Blast Furnace Slag”. El uso del término suplementario, hace referencia a la función de suplementar o complementar que poseen estos materiales en relación al cemento ya que pueden potenciar las propiedades del mismo o en determinados casos, suplir algunas deficiencias de este para cumplir con las especificaciones de algún proyecto.

Los materiales cementicios suplementarios se dividen en adiciones minerales o materiales inertes, y en materiales cementantes o polvos activos. Las adiciones inertes, a su vez se dividen en materiales no hidráulicos, los cuales no forman productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio (C-S-H), hidratos de aluminosilicatos (A-S-H) o también hidratos de aluminosilicatos de calcio (C-A-S-H), entre estos materiales se encuentran el cuarzo y la caliza, y

los materiales cementantes, se clasifican en materiales hidráulicos, puzolánicos y latentes hidráulicos.

Los materiales hidráulicos, como el cemento Portland, presentan una alta tasa de disolución al entrar en contacto con el agua, generando silicato de calcio hidratado (CSH) y portlandita o hidróxido de calcio.

Los materiales puzolánicos, como las puzolanas (naturales o naturales calcinadas) y la ceniza volante baja en cal, son aquellos que presentan una baja tasa de disolución en relación con un material hidráulico y que en algunos casos requieren de un activador que facilite el inicio de la reacción. El activador en el caso de las puzolanas puede ser el hidróxido de calcio (CaOH_2), el cual es uno de los subproductos de la reacción del cemento con el agua (Moreno, 2018).

Los materiales latentes hidráulicos, como la escoria de alto horno, el humo de sílice y la ceniza volante alta en cal, necesitan de un activador para su endurecimiento hidráulico, como el hidróxido cálcico y sulfatos (Labahn, 1985).

3. Metodología

Con el fin de lograr los objetivos mencionados anteriormente, se elaboró una metodología (Gómez, Navas, Aponte & Betancourt, 2014) que permitió esclarecer la importancia de la investigación, mediante la cual se procedió por dos fases bien diferenciadas. La fase 1 se enfocó en las investigaciones con mezclas binarias, y la 2 fase en mezclas ternarias.

3.1 Búsqueda de la información.

Una vez definido el problema de investigación, se consultaron diferentes fuentes de información como plataformas académicas y revistas indexadas. En este paso fue importante considerar todas aquellas palabras que estuvieran relacionadas con la temática bajo estudio, al igual que las abreviaciones empleadas, adicionalmente las palabras de búsqueda como sus abreviaturas se investigan en el idioma inglés, con el fin de reducir la probabilidad de pérdida de información valiosa. Finalmente se encontraron 73 artículos.

3.2 Organización de la información.

Los 73 artículos encontrados inicialmente fueron agrupados de acuerdo con el material cementicio suplementario empleando la aplicación Mendeley, y de manera manual se descartaron 35 artículos, quedando únicamente 38 publicaciones de verdadera relevancia para la investigación. Finalmente, estos artículos fueron omitidos debido a razones como: los documentos eran estados del arte de reemplazos cuyo origen no eran colombianos, los materiales empleados en los trabajos servían como reemplazos de agregados y no como cementicios, los artículos pese a que eran de autores y de universidades nacionales no eran materiales cementicios alternativos colombianos, las propiedades expuestas en los artículos no estaban incluidas en el alcance de la presente investigación, tales como microestructura y composición química.

3.3 Análisis de la información.

A la información organizada y depurada, se le realizó un análisis, identificando cuales fueron los materiales cementicios suplementarios de mayor y menor investigación (Figura 1), y el número de publicaciones por años (Figura 2). Finalmente, se procedió hacer una lectura más detallada de

las 38 publicaciones y se elaboró el estado del arte del tema expuesto en el presente estudio, contrastando las propiedades de la mezcla control con las muestras cementicias modificadas con los materiales cementicios suplementarios, reportando los avances y limitaciones observadas en las investigaciones.

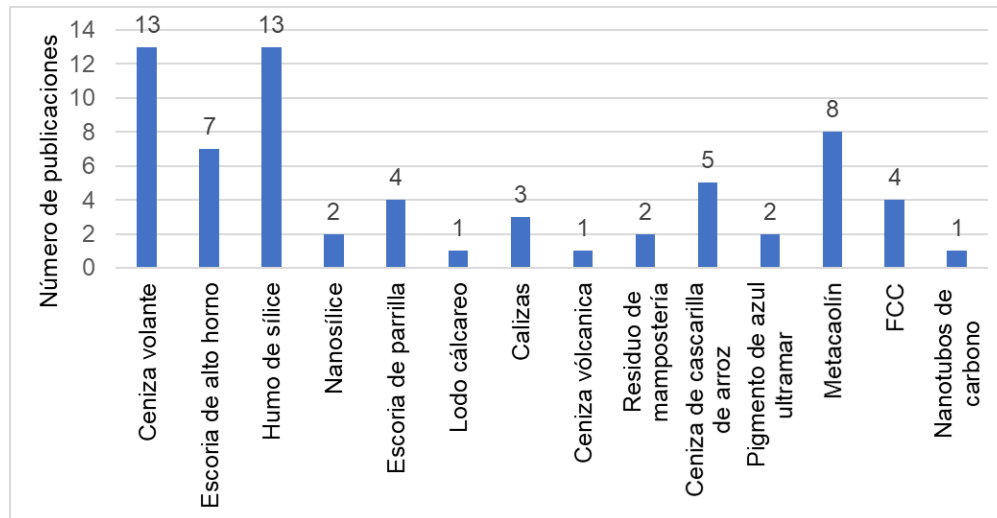


Figura 1. Materiales cementantes alternativos. Fuente: elaboración propia.

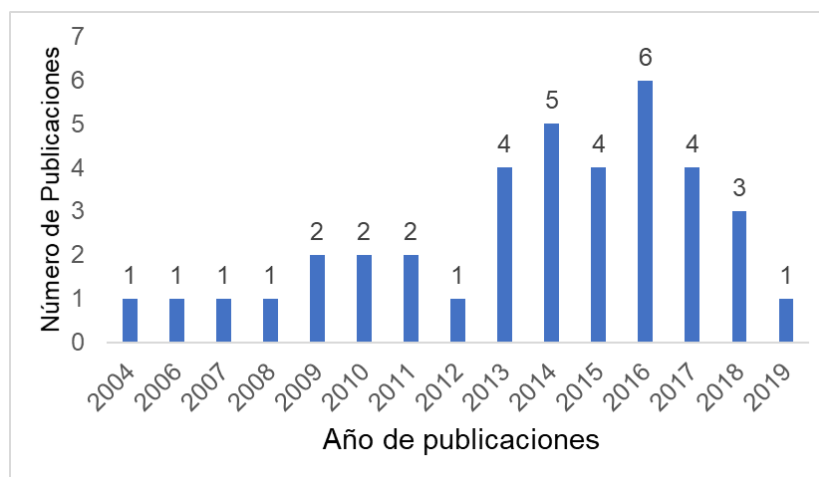


Figura 2. Número de publicaciones por año. Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

Esta investigación agrupó en dos categorías el tema a tratar del presente proyecto, mezclas binarias y mezclas ternarias. Esta sección describe el comportamiento y la variación de las adiciones en las mezclas cementicias con respecto a una muestra control (100% cemento portland). Los análisis se llevaron a cabo en estado fresco, estado endurecido y durabilidad, y se argumenta a la causa de los hechos presentados en gran parte de los artículos presentados.

4.1 Mezclas binarias.

Se procede a presentar las investigaciones de mezclas binarias, las cuales son aquellas compuestas de cemento portland + otro material, o cementante o puzolánico (Suárez, 2010):

4.1.1 Calizas de carbonato de calcio. Una investigación de Gómez & Tobón, 2008, añadió calizas con concentraciones menores de 70%, entre 70% y 80%, y mayores a 80% de carbonato de calcio CaCO_3 al cemento portland (OPC, por sus siglas en inglés) en cantidades de reemplazo del 15%, 20%, 25%. A los morteros elaborados con y sin adición, se les realizaron ensayos para determinar los tiempos de fraguado (NTC 118, 2004), fluidez (NTC 111, 1997), consistencia (NTC 110, 1991) y resistencia a la compresión (NTC 220, 2017).

Se evidenció que el tiempo de fraguado inicial no fue menor a 75 minutos (el menor fue de 95 minutos cuando se empleó caliza con concentración menor al 70% como reemplazo del 20%) y los finales no fueron mayores de 8 horas. Las mezclas mantuvieron una relación agua/cemento (w/cm por sus siglas en inglés) entre 0.480 y 0.485. Al emplear concentraciones menores del 70% para las cantidades del 15%, 20% y 25%; y concentraciones entre el 70% y 80% para cantidades del 15% y 25%, los resultados mostraron que no se presentó variación en la consistencia. La mayor

consistencia fue de 28.31% cuando se usó una concentración mayor del 80% para una cantidad del 15%.

En estado endurecido, se determinó que un OPC Tipo III presentó para los 3, 7 y 28 días de curado mayor resistencia a la compresión que las muestras adicionadas con caliza de diferentes calidades. No obstante, entre las muestras adicionadas con calizas, las que evidenciaron valores más altos en la resistencia tenían una adición de 20% y 25% con menos del 70%, y entre 70% y 80% de CaCO_3 .

Se calculó a los 28 días de curado, el índice de actividad puzolánica (IP). En general, el IP es calculado con el fin de determinar si las puzolanas presentan niveles mínimos de resistencia cuando son usadas con OPC (Soria, 1983). Los resultados arrojaron que el IP en todas las mezclas fue menor con respecto a 100% OPC Tipo III. Para los autores, esto probablemente se deba a que la caliza no es un material puzolánico.

4.1.2 Ceniza volante. Un trabajo de Santaella & Salamanca, 2004, reemplazó parcialmente OPC por ceniza volante (FA, por sus siglas en inglés) con adiciones del 10%, 20%, y 30% para la elaboración de concretos, y para comparar los resultados se hizo una muestra control (100% OPC). En estado fresco, la fluidez en todas las mezclas con respecto a la muestra control disminuyó al ir aumentando la adición de FA; 30% FA presentó una reducción del 46%.

Se estableció la resistencia a la compresión de las mezclas a los 28 y 56 días de curado; con respecto de la mezcla control, 10% FA aumentó 7% y 3%, respectivamente; mientras que se presentó una disminución para 20% FA y 30% FA. Adicionalmente, se determinó el módulo de

elasticidad, el cual aumentó al disminuir la adición de FA. Con respecto a la muestra control, el módulo de 10% FA incrementó 4.6% a los 28 días y 3.9% a los 56 días.

De acuerdo con los autores la disminución de la fluidez para cada una de las mezclas empleadas con respecto a la muestra control fue debido a la cantidad de agua constante. FA requiere de una menor proporción de agua ya que tiende a retener más agua por su forma esférica reduciendo el porcentaje de espacios vacíos. Por otra parte, en bajas proporciones al tener propiedades puzolánicas otorga una mejor eficacia en la resistencia a la compresión al proporcionar un mayor contacto entre sus partículas con los productos de hidratación.

Un estudio de Lizarazo & Higuera, 2015, sustituyó parcialmente OPC por FA empleando la técnica de activación electrometagénesis química. Se realizaron 26 probetas, 13 de ellas para un curado en agua y las otras 13 curadas al aire libre, todas las mezclas contenían 60% FA y w/cm de 1. Para la activación directa de FA se empleó hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 4M, 5M y 6M con una relación en peso del silicato de sodio respecto al [NaOH] de 1. Para cada una de las concentraciones se emplearon 3 probetas, mientras que para cada condición de curado se emplearon 4 probetas para la muestra patrón (sin tratamiento).

A los 180 días de curado, con duración de 4 días y empleando un voltaje (corriente directa) constante de 20V se realizó el ensayo de electrodeposición para las probetas curadas al aire y en inmersión de agua, respectivamente. En la Figura 3 y 4, se observa la variación de la corriente para las mezclas con el tratamiento para cada condición de curado. Mediante las gráficas se observó un aumento en la corriente eléctrica a medida que avanzaron los días del tratamiento, esto pudo suceder por los complejos fenómenos de transporte y las diferencias de movilidad de las diferentes especies iónicas involucradas durante el ensayo; adicionalmente a las especies alcalinas

introducidas desde el exterior, la solución de poros de las muestras de concreto es rica en iones potasio, sodio, calcio e hidróxido.

Se prosiguió a realizar el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico a los 190 días de curado, y a los 200 días de curado se realizó el ensayo para la resistencia a la compresión, de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica colombiana (NTC 673, 2010). Para las mezclas curadas al aire el incremento de la velocidad con respecto a la muestra patrón fue de 36% para 4M y 6M, y 28% para 5M. El incremento en la resistencia fue de 142% para 4M, 146% para 5M y 171% para 6M. Para las mezclas curadas en agua el aumento de la velocidad fue de 11% para 4M y 6M, y 9% para 5M. Mientras que el incremento de la resistencia fue de 39% para 4M, 50% para 5M y 16% para 6M. Estos incrementos en la velocidad, según los autores pueden ser debido a que, las estructuras dentro del concreto obtienen una mayor densidad al ir FA reaccionando y formando nuevos productos de hidratación, lo que ocasiona una disminución en la porosidad del material, adicionalmente estos productos de hidratación mejoran el comportamiento mecánico del material. Es por esto, que los autores creen que al ser mayor el incremento de las propiedades mecánicas que el aumento de la densidad, se producen valores más altos para esta velocidad.

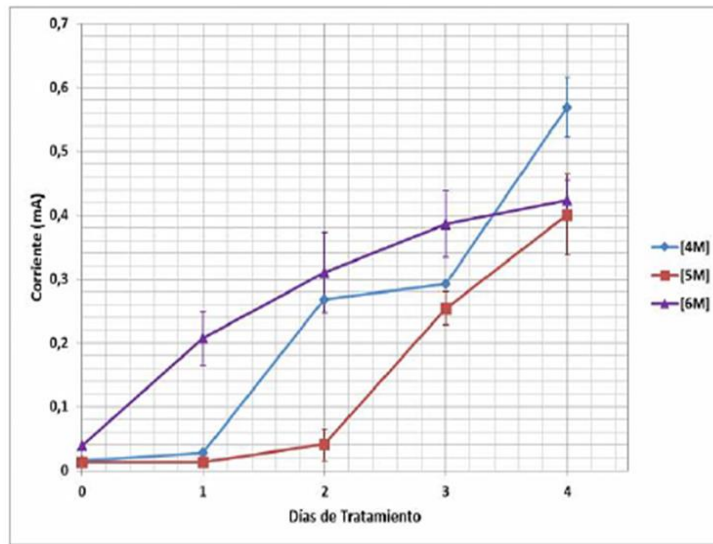


Figura 3. Variación de la corriente durante el tratamiento: probetas curadas al aire libre/en agua.

Fuente: Lizcano & Higuera, 2015.

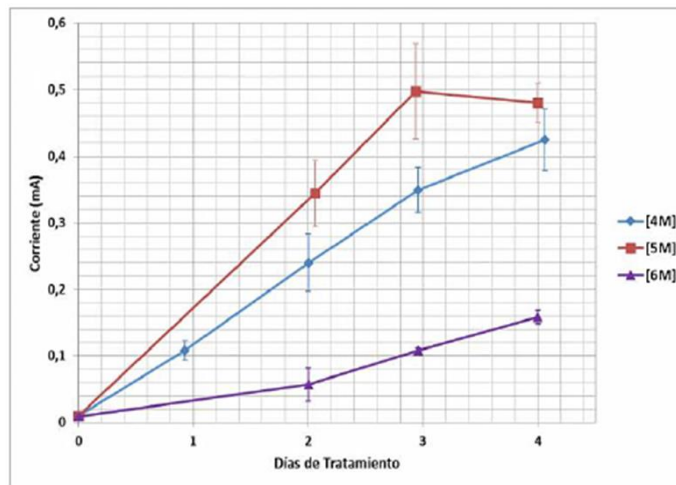


Figura 4. Variación de la corriente durante el tratamiento: probetas curadas en agua. Fuente:

Lizcano & Higuera, 2015.

Un trabajo de Vásquez, Mejía, & Mejía, 2016, evaluó el comportamiento de un material híbrido compuesto de FA y OPC en proporciones de 80%/20%, y un geopolímero empleando 100% FA.

Se evaluó la resistencia a la compresión variando las relaciones molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y Na_2/SiO_2 . La relación óptima fue $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 6.0 y Na_2/SiO_2 de 0.2, ya que presentó mejores resultados en resistencia. Conservando el mismo orden de relaciones molares, a los 28 días de curado la mezcla 80% FA/ 20% OPC con respecto a 100% FA aumentó 25%, 118%, 132%, 139%, 300%.

Se expuso las muestras a ciclos térmicos (0, 1, 2, 3, 6, 8, 10) a una temperatura de 700°C y se determinó la resistencia a la compresión. La muestra 80% FA/20% OPC con respecto al ciclo 0 presentó una reducción en los ciclos restantes del 12.5%, 12.5%, 28%, 34%, 38%, y 44%. La muestra 100% FA con respecto al ciclo 0 presentó un incremento para los ciclos 1, 2, y 3 del 17%, 61%, y 67% mientras que para el ciclo 6, 8 y 10 hubo una disminución del 28%, 33%, y 50%.

4.1.3 Ceniza volante y escoria de alto horno. Un trabajo de Gutiérrez, Pineda & Vera, 2015, sustituyó parcialmente OPC por FA y escoria de alto horno (GGBFS, por sus siglas en inglés). Se empleó una muestra control (100% OPC), y dos mezclas con 20% GGBFS y 10% FA.

En estado fresco, 10% FA presentó una consistencia del 30% debido a que FA poseía una alta superficie específica de $4640 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ demandaba una mayor cantidad de agua, en cambio para 20% GGBFS fue del 26% porque GGBFS tenía una superficie específica menor, de $1240 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$, y atrajo una menor cantidad de agua.

En estado endurecido, las mezclas presentaron una disminución en la resistencia a la compresión con respecto la muestra control tanto en morteros como en concretos para todas las edades de curado. En morteros, a los 56 días, 20% GGBFS presentó una resistencia similar a la mezcla control (18 MPa), sin embargo, 10% FA disminuyó 2.7%. En concretos, a los 120 días,

con respecto a la muestra patrón 20% GGBFS disminuyó 30.7%, y 10% FA un 26.9%. Para los autores, esta disminución en la resistencia pudo ser por la inferior reactividad del OPC en combinación con las adiciones.

Para la evaluación de la corrosión, se realizaron curvas de polarización potenciodinámicas bajo el método de resistencia lineal de la polarización. En las curvas (Figura 5) se evidenciaron zonas pasivas ante la corrosión cuando la corriente no variaba con respecto al potencial, mientras que cuando se presentaban pendientes bajas o intermedias la pasivación no ocurría y las probetas se corroían. En la primera curva observó pasivación para el caso de la mezcla control, mientras que, 20% GBFS, 10% FA, presentaron pendientes intermedias en las reacciones anódicas, siendo 10% FA, la de mayor velocidad de corrosión con 0.0010 mm/año que presentó un potencial de -100 mV y la mayor corriente de corrosión.

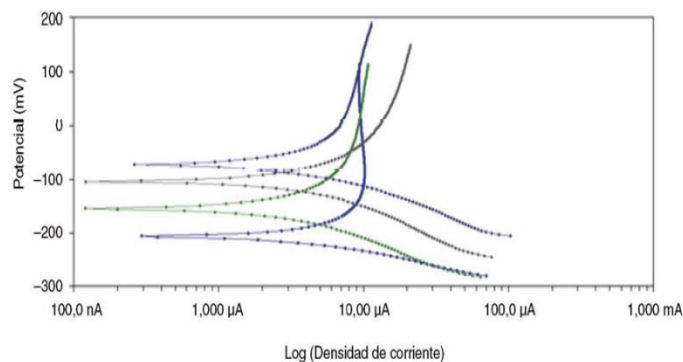


Figura 5. Curvas de polarización potenciodinámicas corriente- voltaje desarrolladas a 118 días en probetas en condiciones normales. Fuente: Gutiérrez, Pineda & Vera, 2015.

En la segunda curva (Figura 6) realizada, las probetas fueron sometidas a carbonatación acelerada en una atmósfera artificial, donde todas las muestras presentaron mayor velocidad de corrosión con respecto a la muestra control.

Se evaluó visualmente a los 118 días las probetas expuestas. En condiciones normales no se encontró corrosión a simple vista, pero en ambiente con carbonatación acelerada se evidenció en 20% GBFS y 10% FA corrosión localizada.

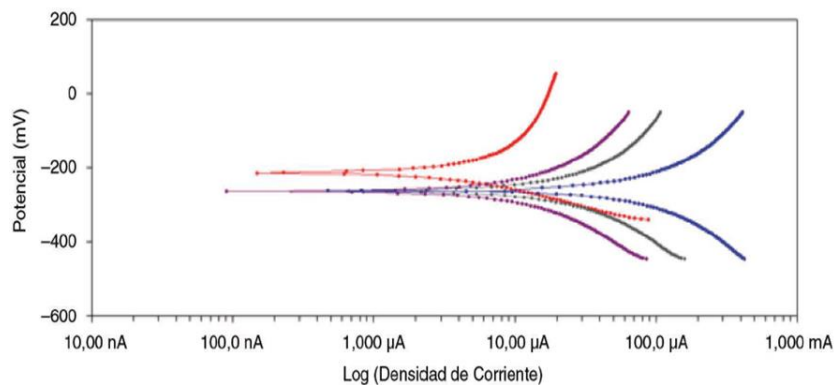


Figura 6. Curvas de polarización potenciodinámicas corriente- voltaje desarrolladas a 118 días en probetas con carbonatación artificial. Fuente: Gutiérrez, Pineda & Vera, 2015.

Un estudio desarrollado por Cárdenas, Lizarazo, & Aperador, 2016, evaluó cuatro mezclas de OPC con reemplazos parciales de FA y GGBFS, y cuatro mezclas de activación alcalina por la sola activación de FA y GGBFS. Las mezclas con OPC se les adicionó 20% y 40% FA; 20% y 40% GGBFS. Las 4 mezclas restantes contenían 80% FA/20% GGBFS; 60% FA/40% GGBFS; 40% FA/ 60% GGBFS; 20% FA/ 80% GGBFS. Con el fin de garantizar el desarrollo de las resistencias, los especímenes se desmoldaron luego de 24 horas de su fabricación y fueron curados bajo un régimen de 85°C de temperatura durante un periodo de 24 horas. La activación de las mezclas de concreto sin OPC se realizó mediante la combinación del silicato de sodio y el hidróxido de sodio, mientras que para las otras mezclas se empleó únicamente silicato de sodio.

Se evidenció que, al aumentar la adición de FA, el asentamiento disminuía, y aumentaba, al incrementar GGBFS. En las mezclas con FA con porcentajes en orden descendente del 80%, 60%, 40%, 20% y GGBFS con porcentajes en orden ascendente del 20%, 40%, 60%, 80%, el asentamiento aumentaba a medida que disminuía FA e incrementaba GGBFS.

En estado endurecido, la resistencia a la compresión a los 28 y 90 días de curado aumentó en las mezclas con activación alcalina al incrementar el porcentaje de GGBFS y disminuir la adición de FA. Según los autores el mejoramiento de la resistencia de estas mezclas pudo ser por la influencia de los activantes químicos empleados y el procedimiento de curado efectuado con temperatura que actúan como catalizadores en la reacción química y el temprano desarrollo de la resistencia mecánica. Mientras que, en las mezclas binarias con OPC, cuando se adicionó FA o GGBFS, la resistencia disminuyó. Según los autores a pesar que los valores de la resistencia en las mezclas con FA fueron menores que en las de GGBFS; FA experimentó una mayor ganancia a los 90 días que en edades tempranas debido al crecimiento paulatino de su hidratación en función del tiempo.

En el ensayo de resistencia a la compresión se midieron las deformaciones longitudinales hasta la falla por medio de la adecuación de una galga extensiométrica sobre los cilindros de las mezclas empleadas, esto con el fin de observar la deformación máxima y registrar la curva completa esfuerzo-deformación unitaria. A los 90 días cuando aumentó GGBFS de 20% a 80%, y disminuyó FA de 80% a 20%, la deformación unitaria incrementó 8.5%. En las mezclas binarias con OPC, al haber adicionado FA o GGBFS de 20% a 40% la deformación disminuyó un 7% y 4.5%, respectivamente. Los autores no presentaron explicación sobre esto.

Adicionalmente, a los 90 días cuando se adicionó GGBFS de 20% a 80% y disminuyó FA de 80% a 20% la relación de Poisson aumentó 20%. En las mezclas binarias con OPC, cuando se añadió 20% a 40% FA o GGBFS, la relación disminuyó un 12% y 2.6%, respectivamente. Los autores reportan que probablemente esta reducción al aumentar la adición FA, sea causado por la deformabilidad longitudinal de los compuestos de la hidratación de FA, siendo menos estables y rígidos que los obtenidos durante la hidratación del OPC. A esto también se le atribuyó el efecto de relleno que proporcionan las partículas de FA en la matriz, y que, a razón de su geometría esférica y tamaño, aumentaron la rigidez del concreto y redujeron su deformabilidad.

A los 90 días de curado, cuando aumentó GGBFS de 20% a 80% y disminuyó FA de 80% a 20%, la resistencia a la tracción, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad aumentó 38%, 36% y 22%, respectivamente. Mientras que para las mezclas binarias con OPC cuando se agregó 20% a 40% FA o GGBFS se presentó una disminución en la resistencia a la tracción, el módulo de rotura, y el módulo de elasticidad del 15% o 6.4%, 10% o 4.5%, y 5% o 13%, respectivamente. Según los autores el efecto de disminución de los valores del módulo de elasticidad en las mezclas con GGBFS fue por causa de la forma angular de sus partículas, ya que no llenaban completamente las porosidades en la matriz; mientras que en las mezclas con FA el aumento del módulo de elasticidad fue debido a la forma esférica de sus partículas que se acomodan y llenan adecuadamente las porosidades de la matriz.

Una publicación realizada por Mejía, Rodríguez, & Mejía, 2014, sintetizó a partir de FA, materiales geopolímeros con la finalidad de reemplazar total y/o parcialmente OPC. Se empleó como fuentes de calcio: GGBFS y OPC Tipo I. Se elaboraron doce mezclas, cuatro de ellas con 100% FA; cuatro con 70% FA y 30% GGBFS; y cuatro con 70% FA y 30% OPC. Para la

activación de FA se utilizó como activadores alcalinos $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ con proporción molar entre 5 y 6, junto con $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ con proporción entre 0.21 y 0.25.

Se evaluó la resistencia a compresión a los 7 y 28 días de curado, se evidenció en las mezclas que al prolongar el tiempo de curado la resistencia incrementaba. Las mezclas con 100% FA presentaron las resistencias más bajas, el mayor incremento de las diferencias entre ambos días de curado para estas mezclas fue la que tenía $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 6 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.21 con un 12%. La mezcla con 70% FA y 30% GGBFS, que contenía $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 5 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.25 presentó el mayor aumento con 83%; y la mezcla con 70% FA y 30% OPC de mayor incremento fue con $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 6 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.25 con 116%. Los autores creen que este aumento pudo ser por la presencia de especies activas de SiO_2 mediante la incorporación de silicatos solubles que reducen el tiempo necesario para la formación del gel a través de su interacción con las especies activas de Al, liberadas durante la disolución y, por tanto, el aumento en el grado de polimerización del gel rico en Si, contribuyendo a una ganancia de resistencia mecánica a los 28 días de curado. También atribuyen el aumento de la resistencia en las mezclas con fuente de calcio (GGBFS y OPC) a la coexistencia del gel N-A-S-H obtenido tras la activación de FA, junto con los geles C-S-H de la hidratación del OPC y el gel C-A-S-H formado tras la activación de GGBFS.

Una investigación de Valencia, Angulo, & Mejía, 2018, evaluó un concreto de activación alcalina basado en FA Tipo C y GGBFS en relación 80/20, utilizando como activante alcalino una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio; la dosificación del activante se ajustó para obtener proporciones molares en la mezcla de $\text{Si}/\text{Al}=3.85$ y $\text{Na}/\text{Si}=0.25$; se empleó 100% OPC como muestra control. La relación (L/S) utilizada fue de 0.48, aclarando que L representa el contenido

de agua presente en la mezcla, además de la aportada por el activante y S incluye la fase sólida representada por los precursores (FA+GGBFS) y el activante anhidro.

Se determinó la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, en 80% FA/20% GGBFS aumentó 39% con respecto a la muestra control del. Los autores atribuyeron esto, a la coexistencia de los geles de activación alcalina N-A-S-H y C-A-S-H.

Se estudió el coeficiente de absorción capilar (k) y la resistencia a la penetración de agua (m). Con respecto a la muestra patrón, k, disminuyó 45%, y m, aumentó 71%. Los investigadores sugieren que esto está relacionado a la estructura más densa que presenta el sistema de activación alcalina y a una red de poros de mayor tortuosidad.

Se realizó el ensayo de expansión en las mezclas luego de su inmersión en una solución de Na_2SO_4 y MgSO_4 a una concentración de 50g/L y temperatura de 25°C. A los 270 días de exposición, la muestra control en la solución Na_2SO_4 presentó una expansión de 0.31% y en MgSO_4 0.075%. Para la mezcla 80% FA/20% GGBFS en solución Na_2SO_4 fue de 0.013% y en MgSO_4 de 0.015%. Este concreto de activación alcalina se pudo considerar como un material de alta resistencia a sulfatos debido a que presentó una expansión inferior a 0.05%.

Después se evaluó la resistencia a la compresión a los 180 días de curado, con respecto a la muestra control expuesta a cada solución, 80% FA/ 20% GGBFS en Na_2SO_4 presentó un incremento del 43% y en MgSO_4 del 79%. A su vez, 80% FA/20% GGBFS inmersa en ácido acético aumentó 267%, e inmersa en ácido sulfúrico incrementó 225%.

4.1.4 Ceniza volante y escoria de combustión de carbón. Una publicación de Silva & Delvasto, 2014, empleó FA y escoria de combustión de carbón (E) como sustitución parcial de

OPC, en la elaboración de un concreto autocompactante (CAC). Se realizaron 5 mezclas, incluida la muestra patrón (100% CAC), y las otras mezclas contenían 35% y 50% FA; y 35% y 50% E.

En estado fresco, se realizó el ensayo del cono de Abrams, caja en L y el embudo en V. Debido a que los materiales eran muy finos, se produjo un efecto de empaquetamiento lo que conllevó a una disminución en la segregación y exudación del CAC, esto se evidenció en la prueba de embudo en V ya que, para todas las mezclas, los valores arrojados fueron menores con respecto a la muestra control. Al no haber presentado segregación se logró un flujo de asentamiento adecuado, una fluidez y capacidad de paso apta, los cuales fueron valores superiores a los de la muestra patrón. De acuerdo con, la prueba del cono de Abrams, con respecto a la muestra patrón el asentamiento aumentó 3% y 2.8% para 35%E y 50% FA, respectivamente. Con la prueba de caja en L se estableció una relación de bloqueo cercana a 1, para 50%FA fue de 0.96 y para 35% E de 0.85.

Se evaluó la resistencia a la compresión y la tracción indirecta a los 90 días de curado, se presentó un incremento en ambas propiedades con respecto a la muestra patrón del 13% y 22% para 35% E y para 50% E un aumento del 11% y 21%, para 35% FA un incremento del 7.2% y 18%, y para 50%FA una 11.8% y 2%, respectivamente. De acuerdo con los investigadores, la mejora de estas propiedades mecánicas en los CAC con adición de E con respecto a los adicionados con FA es debido a que presentan un menor tamaño de partícula y una mayor área superficial, conllevando a una reacción más acelerada, y siendo el contenido de inquemados mucho menor.

En durabilidad, se determinó k , m y la porosidad efectiva. Con respecto a la muestra patrón, k y la porosidad efectiva fue superior en todas las mezclas, 50% FA presentó el mayor incremento con 56% y 47%, respectivamente. El coeficiente m , en las mezclas con 35% y 50% E, disminuyó 14% y 12%, mientras que para 35% y 50% FA aumentó 20% y 2%, respectivamente. De acuerdo

con los autores, los CAC con FA comparados con los CAC con E, presentaron los valores más altos de m y los menores de k , debido a que los productos de la reacción puzolánica obstruyeron las conexiones entre los poros capilares, reduciendo así la penetración de estos concretos.

En cuanto a la porosidad, con respecto a la muestra control, 50% FA presentó un aumento del 22%, para los autores esto debe a una mayor relación agua/fino, lo que hizo que se apreciara una mayor diferencia en la permeabilidad. Mientras que 35% y 50% E; y 35% FA disminuyeron su porosidad un 6%, 7%, 0.91% respectivamente.

4.1.5 Ceniza volante y humo de sílice. Una investigación realizada por Correa, Rojas, & Tobón, 2018, empleó humo de sílice (SF, por sus siglas en inglés) y FA como sustitutos parciales del OPC. Se realizaron siete mezclas de mortero, incluida la muestra control (100% OPC). Los porcentajes empleados en las mezclas contenían 5%, 10% y 15% SF; y 10%, 20% y 30% FA.

En estado fresco, el esfuerzo de fluencia, con respecto a la muestra control, mostró un aumento en las mezclas a excepción de 10% y 20% de FA. Los mejores resultados fueron en las mezclas con SF, especialmente en 15% SF, con un incremento del 24%. Otra propiedad estudiada fue la viscosidad, calculada mediante el modelo de Bingham, en todas las mezclas se produjo un aumento con respecto a la muestra control, sin embargo, se presentó un mayor incremento en las mezclas con FA, especialmente en 30% FA con 67.5%. Según los autores, esto se dio debido a que el tamaño de las partículas de FA era cinco veces más grande que las de OPC; caso contrario a las partículas de SF, que eran iguales o incluso más pequeñas a las partículas de OPC.

En estado endurecido, se evaluó la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, las mezclas presentaron una disminución con respecto a la muestra control, especialmente en las

mezclas con FA. Adicionalmente, se realizó el ensayo de V-Funnel para determinar la capacidad de autocompactación. Se evidenció que las mezclas con SF presentaron un incremento del tiempo de evacuación con respecto de la muestra control, siendo 15% SF la de mayor aumento con 55%; mientras que las mezclas con FA, presentaron una disminución, especialmente 30% FA con 80%. Según los autores, esto se debe a que SF es bastante reactivo y reduce la trabajabilidad de las mezclas, mientras que FA es menos reactivo e interrumpe la formación de flóculos que cumplen una función plastificante.

Un estudio realizado por Valderrama, 2011, sustituyó parcialmente OPC por FA Tipo F y SF con el fin de hacer mejoras al concreto tradicional. Se realizaron 5 mezclas con 10% SF, 10% FA, 20% FA, 30% FA y una muestra patrón (100% OPC).

En estado endurecido, se evaluó la resistencia a la compresión a los 130 días; con respecto a la muestra control, en 10% FA y 10% SF aumentó 12% y 6%, respectivamente, mientras que para 20% y 30% FA disminuyó 12% y 21%, respectivamente. Esta reducción según el autor, se debe a una relación directa con la calidad y reactividad de la adición y el avance en el desarrollo de los productos de hidratación.

En cuando a durabilidad, se realizó la prueba de absorción superficial inicial (ISAT, por sus siglas en inglés), las mezclas con FA presentaron una reducción de la absorción capilar con respecto a la mezcla control. A los 100 días de curado y a un tiempo de 60 minutos, se evidenció que 10%, 20% y 30% FA, presentaron una diferencia del 20%, 33% y 150%, respectivamente; mientras que la diferencia de absorción entre 10% SF y 10% FA fue de 6.6%.

Se realizó el ensayo de sortividad a los 28 y 100 días de curado, el cual sirvió para conocer la durabilidad de las mezclas con respecto a la mezcla control.; a los 100 días para 10% FA y 20% FA, k aumentó un 4% y 20% con respecto la mezcla patrón; y 30% FA presentó similitud con la muestra control, el autor sugiere que esto fue por un mayor taponamiento de poros capilares en el material como consecuencia de la mayor densificación. Por otro lado, 10% SF tuvo una reducción de 24%, para el investigador probablemente esto se deba a la alta finura y reactividad de SF, lo que generó una aceleración en la reacción puzolánica y disminución en el tamaño de poros capilares en el concreto.

Se realizó el ensayo de permeabilidad al ion cloruro a los 100 días, las muestras con mayor resistencia a la penetración de cloruros fueron 30% FA y 10% SF, mostrando una reducción de 56% y 64% con respecto a la mezcla patrón. Mientras que 10% y 20% FA tuvieron una reducción de carga de 42% con respecto a la muestra control. Según el autor, la mejora de la resistencia al aumentar la adición de FA, pudo ser, además de la reacción puzolánica, debido a la mayor capacidad de enlace por los cloruros.

4.1.6 Ceniza volante y escoria de parrilla. Una investigación de Rivera, Mejía, Mejía, & Gordillo, 2014, sustituyó parcialmente OPC por FA y escoria de parrilla (BS, por sus siglas en inglés). Se elaboró dos mezclas, 80% FA y 70% BS, y otras dos mezclas con sistemas geopolímeros, empleando 100% FA y 100% BS. Para la activación de FA y BS se usaron como activadores alcalinos $\text{SiO}_2/\text{AlO}_3$ con proporción molar de 6 y 3.4, y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ con 0.2 y 0.3, respectivamente. Las condiciones de temperatura de curado fueron distintas para cada sistema, para 100% BS, 75°C, 24 h + secado a 105°C; para 100% FA y 70% BS, 75°C; y para 80% FA, 25°C.

Se realizó el ensayo para determinar la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, 80% FA aumento 32% con respecto a 70% BS, e incrementó 173% con respecto a 100% FA; mientras que 70% BS aumento 65% con respecto de 100% BS. Para los autores, el aumento de la resistencia en los sistemas híbridos con respecto de los sistemas con geopolímeros probablemente sea por la generación de una mayor cantidad de gel de unión (el gel de hidrato de aluminosilicato N-A-S-H y el gel de silicato de calcio C-A-S-H) que densifica la matriz.

Se realizó el ensayo de permeabilidad a cloruros a los 28 días de curado, 80% FA presentó el mayor incremento de permeabilidad, mientras que para 100% FA y 70% BS una disminución del 93% y 65%. A su vez, se presentó una mayor resistencia eléctrica para 70% BS; y en 100% FA y 80% FA una reducción del 87%, y 92%.

Un trabajo de Silva, Valencia, & Delvasto, 2018, reemplazó parcialmente OPC por FA y BS para la elaboración de CAC. Se realizaron cinco mezclas con 35% FA, 50% FA, 35% BS, 50% BS y una muestra control (100% OPC).

En estado fresco, se evaluó el ensayo de flujo de asentamiento mediante el cono de Abrams; la capacidad de relleno y de paso a través de la prueba de caja en L, y se determinó la capacidad de relleno y viscosidad mediante la prueba de embudo en V. El asentamiento en todas las mezclas presentó un incremento del 3% con respecto a la muestra control. La relación de bloqueo para las mezclas osciló alrededor entre 0.8 y 1, la mezcla 50% FA tuvo el valor más cercano a 1 con 0.96. El tiempo en la prueba de embudo para las mezclas con FA y 50% BS fue inferior de 12 segundos y de 13.5 segundos para 35% BS, sin embargo, todas las mezclas de CAC llenaron los moldes completamente por la acción de su propio peso sin necesidad de vibrado.

En estado endurecido, se determinó la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta a los 180 días de curado. Con respecto a la muestra patrón, 35% FA presentó una disminución del 7% y un aumento del 2%, respectivamente, en 50% FA la reducción fue del 11% y 6%. Mientras que en 35% BS se incrementaron 16% y 14%, respectivamente, y en 50% BS un 20% y 31%. Por otra parte, se realizó el ensayo para hallar la resistencia a la flexión a los 90 días de curado; con respecto a la muestra patrón, la resistencia en 35% y 50% FA, se redujo un 12% y 13%, respectivamente, en cambio, se incrementó un 10% y 20% para 35% y 50% BS. Los autores atribuyen los buenos resultados en los CAC con adición de BS probablemente a que las partículas eran más finas que las del OPC, logrando llenar más espacios vacíos mejorando la compacidad de la pasta, adicionalmente como la adición se hizo en peso, al tener menor densidad suponían un mayor volumen de pasta.

Se realizó el ensayo de succión capilar, y de porosidad y absorción. Los coeficientes k , m , y la porosidad efectiva (ϵ_o) aumentaron en todas las mezclas con respecto la muestra control. Para 35% y 50% BS, 35% y 50% FA el incremento de k fue del 36%, 33%, 8%, y 56%, respectivamente; para m fue de 124%, 130%, 213%, y 167%; y para ϵ_o fue del 8%, 17%, 8% y 47%, mientras que la porosidad total disminuyó para 35% y 50% BS y 35% FA un 6%, 7%, y 1%, respectivamente, y aumentó 22% para 50% FA. Los investigadores sugieren que el aumento de poros en los CAC con adición de FA es porque contenían mayor relación agua/finos. Adicionalmente, atribuyen que los CAC con 35% FA presentan los valores más altos de m y menor k posiblemente a los productos de reacción puzolánica que fueron capaces de obstruir las conexiones entre los poros capilares, aumentando la resistencia a la penetración del agua.

Por último, se determinó la permeabilidad a cloruros y la resistividad. Con respecto a la muestra patrón, la permeabilidad se redujo para 35% y 50% BS, 35% y 50% FA un 59%, 74%, 71% y 79%, respectivamente, mientras que la resistividad aumentó 146%, 286%, 204%, 291%, respectivamente. Para los investigadores los buenos resultados de los CAC con FA pueden atribuirse a la disminución del tamaño de los poros y la reducción de las microfisuras en la zona de transición, hecho que se debe a que, las partículas esféricas de FA mejoran la densidad en la matriz y en la zona de interfaz entre los agregados y la pasta. Por otro lado, sugieren que, en los CAC con BS, la reducción de la permeabilidad a cloruros se debe a la mejora en la estructura de los poros (reducción de tamaño de poro) por reacciones puzolánicas y a la capacidad de enlaces de FA y BS con el ion cloruro para formar la sal de Friedel.

4.1.7 Nanosílice y humo de sílice. Un estudio por Tobón, Restrepo, & Payá, 2010, evaluó tanto en pastas como morteros, ocho mezclas incluyendo la muestra control (100% OPC). Se sustituyó parcialmente OPC por nanosílice (NS, por sus siglas en inglés) con porcentaje en peso de 1%, 3%, 5% y 10%, y SF en porcentajes en peso de 5%, 10% y 15%. NS se presentó como suspensión acuosa, mientras que SF como polvo densificado.

Para todas las muestras se empleó una relación w/cm de 0.32 y se mezcló el superplastificante con agua hasta que alcanzó una consistencia normal. Se evidenció que las mezclas con NS redujeron el tiempo de fraguado; con respecto a la muestra control, 10% NS disminuyó 40%, mientras que para las muestras con SF la reducción fue muy leve por la baja actividad puzolánica. Se observó que NS y SF aumentaron la demanda de agua tanto para morteros como para pastas a medida que las cantidades se iban incrementando; en morteros, 10%NS produjo una demanda del

33%, y 15%SF del 7%. En las pastas, 10% NS presentó una relación w/cm de 0.42, y 15%SF de 0.34.

Mediante ensayos de resistencia a la compresión, en morteros a los 28 días de curado se encontró que para mezclas con SF, la resistencia fue menor con respecto a la muestra control. Por otra parte, cuando SF pasó del 5% al 10% la resistencia aumentó 17% y cuando varió de 10% a 15% disminuyó 69%. Con respecto a la muestra control, la resistencia en 1% y 3% NS disminuyó 21% y 8%, respectivamente. Y para 5% y 10% NS aumentó 4% y 67%, respectivamente. De acuerdo con los autores el comportamiento encontrado en las mezclas con SF pudo ser debido a la poca o muy baja actividad puzolánica de las mezclas, lo que hizo que trabajara como relleno.

4.1.8 Escoria de parrilla. Un estudio realizado por Robayo, Matthey, Silva, & Delvasto, 2016, elaboró cinco mezclas de CAC, a las cuales se añadió BS como reemplazo parcial de OPC usando porcentajes en masa del 10%, 20%, 30% y 50%, e incluyendo la muestra control (100% de OPC).

Se ejecutaron ensayos del cono de Abrams, caja en L y embudo en V para determinar la fluidez, la capacidad de paso y de relleno de las mezclas. En el ensayo de embudo en V, se encontró que las mezclas con BS en comparación con la mezcla de control, tenían un mejor tiempo de flujo en espacios reducidos con tiempos entre 8 y 13 segundos. En la prueba de asentamiento se obtuvieron aumentos con respecto a la muestra control, 10% BS presentó un incremento del 15%, y 20% BS del 9%. Por otro lado, en el ensayo de caja en L, la relación de bloqueo de 0.98 de la muestra control fue disminuyendo a medida que iba aumentando el porcentaje de adición de BS. Según los autores, los resultados de manera general, mostraron un buen desempeño de las propiedades en estado fresco probablemente porque las partículas de BS reducen el volumen de espacios vacíos, generan fricción entre sus componentes y otorgan resistencia al flujo.

Se evaluó la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, con respecto a la muestra patrón, 10%, 20% y 30% BS tuvieron un incremento del 11%, 14%, y 20%, respectivamente. A los 90 días se presentó un incremento menor para estas mezclas, para los autores esto sucede quizás porque las reacciones puzolánicas fueron lentas y se dieron a medida en que se consumió el hidróxido de calcio producido por las reacciones de hidratación del OPC. En cambio, 50% BS presentó una disminución del 22%. De acuerdo con los autores esto podría ser atribuido a la disminución del hidróxido de calcio disponible generado durante la hidratación del OPC, el cual es esencial para la generación de las reacciones puzolánicas. Otro factor que pudo influir en el comportamiento mecánico de las mezclas de CAC es el tamaño de la partícula ya que al haber sido empleada como adición pudo haber tenido mayor facilidad de llenar los espacios vacíos de las mezclas, mejorando el empaquetamiento y la distribución de las partículas del cementante, y de este modo generando una zona de transición más densa y homogénea entre la pasta y los agregados. Por otro lado, la superficie de BS pudo haber tenido afinidad con las fases hidratadas del OPC, facilitando de esta forma la nucleación de los productos de hidratación.

4.1.9 Lodo calcáreo y caliza comercial molida. Una investigación efectuada por Silva, Burgos, Valencia, Delvasto, & Álvarez, 2013, fabricó CAC adicionado con lodo calcáreo (CALC, por sus siglas en inglés) y caliza comercial molida (CACC, por sus siglas en inglés) en porcentajes peso del 35% y 50%.

En estado fresco, el ensayo de flujo de asentamiento mostró que no hubo variación; de un 35% a un 50% CACC los valores fueron de 750 mm, y para las mezclas con CALC los asentamientos fueron de 720 mm. El ensayo de caja en L, arrojó rangos cercanos a 1 para la relación de bloqueo, por lo que se concluyó que no existía riesgo de bloqueo de los áridos, entre las barras de refuerzo.

En el ensayo del embudo en V, se obtuvieron rangos de tiempo de fluidez entre 9 y 12 segundos, lo que indicó que las cuatro mezclas presentaban buena fluidez al tener una viscosidad moderada. Adicionalmente se observó que las mezclas con presencia de CACC, al tener un menor tamaño de partícula, redujeron los espacios vacíos y aumentaron el factor de empaquetamiento, disminuyendo la resistencia al flujo.

En estado endurecido, se evaluó la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad a los 90 días de curado; las mezclas con CACC presentaron mejores resultados que las mezclas con CALC. Se presentó un aumento de estas propiedades para 35% CACC del 24.7% y 12.5% con respecto a 35% CALC, y en 50% CACC del 24.3% y 16.6% con respecto a 50% CALC. Para los autores, estos resultados pudieron ser porque CACC al tener un menor tamaño de partícula, y facilidad de llenado de espacios disponibles, pudo haber mejorado la distribución de partículas del cementante, originando una transición más densa y homogénea entre la pasta y los agregados de tal forma que mejoró el desempeño mecánico de las mezclas. Los autores señalan que, al tener CACC una mayor superficie específica, pudo haber acelerado el proceso de hidratación del OPC e incrementado la resistencia a la compresión del CAC. Otro factor que pudo influir es w/cm y el aditivo superplastificante, ya que estos factores fueron superiores en los CAC adicionados con CALC, lo que ocasionó una disminución en la resistencia a la compresión.

Mediante ensayos de permeabilidad, se determinó que al variar 35% a 50% CACC, la porosidad total, k y m disminuyeron 10%, 15%, y 5%, respectivamente; mientras que al pasar de 35% a 50% CALC aumentaron 29%, 6%, y 4%. Por otro lado, la porosidad efectiva aumentó 10% al variar 35% a 50% CACC y disminuyó 29% al pasar de 35% a 50% CALC. Al tener CACC menor tamaño de partícula y mayor área superficial, los autores creen que esto pudo haber ocasionado una mejora

en la distribución de partículas del cementante y un incremento en la nucleación de los productos de hidratación, generando una matriz y una zona de transición interfacial alrededor de los agregados más densa y homogénea con una estructura porosa más refinada.

4.1.10 Material volcánico del Tolima. Una investigación realizada por Burgos, Guzmán, Hossain, & Delvasto, 2017, incorporó material volcánico del Tolima (MVT) en la elaboración de CAC, se hicieron seis mezclas con adición del 20%, 28%, 35%, 42%, 50% de MTV, incluyendo la muestra patrón (100% OPC).

Se realizaron pruebas de embudo V, caja L y flujo de asentamiento. A medida que aumentó el porcentaje de MTV, el asentamiento se redujo con respecto la muestra control; 20% y 28% MTV presentaron un incremento del 7% sin producir segregación ni sangrado, y 35% MTV disminuyó 21%. Los valores del tiempo de flujo, oscilaron aproximadamente entre los 5 y 10 segundos, para 42% MTV 10 segundos y para 35% MTV 5 segundos. Por otra parte, la relación de bloqueo estuvo entre 0.8 y 1, siendo la mezcla de 28% MTV la más cercana a 1.

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión, y mediante un modelo de regresión cuadrática se determinó que el porcentaje máximo de MTV que debía emplearse en los CAC era de 30%. Por tal motivo, se evaluaron las propiedades mecánicas y de durabilidad con 30% MTV. A los 28 días de curado, con respecto a la muestra control, la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión disminuyó 14%, 45% y 40%, respectivamente. De acuerdo con los autores, este comportamiento pudo ser debido a que MTV causó un efecto de dilución que generó una disminución en el contenido del OPC, lo cual condujo a una reducción en el volumen de los productos de hidratación.

Para determinar la permeabilidad, se realizó el ensayo de sortividad a los 28 días de curado, con respecto a la muestra control, k aumentó 15.8%, y m disminuyó 42%, para los autores esto pudo ocurrir debido a que MTV, alteró el proceso de hidratación, disminuyendo sus productos.

4.1.11 Residuo de mampostería. Un trabajo de Silva, Gordillo, & Delvasto, 2019, empleó residuo de mampostería (RM) como material cementicio alternativo, se realizaron cinco mezclas de CAC, incluyendo la muestra control (100% OPC) y las otras contenían reemplazo en volumen de 12.5%, 25%, 37.5%, y 50% RM.

El estudio evaluó el flujo de asentamiento a través del cono de Abrams; con respecto a la muestra patrón para 12.5% y 37.5% RM disminuyó 3% y 1%, respectivamente, y aumentó 3% y 1% para 25% y 50% RM. Los autores explican este aumento debido a que las partículas de RM tenían un mayor tamaño en comparación con las de OPC, lo que disminuía el contenido de agua de la superficie de las partículas. Por otro lado, mediante la prueba de la caja en L, se obtuvo una relación de bloqueo de 0.90 para 50% y 25% RM, siendo estas las más cercanas a 1. Para calcular un estimativo de la capacidad de llenado se calculó el tiempo con el embudo en V; con respecto la muestra control, en 12.5% y 50% RM disminuyó el tiempo 4% y 0.5%, mientras que en 37.5% y 25% RM aumentó 8% y 1%, respectivamente.

Se realizó a los 7, 28 y 60 días de curado, el ensayo de resistencia a la compresión, se evidenció que al adicionar RM, la resistencia disminuía con respecto a la muestra control. A los 7 días, al variar 12.5% a 50% RM, disminuyó de 12.7% al 51.5%, y entre 7.39% a 41% para los 28 días. Esto para los autores, quizás fue por la lenta reactividad de RM, ya que para los 60 días esta discrepancia fue menor estando entre 5.6% a 34.2%, lo que hizo pensar en una posible reactividad puzolánica.

Se determinó la absorción y porosidad de las mezclas a los 28 días de curado. El porcentaje de absorción de 12.5% a 50% RM con respecto a la muestra control aumentó de 4.6% a un 35.7%; para el volumen de poros, se incrementó de 3% a un 26%; y para la densidad de 0.96% a 3.9%. Los autores atribuyen esto posiblemente al efecto dilución, ya que se presentó una reducción en el contenido de OPC, generando un aumento de w/cm.

Un trabajo de Silva, Gordillo, & Delvasto, 2017, estudió el efecto de RM como adición de OPC en la elaboración de morteros. Se elaboraron seis mezclas con 10%, 20%, 30%, 40% y 50% RM, una muestra control (100% OPC). Se evaluó el índice de actividad puzolánica (IAP) a los 28 días de curado, superando el valor límite (75%) con un 84.36%, cumpliendo con que la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 fuese más del 80%.

Se determinó la resistencia a la compresión a los 28 y 90 días de curado. A los 28 días, al variar la adición de RM de 0 a 10%, 20%, 30%, 40%, y 50% la resistencia disminuyó en 9.4%, 19.3%, 32.3%, 48.5% y 59.9%, y a los 90 días un 7.1%, 13.1%, 24.4%, 38.43% y 48.42%. Los autores sugieren que este decrecimiento pudo ser debido al efecto dilución y la baja reactividad del material reactivo presente en el RM principalmente a edades tempranas, por lo que el efecto puzolánico de la adición se evidenció a los 90 días de curado, disminuyendo la diferencia entre la resistencia del mortero en referencia y las mezclas que contienen este residuo.

A los 28 días de curado, se midió la absorción, la densidad aparente y el volumen de poros permeables. Al ir aumentando el porcentaje de RM de 0 a 10%, 20%, 30%, 40%, y 50% se incrementó el porcentaje de absorción y volumen de poros permeables en 2.4% y 0.8%, 6% y 1.9%, 9.3% y 6.9%, 15.3% y 11.6%, 16.5% y 13%, respectivamente. Mientras que al incrementar la adición de RM se presentó una disminución de la densidad aparente del 1.7%, 2.38%, 2.42%,

2.8%, y 2.9%, respectivamente. Los investigadores atribuyen que esto pudo relacionarse al no reaccionar completamente el agua en la mezcla debido a RM, lo que conllevó a que el agua quedaría libre en la estructura y al evaporarse dejase poros en la mezcla.

4.1.12 Ceniza de cascarilla de arroz y humo de sílice. Una investigación de Salas, Delvasto, & Mejía, 2013, presentó los resultados para el desarrollo de un concreto de alto rendimiento, utilizando dos tipos de ceniza de cascarilla de arroz (RHA, por sus siglas en inglés): TRHA (producida por tratamiento térmico) y ChRHA (producida por tratamiento químico y térmico, compuesta de 99% sílice, con mayor actividad puzolánica que SF y TRHA), adicionalmente se empleó SF como puzolana de referencia. Se realizaron diez mezclas como reemplazo parcial de OPC en peso con 10% SF, y 5%, 10%, 15% y 20% TRHA y ChRHA; y la mezcla patrón (100% OPC).

En estado fresco, w/cm fue de 0.45 en todas las mezclas menos para 20% TRHA con 0.47. El asentamiento con respecto a la mezcla control, para 5% TRHA y 15% ChRHA disminuyó 29%; para 10% TRHA y 10% SF un 15% y 7%, respectivamente. Mientras que aumentó para 20% TRHA y 20% ChRHA un 43%, y 5% ChRHA con 29%. Se observó que 15% y 20% de TRHA y ChRHA presentaron un sangrado bastante notorio, mientras que, en las mezclas restantes, no se presentó o el sangrado fue muy leve. Por otra parte, el aire ocluido en las mezclas osciló entre 3.0% y 3.4%.

En estado endurecido se evaluó la resistencia a la compresión; a los 180 días de curado, con respecto a la muestra control y la mezcla de referencia, 15% de TRHA y ChRHA, presentaron valores muy similares, y una reducción del 16%, respectivamente; para 20% de TRHA y ChRHA disminuyó 14% y 21%, respectivamente; para 5% TRHA y ChRHA aumentó 5% y 11% con

respecto de la muestra control, y una similitud en el porcentaje con respecto a 10% SF; para 10% TRHA y 10% ChRHA aumentó con respecto a la muestra control 6% y 8%, para 10% TRHA disminuyó 4%, y 10% ChRHA aumentó un 2%, con respecto a 10% SF. Para los investigadores, los buenos resultados en 5% y 10% ChRHA se deben probablemente por el contenido de sílice, la finura de las cenizas, su fase amorfa, la alta área superficial específica y la reacción puzolánica entre hidróxido de calcio y sílice reactiva en ChRHA en un ambiente alcalino.

Se evaluó a los 28 días de curado, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión únicamente para la muestra control, 10% SF, 10% TRHA y 10% ChRHA, por haber mostrado los mejores resultados en la resistencia a la compresión. Con respecto a la muestra patrón, el módulo de elasticidad de 10% SF y 10% ChRHA aumentó 14% y para 10% TRHA un 4%. La resistencia a la flexión para 10% TRHA, 10% SF y 10% ChRHA aumentó 18%, 34% y 45%, respectivamente.

Se determinó a los 28 días de curado la absorción después de la inmersión, y el volumen de poros; a los 56 días la permeabilidad a cloruros y a los 75 días de curado la carbonatación mostrando valores inferiores para cada mezcla respecto la muestra control. 10% TRHA disminuyó en los aspectos mencionados 8%, 5%, 133%, y 25%; 10% ChRHA un 22%, 13%, 350% y 24%; y 10% SF un 19%, 10%, 350% y 8%.

Un trabajo de Solarte, Ospina, Aperador, & Mejía [37], sustituyó parcialmente OPC por RHA para la elaboración de concreto, y para comparar resultados se empleó SF. Se elaboraron nueve mezclas incluyendo la muestra control (100% OPC), 10% SF, y a las siete mezclas restantes se les adicionó RHA, dos de estas cenizas, RHA1 y RHA2, eran de tipo fina amorfa del 10% y 20%, respectivamente; RHA3 y RHA4 cenizas finas cristalinas del 10% y 20%; RHA5 ceniza gruesa amorfa del 10%; RHA6 y RHA7 ceniza gruesa cristalina del 10% y 20%.

Se determinó la resistencia a la compresión, a los 28 días de curado las mezclas 10% SF, RHA1, RHA2, RHA3, y RHA4 presentaron un aumento del 9%, 9%, 18%, 17%, y 8% respectivamente; mientras que en RHA5, RHA6 y RHA7 una reducción del 11%, 21%, y 33%.

Se evaluó la porosidad a los 28 días de curado, para RHA1 y RHA6 se presentó un aumento del 4% y 0.2%, mientras que en 10% SF, RHA2, RHA3, RHA4, y RHA5 disminuyó 4%, 3%, 6%, 8%, y 5%, respectivamente. RHA7 presentó el mismo porcentaje de poros que la muestra patrón. Se realizó el ensayo de permeabilidad del ion cloruro a los 28 días de curado; con respecto a la muestra control, 10% SF, RHA1, RHA2, RHA3, RHA4, y RHA5 presentaron baja permeabilidad y reducción de carga del 34%, 11%, 38%, 41%, 43%, y 37%, respectivamente; RHA6 presentó una permeabilidad moderada e incrementó la carga 4%.

Una publicación de Camargo & Higuera, 2017, reemplazó parcialmente cemento Holcim M1 por RHA para la producción de concreto hidráulico. Se elaboraron cuatro mezclas con 5%, 15% y 30% RHA, y una muestra control (100% OPC Holcim).

Se realizó el ensayo a la resistencia a la compresión, el de tracción indirecta y el de flexión a los 28 días de curado. En este orden de mención, con respecto a la muestra control, 15% RHA disminuyó 46%, 14% y 8%; y para 30% RHA un 69%, 43% y 41%, respectivamente. Mientras que para 5% RHA aumentó 1.5%, 0.6%, y 10%, respectivamente. Los investigadores atribuyen este buen comportamiento, probablemente porque RHA es un material puzolánico y altamente reactivo que al mezclarse con OPC afecta las reacciones químicas en la fase de hidratación generando un aumento en los silicatos de calcio importantes en las propiedades cementantes del concreto.

4.1.13 Ceniza de cascarilla de arroz, humo de sílice y metacaolín. Un estudio de Salas, Torres, Gutiérrez, & Delvasto, 2013, sustituyó parcialmente OPC por metacaolín (MK, por sus siglas en inglés) y RHA tipo TRHA y ChRHA. Se realizaron once mezclas de concretos con 10%, 15%, y 20% MK; 10%, 15%, y 20% TRHA; 10%, 15%, y 20% ChRHA; la muestra control (100% OPC) y 10% SF.

Se evaluó la resistencia a la compresión; a medida que el tiempo de curado (28, 56 y 90 días) y las adiciones iban aumentando, la resistencia incrementaba, a excepción de 20% MK que disminuyó 2.2% del 28 al 90 día. A los 28 días, 10% MK presentó el mayor incremento con 3%; los autores sugieren que esto fue porque MK adquirió mayor fuerza en los primeros tiempos de hidratación. A los 90 días con respecto a 10% SF; 10% MK presentó una reducción del 6%, y 10% ChRHA un incremento del 4%. Los investigadores creen que ChRHA presentó el mayor aumento por poseer una mayor área superficial comparada con el resto. Debido a que las adiciones con 10% presentaron los mejores resultados en la resistencia a la compresión, se emplearon únicamente estas mezclas para evaluar durabilidad, la muestra control y 20% MK.

La absorción total y el volumen de poros disminuyeron con respecto a la muestra control; para 20% MK un 46% y 53%, respectivamente; 10% SF un 35% y 67%; 10% ChRHA un 38% y 35%; 10% TRHA un 32% y 30%; y 10% MK con 7% y 6%. Los autores sugieren, que estos buenos resultados se deben porque las puzolanas al haberse incorporado al concreto producen un refinamiento en la estructura de los poros ocasionando mayor densidad y compactación.

En cuanto a la carbonatación, con respecto a la muestra patrón, se produjo un incremento para 10% SF y 10% MK del 9% y 50%, respectivamente. Mientras que para 10% TRHA y 10% ChRHA disminuyó 73% y 74%, respectivamente. 10% MK presentó los mejores resultados, probablemente

porque al agregar MK se formó la sal de Friedel en mayor proporción por la contribución de la alúmina presente para esa afición.

Una investigación de Villaquirán, Rodríguez, & Mejía, 2014, elaboró un material geopolimérico basado en MK, utilizando como activador alcalino una mezcla de hidróxido de potasio con diferentes fuentes de sílice: un silicato comercial de tipo potásico (SP), RHA o SF. Se ajustó las proporciones de MK y activador en la mezcla para obtener relaciones molares de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 2.5 y $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.28. Se realizaron tres mezclas, una con 100% SP (SP100), otra con sustitución de 50% SP por RHA (RHA50) y una con sustitución de 50% SP por SF (SF50).

Se evaluó la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, luego de haber expuesto las mezclas a temperaturas de 25°C, 300°C, 600°C y 1200°C. A los 25°C, la resistencia de SP100 fue de 32 MPa, CCA50 de 30 MPa y SF50 de 36 MPa. Al ir incrementando la temperatura, la resistencia para las mezclas fue disminuyendo, de pasar a 25°C a 1200°C, SP100 tuvo una reducción del 75%, CCA50 del 53%, y SF50 del 67%.

Se determinó la contracción/expansión, al incrementar la temperatura (300°C, 600°C Y 1200°C), el porcentaje de contracción volumétrica aumentaba en las mezclas. A los 300°C las mezclas presentaron un porcentaje de contracción volumétrica entre 7% y 8% y a 1200°C entre 45% y 48%. Los investigadores atribuyen estos resultados probablemente a un aumento en la energía superficial del gel, debido a la liberación del agua de la superficie y de los poros pequeños, la cual hace que la red de gel porosa colapse parcialmente. Los autores sugieren que el incremento resistente en temperaturas de 1.200 °C en todas las mezclas es atribuido a la formación de los nuevos componentes cristalinos estables a esta temperatura, tales como leucita y kalsilita.

4.1.14 Pigmento azul de ultramar. Un trabajo de Giraldo, Mendoza, Tobón, Restrepo, & Restrepo, 2010, empleó pigmento azul ultramar (AU, por sus siglas en inglés) como sustitución parcial en morteros de OPC blanco en porcentajes en peso del 0% (muestra patrón), 10%, 20%.

Se tomaron micrografías mediante SEM a los 3 días de curado y se observó que al aumentar el porcentaje de AU aumentó la tobermorita, portlandita y la etringita, ésta última se presentó en forma de agujas no orientadas, haciendo un efecto puente o de costura entre las otras fases minerales.

Se evaluó la resistencia a flexión, se presentó un incremento a los 28 días de curado con respecto a la muestra control del 68% y 94% para 10% y 20% AU. Los autores afirman que esto se debe a la forma de agujas no orientadas que tiene la etringita.

La resistencia a la compresión aumentó con respecto a la muestra control para todas las edades de curado a medida que se incrementaban los porcentajes de AU. A los 150 días de curado, 10% AU aumentó 9%, y 20% AU un 44%. A partir del difractograma de AU, se observó que tiene estructura cristalina lo que hace que sea una puzolana no convencional, por lo que este comportamiento en la resistencia se debe a que la reactividad de AU está en función de su área específica.

Mediante el ensayo de succión capilar a los 28 días de curado, al aumentar la adición de AU disminuyó la cantidad de agua absorbida; para 10% y 20% AU fue de 73% y 81%, respecto de la muestra control. Los autores señalan que en los espacios entre agujas de etringita se forma tobermorita, otorgando mayor densidad a la estructura interna del OPC, haciendo más pequeños los poros de la estructura interna y aumentando su durabilidad.

Una investigación de Restrepo, Restrepo, & Tobón, 2009, reemplazó parcialmente OPC Tipo I por AU en la fabricación de concreto. Se crearon cinco mezclas con porcentajes del 5%, 10%, 15%, 20% de AU y una mezcla control (100% OPC).

Se determinó la resistencia a la compresión a los 90 días de curado, 5%, 15% y 20% AU presentaron un incremento del 30%, 34%, 45% con respecto a la muestra patrón, mientras que 10% AU disminuyó 23%. Los investigadores sugieren, que el aumento de la resistencia en 20% AU, se debe a la formación de etringita primaria en la matriz del concreto, que aumenta al adicionar AU, y es producida por la reacción química entre el contenido de azufre en AU con el aluminato tricálcico (C3A) presente en el OPC blanco, en presencia de agua.

4.1.15 Catalizador de craqueo catalítico. Una investigación realizada por Caicedo, Mejía, Gordillo, & Torres, 2015 utilizó dos tipos de residuo de catalizador gastado (FCC, por sus siglas en inglés), FCC1 y FCC2 variando solo en su morfología, y OPC Tipo I en la fabricación de morteros, donde se fijó un parámetro de w/ cm y FCC de 1:27:5 para obtener una fluidez entre 105 y 110. Se realizaron ocho mezclas incluida la muestra control (100% OPC), las demás mezclas sustituyeron OPC parcialmente con FCC1 del 33%, y 40%; y FCC2 del 33%, 40%, 45%, 50%; 53%, y 60 %.

Se realizó el ensayo para determinar la resistencia a la compresión en morteros. A los 28 días de curado, 40% FCC1, 30 % FCC2, y 33% FCC1 presentaron aumentó del 12%, 20%, y 27% con respecto a la muestra control. Mientras que en 45% FCC2, 50% FCC2, 53% FCC2, y 60 % FCC2 disminuyó 20%, 30%, 53%, y 73%, respectivamente. Según los investigadores la mejora en la resistencia para las mezclas hasta con adición del 33% FCC, se debe probablemente a que el OPC utilizado, presentó una adición de tipo calcárea, lo que reducía la disponibilidad de hidróxido de

calcio en las mezclas, llevando a que el FCC presente pudiese actuar como puzolana. Por otra parte, la desaparición de picos de los productos de hidratación como la porlandita (CH) para la mezcla con 33% de FCC1, indica que un porcentaje superior al 33 % actuaría parcialmente como relleno en la mezcla, lo cual corroboraría la reducción en resistencias mecánicas.

4.1.16 Catalizador de craqueo catalítico, humo de sílice y metacaolín. Un estudio de Torres, Izquierdo, Torres, & Mejía, 2014, sustituyó parcialmente OPC Tipo I por FCC con adiciones del 10%, 20% y 30% FCC para la fabricación de concretos. También se elaboró mezclas de referencia: 10% SF 20% MK, y la mezcla control (100% OPC). Las mezclas manejaron una relación constante agua/aglutinante (w/b) de 0.5.

Se realizó el ensayo a la compresión, a los 180 días de curado, 10% SF; 20% MK; y 10% FCC presentaron un incremento del 13%; 15%; y 6% respecto de la muestra control; mientras que 20% y 30% FCC tuvieron una reducción del 13%; y 11%.

Se determinó la absorción, porosidad, permeabilidad, y corrosión a los 180 días de curado. A medida que el tiempo iba avanzando estos factores disminuían. La absorción de agua, para 10% SF; 20% MK; 20% y 30% FCC, aumentó 25%; 13%; 13%; y 63% con respecto de la muestra control, sin embargo, para 10% FCC disminuyó 12.5%. El volumen de permeabilidad de poros, para mezclas 20% MK; 20% FCC; y 30% FCC presentó un incremento del 33%; 13%; y 73% con respecto de la muestra control, mientras que 10% SF y 10% FCC disminuyó 7% y 27%. El índice de reducción de la carga total eléctrica (TEC) para 20% MK, 10%, 20% y 30% FCC aumentó 21%, 114%, 86%, y 107%, con respecto a 10% SF. De acuerdo con los investigadores, estas mejoras se deben probablemente al refinamiento de la red de matriz de poros que resulta de la reacción de adición puzolánica.

Por otra parte, a los 180 días de curado tras haber expuesto todas las mezclas durante nueve semanas a CO₂ dentro de una cámara después de la aplicación de fenolftaleína, la resistencia a la carbonatación para 10% SF, 20% MK, 10% FCC, 20% FCC, y 30% FCC, aumentó 67%, 1066%, 389%, 1488%, y 1922% con respecto a la muestra control.

Un trabajo de Izquierdo, Rodríguez, & Mejía, 2015, reemplazó parcialmente OPC por FCC en morteros, y comparó con mezclas con SF y MK. Se realizaron cinco mezclas, 10% FCC, 20% FCC, la muestra control (100% OPC), 10% MK y 10% SF.

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de curado; con respecto a la muestra control, para 10% FCC, 20% FCC, y 10% MK aumentó 17%, 7%, y 11% respectivamente; sin embargo, a los 60 días el incremento de estas mezclas fue del 4%. A los 28 y 60 días para 10% SF disminuyó 8% y 18%, respectivamente. Los investigadores atribuyen el incremento de la resistencia en los morteros con FCC posiblemente a la elevada reactividad con el Ca(OH)₂ liberado durante la hidratación del OPC y posterior formación de productos tipo silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), silicoaluminatos cálcicos hidratados (C-A-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H). No obstante, el grado de sustitución de OPC por FCC no tiene una relación directa con el desempeño mecánico. Por otro lado, los autores sugieren que la reducción en la resistencia con morteros adicionados con SF, se debe a que presenta aglomerados de partículas en algunos casos superiores a 100 μm, los cuales al estar embebidos en la pasta de OPC hidratada, conducen a una disminución de su eficacia y bajos incrementos de resistencia.

El índice de actividad puzolánica para 10% FCC es de 1.17, para 20% FCC de 1.07, para 10% MK de 1.11; y para 10% SF de 0.92. Los índices de actividad puzolánica de los morteros adicionados con FCC y MK superan más de un 75% las especificaciones, confirmando el carácter

puzolánico de estas adiciones. Mientras que para SF se necesita un índice de actividad del orden de 105% a edad de 7 días de curado, lo cual no cumple la adición utilizada.

Se expuso los morteros a un ácido clorhídrico (HCl), acético (CH_3COOH) y sulfúrico H_2SO_4 a una concentración de 0.1M; el pH fue de 1.0, 2.9 y <1.0 respectivamente. Los especímenes fueron inmersos por un periodo de 180 días en cada una de las soluciones. Con respecto a la muestra control, a los 90 días de inmersión en HCl, las mezclas 10% FCC, 20% FCC, 10% MK y 10% SF presentaron una pérdida de peso con un incremento del 1%, 1%, 4%, 17% y 13%, respectivamente. Las mezclas 10% FCC, 10% SF inmersas en H_2SO_4 disminuyeron 33% y 13%; mientras que 20% FCC y 10% MK aumentaron 408% y 233%. Las mezclas 10% FCC, 10% MK y 10% SF inmersas en CH_3COOH presentaron un incremento del 28%, 92% y 80%, respectivamente, y 20% FCC disminuyó 20%. Los investigadores sugieren que la disminución en la masa de los morteros se atribuye a la solubilización de algunos productos de hidratación y el posterior incremento en la porosidad.

Después de la inmersión de los morteros en los medios ácidos, se calculó el índice de resistencia a la compresión a los 90 días de curado. Las mezclas 10% FCC, 10% SF, 20% FCC y 10% MK inmersas con CH_3COOH presentaron con respecto la muestra control, un incremento del 14.3%, 40%, 54.8% y 66.7% respectivamente; 10% SF y 10% MK inmersas con HCL aumentaron en 1.7% y 3.4% respectivamente, mientras 10% FCC y 20% FCC presentaron una reducción de 22.4% y 1.7%. La mezcla 20% FCC inmersa con H_2SO_4 evidenció con respecto la muestra control, un incremento del 2.4%, mientras que 10% SF, 10% MK y 10% FCC tuvieron una disminución de 6%, 8.4% y 9.6% respectivamente.

Un trabajo de Torres, Torres, & Mejía, 2017, evaluó los concretos adicionados con FCC. Se realizaron cinco mezclas, con 10%, 20%, y 30% FCC, una mezcla control (100% OPC) y 20% MK.

Se realizó el ensayo de absorción y porosidad, el porcentaje de absorción y porosidad se redujo de los 28 a los 180 días para la muestra control un 2.6% y 5.8% respectivamente; para 20% MK fue de 1.3% y 3.1%; 10% FCC de 2.3% y 5.2%; 20% FCC de 2.7% y 5.6%; 30% FCC de 2.6% y 5.3%. La mezcla 10% FCC presentó los mejores resultados, los autores atribuyen esto posiblemente al efecto de llenado y la acción puzolánica, lo que creó una microestructura más densa con menos volumen capilar de poro, reduciendo la permeabilidad. Adicionalmente, se midió k a los 28 días de curado, 20% MK y 10% FCC mostraron una disminución con respecto a la muestra control del 28% y 11%, mientras que para 20% FCC y 30% FCC aumentó 42% y 144%, respectivamente. Los investigadores sugieren que la disminución de k en 20% MK y 10% FCC, se debe a una mayor densidad de los materiales, que permite la obstrucción de poros capilares, además de la alta reactividad por la actividad puzolánica que contribuye al refinamiento de poros capilares del concreto.

4.1.17 Metacaolín y humo de sílice. Una investigación de Torres, Mejía, & Delvasto, 2011, reemplazó parcialmente OPC por MK y SF, con adiciones del 10%, 20% y 30% MK; 10% SF para la elaboración de concretos y una mezcla patrón (100% OPC). Se evaluó la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, y con respecto la muestra control, 10% MK, 20% MK, 10% SF aumentó 5%, 21%, 35%, y disminuyó 26% para 30% MK.

Se realizó el ensayo de absorción y porosidad total a los 28 días de curado. La absorción total y el volumen de poros permeables con respecto a la muestra patrón disminuyeron 8% y 6%, 46%

y 47%, 29% y 33%, para 10% MK, 20% MK, y 30% MK, mientras que para 10% SF aumentaron 32% y 25%. Se llevó a cabo el ensayo de succión capilar únicamente para 20% MK; 10% SF y la muestra patrón. Con respecto a la muestra control, m para 10% SF y 20% MK incrementó 24% y 128%, mientras que k disminuyó 32% y 83%. De acuerdo con los autores, probablemente esto sea un indicativo del refinamiento de poros especialmente por parte de la adición de MK debido a que el hidróxido de calcio producido en la reacción de hidratación del OPC reacciona con la puzolana y produce geles adicionales, que provocan un efecto de micro relleno y, por lo tanto, alteran la estructura porosa. Adicionalmente se hizo el ensayo de permeabilidad a cloruros. La carga en 10% SF; 10% MK; y 20% MK presentó una disminución del 37%; 63%; y 74% con respecto a la mezcla control, SF presentó una permeabilidad baja y MK muy baja. Según los investigadores MK mostró un mejor comportamiento al ataque de cloruros quizás por el refinamiento de la red de poros de la matriz, y por la formación de la sal de Friedel, causada por la presencia de la alúmina reactiva del MK.

Un estudio de R. Mejía, Rodríguez, Rodríguez, Torres, & Delvasto, 2009, sustituyó OPC parcialmente por MK y SF para la fabricación de concretos. Se elaboró una mezcla con 10% SF; y dos mezclas con 10% MK, la primera de éstas procedía de un caolín con un 97% de caolinita (MK3) y la segunda de un caolín con un 48% de caolinita y 48% de cuarzo (MK5), ambos tipos de MK se produjeron a través de un tratamiento térmico a 700°C.

Se determinó la resistencia a la compresión, para todas las mezclas aumentó al irse prolongando el tiempo de curado (28, 90 y 180). A los 180 días, para MK3, MK5, y 10% SF se incrementó 17%, 19%, y 29% con respecto a la muestra patrón.

Se evaluó el ensayo de absorción de agua y porosidad total. A medida que el tiempo iba avanzando (28, 90 y 360 días de curado) estos factores disminuían. Con respecto a la muestra control, todas las mezclas desde los 90 días presentaron una absorción total inferior al 1% y un volumen de poros permeables inferior al 4.6%. También se realizó el ensayo de absorción capilar a los 180 días de curado, k para MK3; MK5 y 10% SF, disminuyó 45%; 49%; y 39% con respecto de la muestra patrón; y m aumentó 138%; 54%; y 108% respectivamente.

Por otra parte, a los 240 días de curado tras haber expuesto todas las mezclas durante 6.5 semanas a CO_2 dentro de una cámara después de la aplicación de fenolftaleína, el coeficiente de carbonatación para MK3; MK5; y 10% SF disminuyó 40%; 20%; y 39% con respecto a la muestra control. Las mezclas con MK al igual que la mezcla control tras la carbonatación tuvieron un incremento en la resistencia a la compresión del 31% y 35%, mientras que 10% SF presentó una reducción del 5%. Para los autores estos incrementos en la resistencia quizás se deben a una colmatación de poros superficial y en consecuencia a una mayor compacidad del espécimen.

A los 90 días de curado se realizó el ensayo de permeabilidad rápida de cloruros. Las mezclas MK3; MK5; y 10% SF presentaron una reducción de la carga eléctrica del 38%; 50%; y 81% con respecto a la muestra control. Los investigadores atribuyen estos buenos resultados en la prevención del ingreso de iones cloruros al concreto probablemente a la modificación microestructural de la pasta de OPC hidratada como consecuencia de la reacción puzolánica, donde el tamaño de partícula de la adición y su reactividad son factores importantes en su desempeño. Adicionalmente, en las adiciones con MK otros factores que pudieron contribuir a estos resultados son el alto contenido de alúmina amorfa y la capacidad de enlazar los iones cloruro para la formación de la sal de Friedel.

Un estudio de Aguirre, Mejía, & Montês, 2016, sustituyó parcialmente OPC por MK y SF. Se realizaron tres muestras: muestra control (100% OPC), 10% MK y 10% SF, todas con w/cm de 0.55.

Cada muestra contenía una varilla interna de acero de refuerzo y después de 28 días de curado se efectuó el ensayo potencial de circuito abierto (OCP, por sus siglas en inglés) en una celda electroquímica en la que el acero de refuerzo era el ánodo y un electrodo de acero inoxidable era el cátodo, sumergidos en una solución al 3.5% de NaCl y con una fuente externa de 5V. Este ensayo determinó el tiempo necesario para que el cloruro penetrara el acero de refuerzo y se oxidara degenerativamente (corrosión). Las muestras fueron sumergidas en un ambiente de agua potable, carbonatación acelerada, es decir en un ambiente rico en CO₂ y un ambiente mixto rico en NaCl y CO₂, para determinar el tiempo en el que el material era afectado por sus condiciones externas de medio ambiente y/o su corrosión.

Las mezclas ensayadas en agua potable se muestran en la Figura 7. Inicialmente se encontraron en un estado pasivo de 0 a 100 días; luego entre los 100 y 360 días se evidenció en un estado de incertidumbre; y a los 360 días la probabilidad de corrosión fue alta para las muestras 10% MK y 100% OPC, mientras que la muestra con 10%SF se mantuvo en estado de incertidumbre.

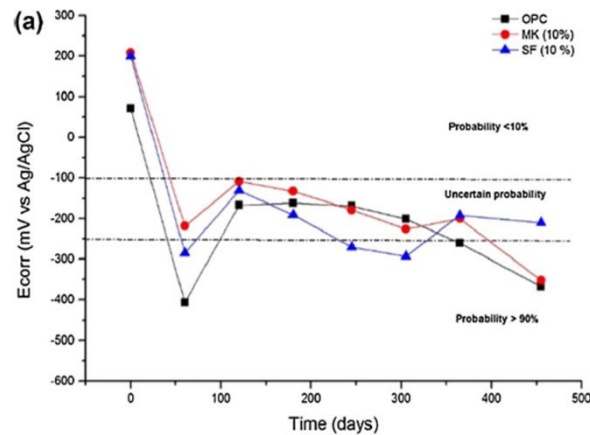


Figura 7. Corrosión en agua potable. Aguirre, Mejía & Montês, 2016.

En las muestras expuestas a carbonatación acelerada (Figura 8) el periodo de tiempo en el que la probabilidad de corrosión fue menor al 10%, iba desde el día 1 hasta el 250, después del día 250, las muestras se encontraron en una zona de incertidumbre, para los autores esto pudo ser por causa de la disminución de la porosidad en las muestras ensayadas, ya que los poros de los hormigones se precipitaron con el carbonato de calcio producidos en la carbonatación.

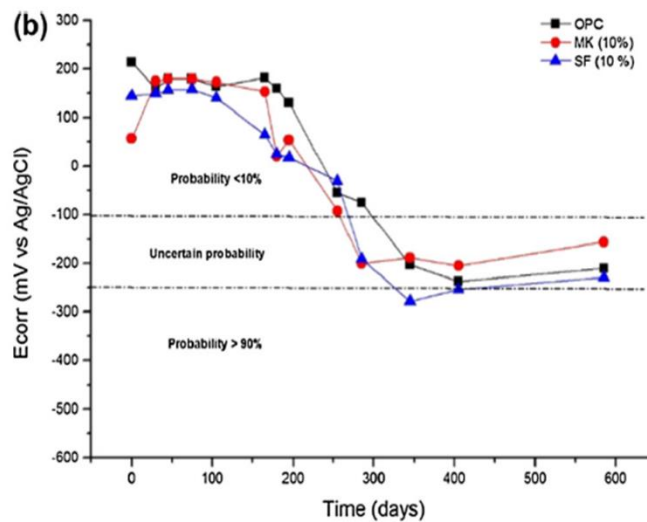


Figura 8. Corrosión en carbonatación acelerada. Fuente: Aguirre, Mejía & Montês, 2016.

Los resultados de las mezclas testeadas a partir del ensayo de OCP se observan en la Figura 9. Las muestras se ubicaron en el rango en el que la probabilidad de corrosión fue 90%, lo que indicó que la corrosión fue activa en esta etapa (ciclo 1 a 6), a partir del ciclo 7, las mezclas 10% MK y 10% SF presentaron mayores valores potenciales positivos en comparación con 100% OPC. Se observó algunas fluctuaciones en 10% SF, los investigadores creen que pudo ser por posibles problemas con la prueba.

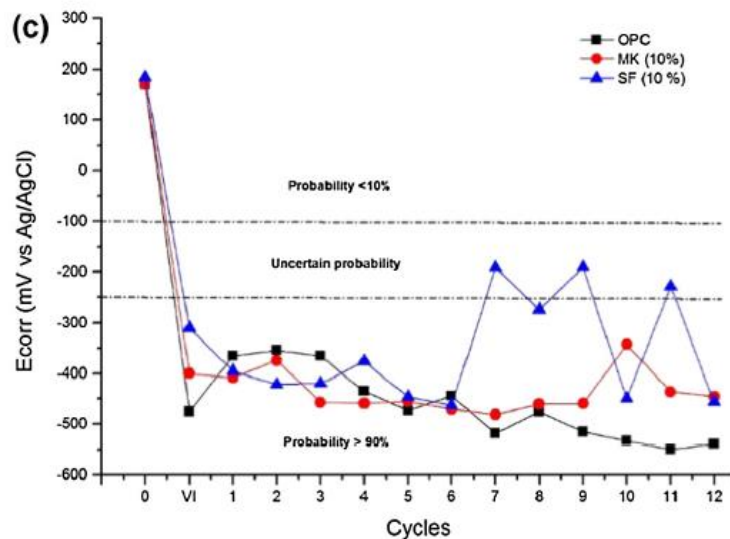


Figura 9. Corrosión en cloruros acelerados OCP. Fuente: Aguirre, Mejía & Montês , 2016.

El ambiente mixto se evidencia en la Figura 10. La mezcla 100% OPC estuvo en un estado pasivo al inicio de la exposición, y luego junto con las demás muestras los valores disminuyeron a la región de incertidumbre. A partir del ciclo 2, todas las muestras se observaron en la región en el que la probabilidad de corrosión fue mayor a 90%, lo que indicó una aceleración de la corrosión después de la exposición a los cloruros.

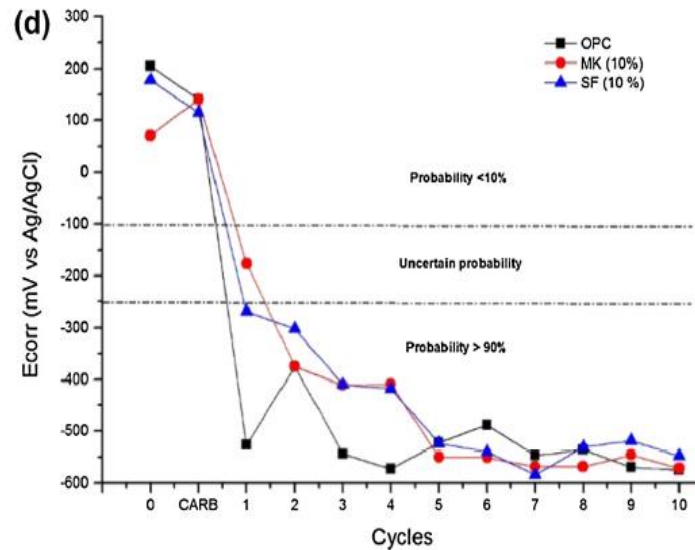


Figura 10. Corrosión en ambiente mixto. Fuente: Aguirre, Mejía & Montês , 2016.

Los resultados de las mediciones de OCP, mostraron la muestra control expuesta a carbonatación mostró un mejor rendimiento en la corrosión que 10% MK y 10% SF. En ambientes agresivos, tales como ambientes con cloruros, los aditivos puzolánicos mostraron un mejor comportamiento de la corrosión y 10% MK mostró el mejor rendimiento. Por otra parte, 10% SF mostró el mejor comportamiento de la corrosión en el ambiente combinado con carbonatación y cloruros.

4.1.18 Escoria de alto horno. Un trabajo de Santamaría, Yamín, & Arcila, 2006, ensayó concretos con adición de GGBFS en reemplazo por parte del OPC Tipo III. Se realizó 3 mezclas incluida la muestra patrón (100% OPC), 26% y 40% GGBFS.

Se realizó el ensayo de permeabilidad rápida de cloruros empleando 60 V en la fuente a los 90 días de curado. La carga para 26% GGBFS y 40% GGBFS se redujo un 39% y 54% con respecto a la muestra control, lo que correspondió a una permeabilidad alta y moderada, respectivamente.

Se evaluó la carga total y la resistencia a la compresión para cada mezcla a los 28 y 56 días de curado, a los 7 y 14 días de saturación. Se observó que hay una reducción de la carga que atraviesa las muestras con un aumento en la resistencia a la compresión. Con respecto a la muestra control, la resistencia para 26% y 40% GGBFS incrementó 10% y 27%, mientras que la carga total se redujo 45% y 59%, respectivamente. Los investigadores, atribuyen esto a que posiblemente GGBFS reaccionó con el hidróxido de cálcico proveniente de la hidratación del OPC, lo que permitió modificar la estructura porosa del concreto de manera progresiva a medida que aumentaba su edad, y por tanto reducía el paso de los iones de cloruro.

4.1.19 Microsílice. Un estudio de Lizarazo & Yépez, 2012, reemplazó OPC parcialmente por SF, con adiciones del 5%, 10% y 15% y una muestra control (100% OPC) para la elaboración de concretos.

Se determinó la resistencia a la compresión a los 90 días de curado, para 5%, 10% y 15% SF aumentó 16%, 20% y 16% con respecto a la muestra control; y al evaluar la resistividad eléctrica a los 240 días, el incremento fue del 125%, 275%, y 700%.

A los 120 días de curado, se realizó la prueba rápida de penetración de cloruros, con respecto a la muestra control, la carga pasada para 5% SF, 10% SF, y 15% SF disminuyó 75%, 92%, y 96%; y para k se redujo 16%, 28%, y 44%. Para los investigadores, estos resultados se deben a la alta tortuosidad y refinamiento de la estructura de poros por parte de SF.

4.1.20 Nanotubos de carbono y nanosílice. Un trabajo de Mendoza, Sierra, & Tobón, 2016, estudió la adición de nanosílice (NS, por sus siglas en inglés) y nanotubos de carbono de pared

múltiple (MWCNT, por sus siglas en inglés) en morteros de OPC. Se elaboraron mezclas con adición del 7.3% NS; 0.0115% MWCNT, y la muestra patrón (100% OPC).

Se evaluó la resistencia a la compresión y a la flexión a los 28 días de curado mediante estudios estadísticos empleando ANOVA. Con respecto a la muestra control, para 7.3% NS aumentó 11%, y en 0.0115% MWCNT disminuyó 3%. La resistencia a la flexión de 7.3% NS y 0.0115% MWCNT disminuyó 7% y 11%. Los investigadores atribuyen la disminución en las resistencias por parte de MWCNT probablemente a una falta de afinidad química con los productos de hidratación del OPC.

4.2 Mezclas ternarias.

A continuación, se procede a presentar las investigaciones de mezclas ternarias, las cuales se componen por cemento portland + (otro material o cementante o puzolánico) + (otro material o cementante o puzolánico), (Suárez, 2010)

4.2.1 Ceniza volante y escoria de alto horno. Un estudio de Gutiérrez, Pineda & Vera, 2015, adicionó FA y GGBFS como reemplazo de OPC. Se evaluó una muestra control (100% pasta de OPC), y una con 70% OPC/20% GGBFS/10% FA, la cual presentó la más baja intensidad y velocidad en las reacciones de hidratación, con un fraguado inicial de 4.7 horas y el final de 10.7 horas. Los autores señalan que probablemente esto ocurrió, porque la mezcla tenía el más bajo calor de hidratación, conllevando a un menor riesgo de fisuramiento por contracción.

En estado endurecido, las mezclas presentaron una disminución en la resistencia a la compresión con respecto de la muestra control tanto en morteros como en concretos para todas las edades de curado. En morteros, la mezcla ternaria disminuyó 22%; y en concretos, un 50%. Esta

reducción para los autores, pudo ser por la inferior reactividad del OPC en combinación con las adiciones.

Para la evaluación de la corrosión de las mezclas se realizaron curvas de polarización potenciodinámicas, bajo el método de resistencia lineal de la polarización. En las curvas (Figura 4) se evidenció zonas pasivas ante la corrosión cuando la corriente no variaba con respecto al potencial, mientras que cuando se presentaban pendientes bajas o intermedias la pasivación no ocurría y las probetas se corroían. Para la primera curva se observó pasivación para el caso de la mezcla control, por otra parte, la mezcla ternaria presentó una pendiente intermedia en las reacciones anódicas.

Para la segunda curva (Figura 5) realizada las probetas fueron sometidas a carbonatación acelerada en una atmósfera artificial, donde todas las muestras tuvieron mayor velocidad de corrosión con respecto a la muestra control, la muestra ternaria presentó mayor velocidad de corrosión con 0.021 mm/año y un potencial de -300mV, debido a la carbonatación acelerada.

Se evaluó visualmente a los 118 días las probetas hechas para todas las mezclas, en condiciones normales no se encontró corrosión a simple vista, pero en ambiente con carbonatación acelerada, la mezcla ternaria mostró corrosión generalizada en toda la zona expuesta, presentando un comportamiento desfavorable ante la carbonatación.

Una investigación de Pulido, Lizarazo, & Chaparro, 2016 sustituyó parcialmente OPC por FA y GGBFS. Se realizaron cuatro mezclas con 10% FA/10% GGBFS; 20% FA/20% GGBFS; 20% FA /40% GGBFS; y 40% FA /20% GGBFS.

Se determinó a los 90 días la resistencia a la compresión, la relación de Poisson, la resistencia a la tracción, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad, al aumentar de 10% a 20% la adición de FA y GGBFS, disminuyó 6%, 6%, 15%, 12%, y 9%, respectivamente. Al pasar de 20% FA/40% GGBFS a 40% FA/20% GGBFS, disminuyó 16%, 14%, 21%, y aumentó 5% y 2%, respectivamente. Los autores atribuyen que los resultados en la resistencia se deben a que la reacción puzolánica de FA es lenta, y GGBFS logra hidratarse más rápidamente con el tiempo, aportando mejoras. La adición de FA también puede retardar la hidratación del OPC, lo cual puede ser por los iones aluminatos o a la materia orgánica disuelta de la FA en la fase acuosa. En cuanto a los resultados del módulo de elasticidad y la relación de Poisson, los investigadores creen que se deban a la reducción en la porosidad que otorga FA a la matriz y por el efecto de relleno que proporciona al concreto aumentando la rigidez y disminuyendo la deformabilidad.

4.2.2 Ceniza volante y humo de sílice. Una investigación realizada por Correa, Rojas, & Tobón, 2018, utilizó SF y FA como sustitutos parciales de OPC. Se realizaron nueve mezclas de mortero incluida la muestra control (100% OPC). Las mezclas ternarias de OPC contenían 5% SF alternando porcentajes de 10%, 20% y 30% de FA; 10% SF combinando porcentajes de 10%, 20% y 30% de FA; 15% SF cambiando porcentajes de 10%, 20% y 30% de FA.

En estado fresco, el esfuerzo de fluencia con respecto a la muestra control para 5% SF/30% FA; 10% SF/20% FA; 10% SF/30% FA; 15% SF/30% FA presentó una disminución no superior al 12%. Para 5% SF/20% FA presentó un aumento del 16%. De acuerdo a los autores, cuando 10% FA estuvo constante y se fue incrementando el porcentaje de SF, se obtuvo un aumento del esfuerzo de fluencia, el cual pudo darse por la reactividad y la finura del material que aceleró la formación de flóculos. Por otra parte, cuando estuvo 15% SF sin variar y se fue aumentando el

porcentaje de FA, se presentó una disminución del esfuerzo de fluencia debido a la forma esférica de las partículas de FA que se depositan entre los flóculos en la formación de cemento y realizan un trabajo de plastificación que reduce dicho esfuerzo de fluencia. Otra de las propiedades estudiadas fue la viscosidad, calculada mediante el modelo de Bingham. Con respecto a la muestra control, hubo una disminución en las mezclas con 5% SF variando los porcentajes entre 10%, 20% y 30% FA, y la muestra de 10% SF/20% FA. Para los autores este comportamiento se debe a los fenómenos de laminación y lubricación de las pequeñas partículas y fenómenos de embalajes.

En estado endurecido, se evaluó la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, las mezclas ternarias presentaron una disminución con respecto la muestra control; sólo 10% SF/10% FA presentó un incremento del 0.6%. Se realizó el ensayo de V-Funnel para determinar la capacidad de autocompactación de las mezclas, y se evidenció que las mezclas presentaron valores más altos de tiempo de evacuación que con respecto a la muestra control; 5% SF/10% FA presentó un aumento del 72% con respecto a la muestra patrón.

4.2.3 Escoria de alto horno y piedra caliza. Una investigación de Díaz, Izquierdo, Mejía, & Gordillo, 2013, sustituyó parcialmente OPC empleando caliza (LS, por sus siglas en inglés) y GGBFS. Se elaboraron 4 mezclas con 85% OPC/ 5% LS/10% GGBFS; 75% OPC/5% LS/20% GGBFS; 75% OPC/10% LS/15% GGBFS; y la mezcla control (100% OPC).

Se evaluó la resistencia a la compresión a los 90 días de curado, con respecto a la muestra control, 85% OPC/5% LS/10% GGBFS aumentó 14%; 75% OPC/5% LS/20% GGBFS; y 75% OPC/10% LS/15% GGBFS, presentó un incremento del 39%. Para los investigadores, esta mejora se debe al tamaño de las partículas de LS, las cuales actúan como puntos de nucleación, produciendo el silicato cálcico hidratado (CSH) durante las reacciones de hidratación de la mezcla.

Por otra parte, GGBFS por su efecto químico, genera una mayor cantidad de productos de hidratación tales como el CSH, lo que se refleja en el refinamiento de los poros y en una estructura mucho más densa.

Se realizaron ensayos de absorción y permeabilidad a los 28 y 90 días de curado. A los 28 días se observó un mayor incremento de volumen de poros, para 85% OPC/5% LS/10% GGBFS fue del 4%; para 75% OPC/5% LS/20% GGBFS del 3%; y 75% OPC/10% LS/15% del 6%, con respecto de la muestra patrón. A los 90 días de curado los porcentajes de porosidad fueron aún más similares al de la muestra de referencia con porcentajes menores al 1%. Esto último, según los autores, probablemente se deba a la más lenta hidratación de GGBFS; se estimó que, a los 90 días de curado, GGBFS reaccionó en gran porcentaje formando gel de CSH, lo cual contribuyó al taponamiento de los poros permeables en los morteros. Por otra parte, el porcentaje de absorción a los 90 días con respecto a la muestra control disminuyó un 0.9% en 75% OPC/10% LS/15% GGBFS; mientras que para 85% OPC/5% LS/10% GGBFS; y 75% OPC/5% LS/20% GGBFS aumentó 0.4% y 1.6%, respectivamente.

Se hizo el ensayo de succión capilar a los 7 y 90 días de curado, a los 90 días k aumentó para 85% OPC/5% LS/10% GGBFS; 75% OPC/5% LS/20% GGBFS; y 75% OPC/10% LS/15% GGBFS un 90%, 80% y 110%. En las mezclas ternarias m no alcanzó la edad de saturación, impidiendo dicho cálculo. Los autores atribuyen este suceso, probablemente al taponamiento de poros capilares por parte de los productos de hidratación que se forman y a la incorporación de LS en pequeñas proporciones al OPC ternario, el cual actúa como relleno. A los 7 días de curado, m para 75% OPC/10% LS/15% GGBFS disminuyó 9% con respecto de la muestra de referencia;

para 85% OPC/5% LS/10% GGBFS; y 75% OPC/5% LS/20% GGBFS se produjo un aumento del 46% y 19%, respectivamente.

Se llevó a cabo el ensayo de permeabilidad a cloruros a los 7 y 90 días de curado. La resistividad eléctrica (ρ) a los 90 días aumentó 57%, 319%, y 317% para 85% OPC/5% LS/10% GGBFS; 75% OPC/5% LS/20% GGBFS; y 75% OPC/10% LS/15% GGBFS. A los 7 días de curado la permeabilidad con respecto la muestra control disminuyó 14%; 13%; y 27% para 85% OPC/5% LS/10% GGBFS; 75% OPC/5% LS/20% GGBFS; y 75% OPC/10% LS/15% GGBFS, respectivamente.

4.2.4 Nanotubos de carbono y nanosílice. Un trabajo de Mendoza, Sierra, & Tobón, 2016, estudió la adición de NS combinado con MWCNT, en morteros de OPC. Se realizó una muestra patrón (100% OPC) y otra con 0.0115% MWCNT /7.3% NS.

Se evaluó la resistencia a la compresión y a la flexión a los 1, 3, 7, y 28 días de curado mediante estudios estadísticos empleando ANOVA. Con respecto la muestra control, la resistencia a la compresión en la mezcla ternaria incrementó 11%, 12%, 34%, 11%, respectivamente para cada edad de curado; y para la resistencia a la flexión aumentó 9% y 2% al día 1 y 3, y al día 7 y 28 disminuyó 12% y 7%, respectivamente. Según los autores la combinación de nanopartículas en edades posteriores a los primeros días de curado tiende a perjudicar los resultados en las resistencias probablemente por el proceso de reaglomeración de MWCNT que inhibe la actividad puzolánica de NS y dificulta la reacción de hidratación del OPC a edades superiores a 24 horas de curado.

5. Conclusiones

Esta investigación expuso estudios de los últimos 20 años sobre materiales cementicios suplementarios de origen nacional con base a propiedades en estado fresco, estado endurecido y durabilidad.

- Pese a que existe una gran contaminación ambiental a nivel mundial, los investigadores reportados están contribuyendo en un panorama ambiental más positivo al estudiar materiales cementicios suplementarios, los cuales generan grandes beneficios ambientales al ser en su gran parte materiales residuos, que sirven de reemplazo como parte del cemento portland, o del Clinker y que a su vez otorgan mejoras en el desempeño de pastas, morteros y concretos.

- Los materiales cementicios suplementarios nacionales más estudiados con base en los artículos presentados del presente estudio son humo de sílice y ceniza volante, cada uno con 20%, metacaolín con 12%, y escoria de alto horno con 11%, y siendo los menos investigados, lodo calcáreo, ceniza volcánica y nanotubos de carbono, cada uno con 1.5%.

- Se evidenció como falencia que el 8% de los artículos no presentaron una muestra control para poder comparar el desempeño de las proporciones empleadas de los materiales cementicios alternativos, conduciendo a implicaciones en las argumentaciones respecto a la forma como una determinada proporción mejora o empobrece una determinada propiedad.

- En algunos artículos se mostró una falta de argumentación con respecto a la causa del comportamiento obtenido por parte de las adiciones.

- Algunos artículos que evaluaron propiedades en estado fresco variaron el superplastificante y la relación agua/material cementante para cada material suplementario empleado, lo que condujo a no realizar una comparación válida entre los especímenes, puesto que no se realizó un diseño de experimentación estadística.

-Algunos de los investigadores nombrados en el presente estudio no reportaron que tipo de procedimiento experimental emplearon al exponer los resultados de sus estudios, lo que genera vacíos al lector a la hora de comprender dichas publicaciones.

-La investigación presentada mostró que el 87% de los artículos expuestos pertenecían a mezclas binarias, mientras que un 13% a mezclas ternarias, lo que evidencia un atraso en estudios con dichas mezclas, por lo que se sugiere que futuros trabajos realicen adelantos en esta temática.

-Tan sólo el 24% de los artículos expuestos del presente estudio, reportaron concretos con una alta resistencia a la compresión (>50 MPa a los 28 días de curado), por lo que se sugiere indagar más para posibilitar la alta resistencia con el uso de materiales cementicios alternativos.

6. Recomendaciones

Para la continuidad de la investigación se sugiere que a nivel de posgrado se realice una ampliación de propiedades no expuestas en la revisión de materiales cementicios suplementarios nacionales, en el que se abarque la microestructura y composición química de éstos, ya que son temáticas densas y de mayor complejidad que requieren de una formación técnica y bases conceptuales teóricas en el área de materiales en ingeniería

Referencias Bibliográficas

- A. Aguirre, R. Mejía, and M. Montês, “Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 704–716, 2016.
- A. Salas, S. Delvasto, and R. Mejía, “Developing high-performance concrete incorporating highly-reactive rice husk ash,” *Ing. e Investig.*, vol. 33, no. 2, pp. 49–55, 2013.
- A. Salas, J. Torres, R. Mejía, and S. Delvasto, “Engineering properties of blended concrete with Colombian rice husk ash and metakaolin” vol. 235, no. 2, pp. 225–235, 2013.
- A. Enshassi, E. Rizq, and B. Kochendoerfer, “An evaluation of environmental impacts of construction projects,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 29, no. 3, pp. 234–254, 2014.
- C. Giraldo, O. Mendoza, J. Tobón, O. Restrepo, and J. Restrepo, “Durability of white portland cement blended with Ultramarine Blue pigment,” *DYNA*, vol. 77, no. 164, pp. 45–51, 2010.
- C. Valderrama, “Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados,” vol. 31, no. 1, pp. 39–46, 2011.
- D. Burgos, A. Guzmán, K. Hossain, and S. Delvasto, “The use of a volcanic material as filler in self-compacting concrete production for lower strength applications,” *Constr. Mater.*, vol. 67, no. 325, 2017.
- D. Vásquez, J. Mejía, and R. Mejía, “Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash,” *DYNA*, vol. 83, no. 195, pp. 216–223, 2016.

- E. Caicedo, R. Mejía, M. Gordillo, and J. Torres, “Reutilización de un residuo de la industria petrolera (FCC) en la producción de elementos constructivos,” *Ing. y Univ.*, vol. 19, no. 1, pp. 135–154, 2015.
- E. Gómez, D. Navas, G. Aponte, and L. Betancourt, “Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización,” *Dyna*, vol. 17, pp. 158–163, 2014.
- F. Soria, “Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción,” *Mater. Construcción*, vol. 33, no. 190–191, pp. 69–84, 1983.
- F. Soria, “Puzolanas y cementos puzolánicos,” *Mater. Construcción*, vol. 13, no. 111, pp. 47–59, 1963.
- H. Andrade, C. Arteaga, and M. Segura, “Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia),” *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 18, no. 1, pp. 103–112, 2017.
- I. C. de N. Técnicas, “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50mm o 2 pulgadas de lado.,” 2017.
- I. C. de N. Tecnicas, “Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto,” 2010.
- I. C. de N. Técnicas, “Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico,” 1991.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, “Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de vicat,” 2004.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, “Norma Técnica Colombiana NTC 111: Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico,” p. 10, 1997.

J. Cárdenas, J. Lizarazo, and W. Aperador, “Comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios (cemento Portland - Ceniza volante - Escoria de alto horno),” *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 36, no. 1, pp. 78–98, 2016.

J. Correa, N. Rojas, and J. Tobón, “Effect of fly ash and silica fume on rheology, compressive strength and self-compacting in cement mixtures,” *DYNA*, vol. 85, no. 206, pp. 59–68, 2018.

J. Lizarazo and C. Higuera, “Activación de las propiedades cementicias de la ceniza volante mediante electromutagénesis química,” vol. 35, no. 2, pp. 305–314, 2015.

J. Lizarazo and L. Yépez, “Effect of silica fume addition on the chloride-related transport properties of high-performance concrete,” *DYNA*, vol. 79, no. 171, pp. 105–110, 2012.

J. Mejía, E. Rodríguez, and R. Mejía, “Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros,” *Ing. y Univ.*, vol. 18, no. 2, pp. 309–327, 2014.

J. Pulido, J. Lizarazo, and W. Chaparro, “Comportamiento mecánico de sistemas cementantes ternarios (cemento portland - ceniza volante - escoria de alto horno),” vol. 36, no. 2, pp. 201–216, 2016. J. Díaz, S. Izquierdo, R. Mejía, and M. Gordillo S., “Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad,” *Rev. la Constr.*, vol. 12, no. 3, pp. 53–60, 2013.

- J. Restrepo, O. Restrepo, and J. Tobón, "Evaluation of white cement coloured with ultramarine blue pigment," *DYNA*, vol. 76, no. 157, pp. 225–231, 2009.
- J. Rivera, R. Mejía, J. Mejía, and M. Gordillo, "Hybrid cement based on the alkali activation of by-products of coal," *Rev. la Constr.*, vol. 13, no. 2, pp. 31–39, 2014.
- J. Tobón and R. Gómez, "Desempeño de cemento Portland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza," *Dyna*, vol. 75, no. 156, pp. 177–184, 2008.
- J. Tobón, O. Restrepo, and J. Payá, "Comparative analysis of performance of portland cement blended with nanosilica and silica fume," *DYNA*, vol. 77, no. 163, pp. 37–46, 2010.
- J. Torres, R. Mejía, and S. Delvasto, "Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado," *Ing. y Univ.*, vol. 15, no. 1, pp. 77–90, 2011.
- L. Gutiérrez, "El concreto y otros materiales para la construcción," 2003, pp. 1–29, 2003.
- L. Santaella and R. Salamanca, "Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (Termopaipa IV) y agua constante," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 14, no. 14, pp. 14–19, 2004.
- Labahn, O. (1985). *Prontuario del cemento*. Barcelona, España. Editores técnicos asociados, s.a.

M. Berry, D. Cross, and J. Stephens, "Changing the environment: An alternative 'green' concrete produced without Portland cement," *3rd World Coal Ash, WOCA Conf. - Proc.*, 2009.

M. Villaquirán, E. Rodríguez, and R. Mejía, "Evaluación térmica de sistemas geopoliméricos basados en metacaolín con incorporación de humo de sílice y ceniza de cascarilla de arroz," *Inf. Técnico*, vol. 78, no. 1, p. 6, 2014.

Moreno, J. (2018). Materiales cementantes suplementarios y sus efectos en el concreto. Blog ARGOS. Recuperado de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios>.

N. Camargo and C. Higuera, "Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 27, no. 1, pp. 91–109, 2017.

N. Santamaría, L. Yamín, and C. Arcila, "Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno," 2006.

N. Torres, J. Torres, and R. Mejía, "Propiedades de permeación de concretos adicionados con un residuo de la industria petroquímica," *Ing. e Investig.*, vol. 37, no. 3, pp. 23–29, 2017.

- N. Torres, S. Izquierdo, J. Torres, and R. Mejía, “Resistance of blended concrete containing an industrial petrochemical residue to chloride ion penetration and carbonation,” *Ing. e Investig.*, vol. 34, no. 1, pp. 11–16, 2014.
- O. Gutiérrez, Y. Pineda, and E. Vera, “Efecto de la incorporación de ceniza volante y escoria de horno alto en el comportamiento electroquímico de concretos de cemento comercial,” *Rev. Metal.*, vol. 51, no. 4, 2015.
- O. Mendoza, G. Sierra, and J. Tobón, “Propiedades mecánicas de morteros de cemento Portland adicionados con nanotubos de carbono y nanosilica: Estudio por diseño de experimentos,” *DYNA*, vol. 83, no. 198, pp. 136–141, 2016.
- R. Mejía, C. Rodríguez, E. Rodríguez, J. Torres, and S. Delvasto, “Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 48, pp. 55–64, 2009.
- R. Robayo, P. Matthey, Y. Silva, and S. Delvasto, “Obtención de un concreto autocompactante empleando adiciones de escoria de carbón finamente molida,” *Ing. y Desarrollo*, vol. 34, no. 1, pp. 24–43, 2016.
- R. Siddique and M. Khan, *Supplementary Cementing Materials*, vol. 37. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

- S. Izquierdo, E. Rodríguez, and R. Mejía, “Resistance to acid corrosion of blended cements mortars with spent fluid catalytic cracking (sFCC) catalyst,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 30, no. 3, pp. 169–176, 2015.
- S. Solarte, M. Ospina, W. Aperador, and R. Mejía, “Efecto del modo de obtención de la sílice amorfa a partir de la cascarilla de arroz en las propiedades de durabilidad del concreto armado,” 2007.
- S. Suárez, “Mezclas binarias y ternarias basadas en cenizas volantes. Influencia del activador sobre la formación de fases y resistencias mecánicas,” 2010.
- W. Valencia, D. Angulo and R. Mejía, “Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/ escoria: Sulfatos y ácidos,” *Inf. Técnico*, vol. 82, no. 1, p. 67, 2018.
- Y. Silva and S. Delvasto, “Concreto Autocompactante con Diferentes niveles de Ceniza Volante y Escoria de Combustión de Carbón,” *Rev. Colomb. Mater. N*, vol. 5, pp. 1–9, 2014.
- Y. Silva, D. Burgos, W. Valencia, S. Delvasto, and J. Alvarez, “Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera,” *Rev. la Constr.*, vol. 12, no. 2, pp. 166–176, 2013.

- Y. Silva, M. Gordillo, and S. Delvasto, "Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de morteros," *Inf. Técnico*, vol. 81, no. 1, p. 44, 2017.
- Y. Silva, M. Gordillo, and S. Delvasto, "Valorization and optimization of residue of masonry for the production of self-compacting concrete," *DYNA*, vol. 86, no. 208, pp. 307–315, 2019.
- Y. Silva, W. Valencia, and S. Delvasto, "Concreto autocompactante con altos contenidos de subproductos de la combustión de carbón," *Inf. Técnico*, vol. 82, no. 2, p. 147, 2018.