

**EFFECTOS DE LOS MATERIALES REACTIVOS EN LA MICROESTRUCTURA DEL
CONCRETO**



**Universidad
de Cartagena**

Fundada en 1827

**ESTUDIANTES
ESTEBAN HERNÁNDEZ SALAZAR
VALENTINA LONDOÑO OROZCO**

TRABAJO DE GRADO

**DIRECTOR
ING. RAMON TORRES ORTEGA**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

CARTAGENA

AGOSTO, 2022

**EFFECTOS DE LOS MATERIALES REACTIVOS EN LA MICROESTRUCTURA DEL
CONCRETO**

Autores:

ESTEBAN HERNÁNDEZ SALAZAR

VALENTINA LONDOÑO OROZCO

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIEROS CIVILES

Director:

ING. RAMON TORRES ORTEGA

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOTECNIA, MATERIALES, VÍAS Y TRANSITO
(GEOMAVIT)**

Línea de investigación:

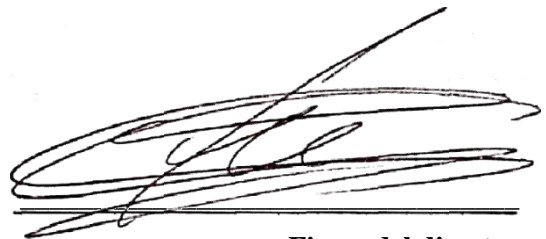
Materiales de construcción en obras civiles

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERA CIVIL
CARTAGENA**

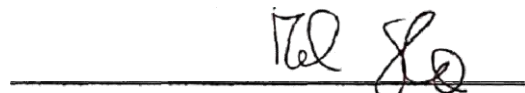
2021

**EFFECTOS DE LOS MATERIALES REACTIVOS EN LA MICROESTRUCTURA DEL
CONCRETO**

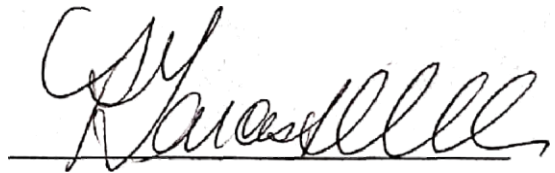
NOTA DE ACEPTACIÓN



**Firma del director
ING. RAMON TORRES ORTEGA**



**Firma del jurado
ING. MANUEL SABA**



**Firma del jurado
ING. PATRICIA GARCÉS DEL CASTILLO**

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS	6
RESUMEN	9
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
1 MARCO REFERENCIAL	15
1.1 ANTECEDENTES	15
1.1.1 Desarrollo del Concreto a lo Largo de la Historia	15
1.1.2 Sector de la Producción de Materiales de Construcción	16
2 MARCO TEÓRICO	18
2.1 EL CONCRETO COMO MATERIAL PRINCIPAL DE CONSTRUCCIÓN	18
2.1.1 Cemento: Material Reactivo Tradicional	18
2.2 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS	21
2.2.1 Suplementos Cementicios en la Industria	21
2.2.2 Orígenes de los Materiales Suplementarios Cementicios (SCMs)	22
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SCMs	23
2.3.1 Propiedades de los SCMs	23
2.3.2 Efecto de los SCMs	23
2.3.2.1 Efecto de los SCMs en la Microestructura y Reactividad	23
2.3.2.2 Efecto de los SCMs en la Trabajabilidad	25
2.3.2.3 Efecto de los SCMs en la Resistencia a la Compresión	26
2.3.2.4 Efecto de los SCMs en la Durabilidad	26
2.3.3 Metodología de Análisis de las Propiedades	27
2.3.4 Normativa Para el Uso de Micromateriales	27
2.4 MICROMATERIALES REACTIVOS	29
2.4.1 Microsílice Como SCMs	29
2.4.2 Cenizas Volantes Como SCM	31
2.4.3 Metacaolín Como SCM	34
2.4.4 Cenizas de Cáscara de Arroz Como SCM	35
2.4.5 Escorias Granuladas de Alto Horno Como SCM	37
2.5 ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS	39
2.5.1 Análisis de la Facilidad de Producción y/o Obtención de Micromateriales en el Territorio Colombiano	39
2.5.2 Comparación de Tamaño de Partículas, Áreas Superficiales y Composición Química	40
2.6 ESTUDIOS SOBRE MICROMATERIALES	42

2.6.1	Análisis de los Estudios.	79
3	CONCLUSIONES	101
4	BIBLIOGRAFÍA	104

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del cemento	19
Tabla 2. Requisitos químicos para el uso de microsílíce.	28
Tabla 3. Requisitos físicos para el uso de microsílíce.	28
Tabla 4. Requisitos físicos para el uso de cenizas volantes.	29
Tabla 5. Propiedades físicas de los micromateriales reactivos estudiados.	42
Tabla 6. Composición química de los materiales utilizados en el estudio de Sequeira Aragón (2021) 42	
Tabla 7. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Sequeira Aragón (2021)	43
Tabla 8. Resistencia a la compresión en el estudio de Sequeira Aragón (2021).....	43
Tabla 9. Resistencia a la compresión en el estudio de Sequeira Aragón (2021).....	44
Tabla 10. Resultados del estudio de Srinivasreddy et al. (2013).....	45
Tabla 11. Composición química de los materiales utilizados en el estudio de Valderrama et al. (2011)	46
Tabla 12. Resistencia a la compresión en el estudio de Valderrama et al., (2011)	47
Tabla 13. Permeabilidad de iones de cloruros en el estudio de Valderrama et al. (2011)	48
Tabla 14. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Cruz. E., 2021.....	49
Tabla 15. Resistencia a la compresión a los 28 días en el estudio de Cruz. E., 2021.....	49
Tabla 16. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Torres et al. (2011)	50
Tabla 17. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Torres et al. (2011)	50
Tabla 18. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Torres et al. (2011)	51
Tabla 19. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Torres et al. (2011)	52
Tabla 20. Composición química de los materiales usados en el estudio de Duan et al., 2013.....	53
Tabla 21. Resistencia a la compresión en el estudio de Duan et al., 2013.....	54
Tabla 22. Composición química de los materiales usados en el estudio de Güneyisi et al. (2012)	55
Tabla 23. Resistencia a la compresión en el estudio de Güneyisi et al. (2012).....	57
Tabla 24. Resistencia a la compresión en el estudio de Bhanja & Sengupta (2005).....	59
Tabla 25. Resistencia a la compresión en el estudio de Poon et al., (2006).....	60
Tabla 26. Composición química de los materiales usados en el estudio de Nagrockiene et al. (2019) 61	
Tabla 27. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Nagrockiene et al. (2019).....	62
Tabla 28. Composición química de los materiales usados en el estudio de Seleem et al. (2010).....	63
Tabla 29. Resistencia a la compresión en el estudio de Seleem et al. (2010).....	63
Tabla 30. Composición química de los materiales usados en el estudio de Narmatha et al. (2016)	64
Tabla 31. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Narmatha et al. (2016)	65
Tabla 32. Resistencia a la compresión en el estudio de Narmatha et al. (2016)	65
Tabla 33. Resistencia a la compresión en el estudio de John, N. (2013).....	66
Tabla 34. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio Dhinakaran et al., 2012.....	67
Tabla 35. Composición química de los materiales usados en el estudio de Chindaprasirt et al., 2008 70	
Tabla 36. Resistencia a la compresión en el estudio de Chindaprasirt et al., 2008	71
Tabla 37. Composición química de los materiales usados en el estudio de Madandoust et al., 2011 ..	72
Tabla 38. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio Madandoust et al, 2011.....	73

Tabla 39. Resistencia a la compresión en el estudio en el estudio Madandoust et al., 2011.	73
Tabla 40. Composición química de los materiales usados en el estudio de Ganesan et al., 2008.....	74
Tabla 41. Características de las mezclas de concreto en estado fresco y resistencia a la compresión en el estudio Ganesan et al., 2008.....	74
Tabla 42. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Ganesan et al., 2008.....	75
Tabla 43. Composición química de los materiales usados en el estudio de Nath & Sarker, 2011.....	76
Tabla 44. Proporción de mezclas de concreto (Tan & Pu, 1998).....	77
Tabla 45. Composición química de los aglutinantes usados en Tan & Pu, 1998.....	77
Tabla 46. Resistencia a la compresión de concretos a diferentes edades (Tan & Pu, 1998).....	78
Tabla 47. Proporción de mezclas de concreto a evaluar (Yang et al, 2020).....	78
Tabla 48. Composición química de los materiales utilizados (Yang et al, 2020).....	78
Tabla 49. Recopilación de estudios sobre microsílíce.....	82
Tabla 50. Recopilación de estudios sobre ceniza volante.....	87
Tabla 51. Recopilación de estudios sobre metacaolín.....	91
Tabla 52. Recopilación de estudios sobre ceniza de cascara de arroz.....	95
Tabla 53. Recopilación de estudios sobre escoria granulada.....	97
Tabla 54. Resumen de los mejores remplazos cementicios para cada material.....	99

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Marco Metodológico.....	14
Ilustración 2. Imagen SEM de cemento portland ordinario.....	20
Ilustración 3. SEM de portaditas en cemento portland a 28 días de fraguado.....	20
Ilustración 4. Variación de resistencias típicas para relaciones agua/cemento de concreto con cemento portland.....	21
Ilustración 5. Efectos de los materiales suplementarios en la micromorfología a los 28 días.....	24
Ilustración 6. Dispersión espacial del microsílíce dentro de los vacíos entre granos de cemento.....	28
Ilustración 7. Imagen SEM de muestra de microsílíce.....	31
Ilustración 8. Morfología de las cenizas volantes.....	33
Ilustración 9. Imagen SEM de muestra de ceniza de cáscara de arroz (Srinivasreddy et al., 2013).....	36
Ilustración 10. Microscopía electrónica de la Escoria (Cruz. E., 2018).....	39
Ilustración 11. Resistencia a la compresión en el estudio de Valderrama et al., (2011).....	47
Ilustración 12. Resistencia a la compresión en el estudio de Valderrama et al., (2011).....	48
Ilustración 13. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días en el estudio de Torres et al. (2011).	51
Ilustración 14. Efectos de los suplementos cementicios en la compresión a los 28 y 180 días en el estudio de Duan et al. (2013).....	53
Ilustración 15. Efectos del MS y MK en el desarrollo de la resistencia a la compresión en el estudio de Güneyisi et al. (2012).....	56
Ilustración 16. Relación entre resistencia a la compresión a los 28 días y porcentaje de reemplazo con humo de sílice.....	58
Ilustración 17. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días en el estudio de Nagrockiene et al. (2019).....	62
Ilustración 18. Resistencia a la compresión en el estudio Seleem et al. (2010).....	64
Ilustración 19. Resistencia a la compresión en el estudio de Narmatha et al. (2016).....	65
Ilustración 20. Resistencia a la compresión en el estudio de Dhinakaran et al., 2012.....	68
Ilustración 21. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Dhinakaran et al., 2012.....	69
Ilustración 22. Resistencia a la compresión en el estudio de Hu et al., 2020.....	70
Ilustración 23. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Chindapasirt et al., 2008.....	72
Ilustración 24. Resistencia a la compresión en el estudio Nath & Sarker, 2011.....	76
Ilustración 25. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Nath & Sarker, 2011.....	76
Ilustración 26. Resistencia a la compresión de las mezclas evaluadas con diferente % de reemplazo (Yang et al, 2020).....	79
Ilustración 27. Resistencia a la compresión de los estudios analizados.....	81
Ilustración 28. Resistencia a la compresión para el estudio de Bhanja & Sengupta (2005).	81
Ilustración 29. Resistencia a la compresión a los 28 de los estudios analizados para ceniza volante. .	85
Ilustración 30. Resistencia a la compresión a los 28 de los estudios analizados para ceniza volante ..	86
Ilustración 31. Resistencia a la compresión a los 28 días de los estudios analizados para metacaolín,	89
Ilustración 32. Resistencia a la compresión a los 28 días de los estudios analizados para ceniza de cascara de arroz.....	94
Ilustración 33. Resistencia a la compresión a los 28 días de los estudios analizados para escoria granulada.....	96

RESUMEN

La presente monografía estudia los efectos sobre la microestructura del concreto y sus propiedades finales, al realizar sustituciones parciales de cemento con micromateriales reactivos. Esto con el fin de identificar el micromaterial que aporta un mayor incremento de resistencia y durabilidad, mientras que simultáneamente reduce la huella de carbono al disminuir la cantidad de cemento utilizado en dichas mezclas. Para ello, se inició con una contextualización mediante antecedentes sobre el uso del cemento a lo largo de la historia y como su incremento inminente puede ser un potencial riesgo ambiental por las grandes cantidades de CO₂ liberadas en la producción del cemento. Por otro lado, en cuanto al comportamiento del cemento, se estudia profundamente cuál es su composición y cómo afecta esta sus propiedades, cuáles de dichos componentes se encargan del fraguado del concreto y como es llevado a cabo este proceso. Esto permitió tener un entendimiento más amplio de cómo funciona la microestructura del concreto y cómo se puede mejorar.

Seguidamente se realizó una identificación de los suplementos cementicios en la industria de la construcción y sus respectivos orígenes, con el fin de comprender el panorama nacional e internacional para la producción y uso de dichos micromateriales. A partir de esto se llevó a cabo una investigación de las propiedades física y químicas que distinguen a cada micromaterial, describiendo su composición química, área superficial, tamaño de partícula y gravedad específica. De esta forma fue posible establecer que el contenido de componentes puzolánicos define en gran medida las reacciones positivas de los micromateriales, y las propiedades físicas ayudan a crear mejores enlaces en la microestructura. Lo anterior se traduce en un mejor comportamiento del concreto.

Posteriormente para contrastar la información obtenida se realizó una revisión bibliográfica de estudios realizados por diferentes autores sobre los materiales cementicios suplementarios seleccionados. Mediante la revisión bibliográfica se identificaron investigaciones que utilizaban distintos porcentajes de reemplazo, y al igual, relaciones agua/material cementante diferentes, esto, para poder comparar las diferencias de desempeño para un mismo material. A partir del análisis realizado a cada material, se realizó una comparación general de desempeño. La comparación de información fue basada en tres filtros: El primero y segundo filtro se enfocó al medio ambiente, basándose en la relación agua/material cementante y el porcentaje de reemplazo del micromaterial en la mezcla de concreto, esto, debido a que se buscó una disminución en el consumo de agua y cemento en la realización de concretos. El tercer filtro tuvo en cuenta sus resistencia final y durabilidad.

Finalmente, al analizar los resultados recopilados se llegó a la conclusión de que el metacaolín (MK por sus siglas en inglés) con un reemplazo del 20% es el micromaterial reactivo con mejor desempeño. Puesto que es capaz de lograr una resistencia superior, considerándose un concreto de alto desempeño

(>48 MPa) y además de conseguir una penetrabilidad a los cloruros muy baja. El MK 20% con su porcentaje de reemplazo junto con la relación a/mc 0.3 lo hacen el material con mejor desempeño teniendo en cuenta el enfoque sostenible.

ABSTRACT

This monograph studies the effects on the microstructure of concrete and its final properties when partial cement substitutions are made with reactive micromaterials. This in order to identify the micromaterial that provides a greater increase in strength and durability, while simultaneously reducing the carbon footprint by decreasing the amount of cement used in such mixtures. To achieve this, we began with a contextualization through a background check on the use of cement throughout history and how its imminent increase can be a potential environmental risk due to the large amounts of CO₂ released in the production of cement. On the other hand, regarding the behavior of cement, it was studied in depth what is its composition and how it affects its properties, which of these components are responsible for the setting of concrete and how this process is carried out. This allowed to have a broader understanding of how the concrete microstructure works and how it can be improved.

Afterwards, an identification of cementitious supplements in the construction industry and their respective origins was carried out in order to understand the national and international panorama for the production and use of these micromaterials. On this basis, an investigation of the physical and chemical properties that characterize each micromaterial was carried out, describing its chemical composition, surface area, particle size and specific gravity. As a result, it was possible to establish that the content of pozzolanic components significantly defines the positive reactions of the micromaterials, and the physical properties help to create better bonds in the microstructure. This translates into better concrete behavior.

Subsequently, in order to contrast the obtained information, a literature review of studies carried out by different authors on the selected supplementary cementitious materials was performed. Through the bibliographic review, researches were identified that used different replacement percentages, and also different water/cementitious material ratios, in order to compare the differences in performance for the same material. From the analysis carried out on each material, a general performance comparison was made. The comparison of information was based on three filters: The first and second filter focused on the environment, based on the water/cementitious material ratio and the percentage of replacement of the micromaterial in the concrete mix, this, because a decrease in water and cement consumption was sought in the realization of concretes. The third filter took into account its final strength and durability.

Finally, upon analyzing the results compiled, it was concluded that metakaolin with a 20% substitution is the reactive micromaterial with the best performance. Since it is capable of achieving superior strength, being considered a high performance concrete (>48 MPa) and also achieving a very low chloride penetrability. The MK 20% with its percentage of replacement together with the *a/mc* ratio 0.3 results in the best performing material considering the sustainable approach.

INTRODUCCIÓN

La industria del cemento ha mostrado gran expansión en la última década siendo una consecuencia del crecimiento poblacional acompañado del desarrollo industrial y los avances tecnológicos (Gómez-Zamorano et al., 2015). El concreto es el material de construcción más utilizado, debido a su versatilidad, durabilidad y economía, razones por las que el estudio de alternativas o mejoras en su calidad beneficiaría la industria y su proceso continuo de expansión (Kosmatka et al, 2004) (Mehta & Monteiro, 2006).

En Colombia la industria cementera ha sido cambiante, la producción de cemento inició en 1909 gracias a la empresa Cementos Samper en Bogotá. Para 1990 se dio un crecimiento considerable hasta una crisis en 2005. Sin embargo, los números aumentaron, teniendo así un crecimiento persistente (Latorre, A. 2008). Para 2003 ya se contaban con 16 fábricas en 10 departamentos en Colombia (Gutiérrez, L., 2003), cifra que para 2021 ha ido en aumento. De acuerdo con el DANE en septiembre de 2021 la producción de cemento gris aumentó en un 7.1% con relación a las cifras del mismo mes de 2020, siendo despachadas cerca de 1.164,0 miles de toneladas de cemento gris (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2021). La producción de cemento aumenta de la misma forma en que lo hace la industria de la construcción haciendo necesaria una continua investigación que permita la implementación de concretos con mejor desempeño en la industria de la construcción.

Durante muchos años de investigación se ha estudiado el concreto con el fin de mejorar las propiedades físicas y mecánicas desde un plano externo. sin embargo, se ha llegado a un punto en que no se puede mejorar más su calidad en este plano, por tanto, se ha decidido estudiar y mejorarlo desde un plano microestructural para lograr comprender y determinar cómo diversas reacciones en esta pueden ayudar a diseñar concretos de mayor calidad que tengan un mejor desempeño y durabilidad a largo plazo. El conocimiento de la microestructura y de las propiedades de los componentes individuales del hormigón y su relación entre sí es útil para ejercer un control sobre las propiedades (Druta, 2020).

Frecuentemente, las propiedades físicas y el comportamiento mecánico de un material se rigen por su microestructura (Guerrero et al., 2011). Por ello, es muy conveniente que los diseñadores estructurales y los ingenieros interesados en las propiedades del hormigón se familiaricen con la microestructura del material. A pesar de la aparente simplicidad de la tecnología de producción del hormigón, la microestructura del producto es muy compleja (Roy, 1993). Una vez se haya comprendido cómo los diversos tipos de materiales y los organismos reaccionan y cambian la microestructura del concreto, podremos dar un paso hacia la creación de concretos más económicos, eficientes y durables.

La temática de este trabajo de grado parte del estudio del origen y formación del concreto con materiales reactivos desde un nivel micro, por lo que se evaluarán estudios realizados por diferentes autores sobre los materiales seleccionados: microsílíce, metacaolín, ceniza de cascara de arroz, escoria granulada y ceniza volante, analizando el contraste del desempeño entre estudios realizados para un mismo material y entre los diferentes materiales. La investigación abordará las propiedades químicas y físicas, con el fin de entender los efectos del cambio en la microestructura reflejado en las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y a los cloruros. El estudio de la microestructura del concreto facilitará comprender y predecir sus reacciones, permitiendo el diseño de materiales con mejor comportamiento y durabilidad. De acuerdo con lo anterior, esta monografía está asociada al trabajo de investigación del grupo Geomavit (geotecnia, materiales, vías y tránsito) en la línea de investigación de los materiales de construcción en obras civiles.

En el mercado actual de los materiales de construcción existe la demanda, dada por la necesidad de urbanización y expansión de las ciudades; donde se necesitan enormes cantidades de materiales para la construcción, por lo que se debe satisfacer la oferta con un material de calidad. Con la realización de esta monografía se pretende la revisión, recopilación y análisis de información referente a los efectos producidos en las propiedades del concreto a partir del mejoramiento en la microestructura de este mismo al agregar materiales reactivos en su diseño de mezcla. Dicha recopilación y análisis proveerá un precedente teórico que alimentarán el estado del arte referente a la temática de microestructura del concreto con materiales reactivos, con el motivo de una posterior investigación en la misma línea temática por parte de la comunidad académica. Se espera que el proyecto plantee un desarrollo e implementación en masa de diseños de concreto más eficientes basados en materiales reactivos, con el fin de satisfacer las necesidades del crecimiento urbano en el mundo, garantizando la calidad, durabilidad y sostenibilidad de las estructuras.

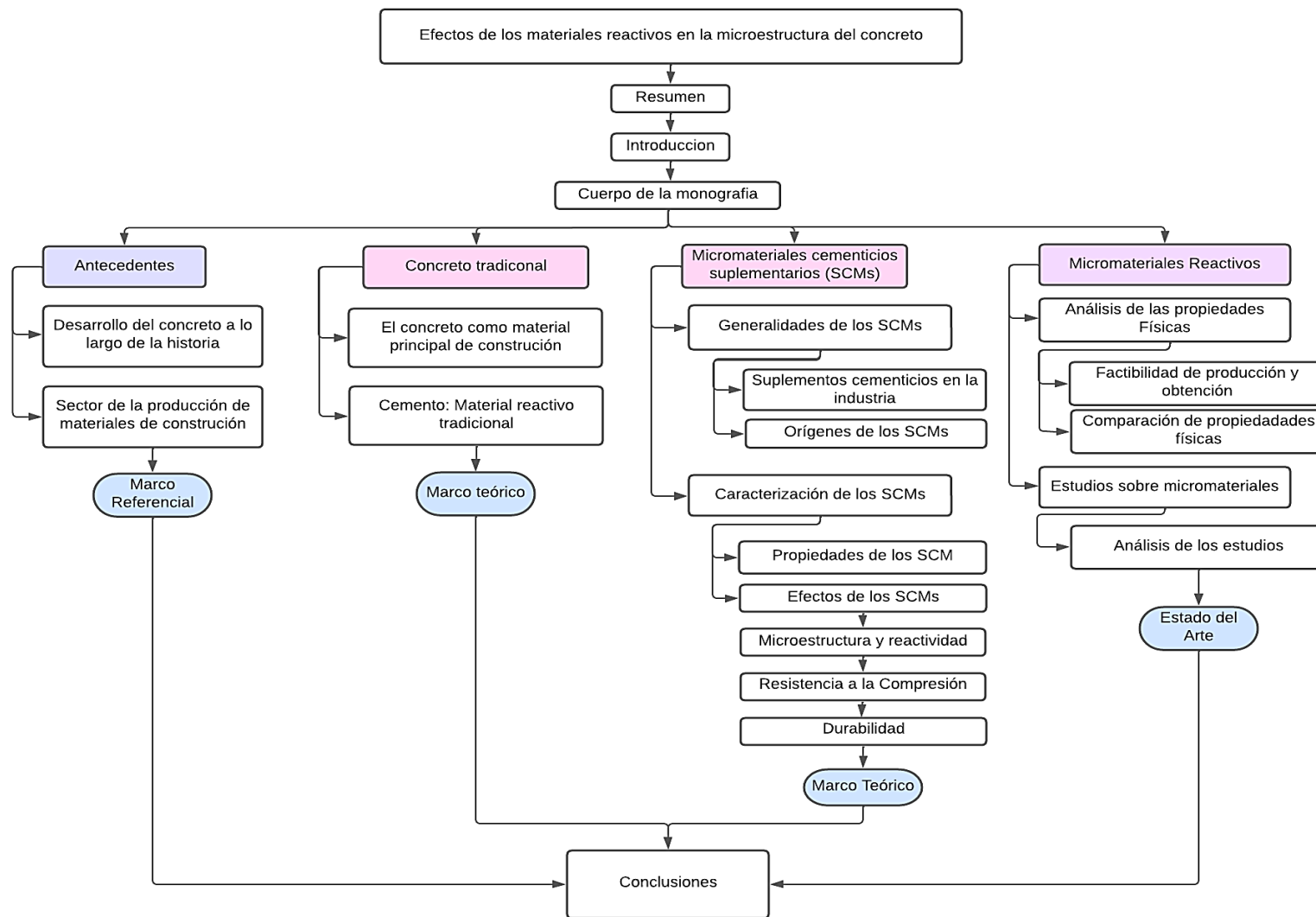


Ilustración 1. Marco Metodológico.

Fuente: (Autores, 2022)

1 MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES

A lo largo de la historia, el desarrollo de la humanidad ha sido producto de los avances tecnológicos y científicos que han permitido satisfacer sus necesidades, de esta manera, las sociedades se expanden y progresan mediante la implementación de materiales que mejoran sus condiciones (Guerrero et al., 2011). Este progreso en la tecnología de la construcción es una consecuencia de la evolución, pero no por la revolución. El desarrollo de tecnologías es el resultado de una mejor comprensión y conocimiento de la naturaleza de los materiales, esto se puede ver en avance gradual en los materiales de construcción, como el concreto (Czarnecki. L et al, 2017).

1.1.1 Desarrollo del Concreto a lo Largo de la Historia

Para la época del Imperio Romano (27 A.C) se desarrolló el primer “concreto” gracias a las habilidades ingenieriles desarrolladas por los romanos, junto con la facilidad de obtención de materiales como: arenas volcánicas, piedras naturales, cal y guijarros. Este material era usado en todo tipo de estructuras gracias a su resistencia que incluso es comparables con las propiedades del concreto actual (Nistal, A. et al, 2012). La mezcla consistía en caliza calcinada, tobas volcánicas y piedras, logrando que se erigieran grandes estructuras como lo es panteón, la cual permanece actualmente gracias a la Puzolana o “Pozzolana”, así como lo escribió Vitruvio “una clase de polvo que debido a causas naturales produce resultados sorprendentes y al ser mezclada con cal y guijarros no solo añade resistencia, sino, que permitía la construcción de muelles al endurecerse en el mar” (Romea. C, 2014). Con la caída de este imperio en el siglo III d.C. aparece la época del olvido, las técnicas romanas no volvieron sino hasta el siglo XIX gracias a John Smeaton (1791) en la construcción del faro de Eddystone con mortero hidráulico (Nistal, A. et al, 2012) (Perles, 2009).

Para 1824 aparece el cemento Portland gracias a Joseph Asdin mediante la mezcla de piedra caliza y arcilla creando así un cemento artificial que a partir de ese momento sería el usado para la creación de concreto (Allen & Iano, 2019). El francés Louis Vicat fue quien se dedicó al estudio del cemento, estudiando así, el comportamiento de piedra caliza con arcilla, junto con las diferentes reacciones químicas de la cal hidráulica. Los estudios sobre el cemento, el material reactivo en el concreto, cesaron con la llegada de hormigón armado con la idea de la barca de Lambot en 1848 (Romea. C, 2014). No fue sino hasta la década de 1890 donde se retomaron los estudios del concreto enfocándose en sus propiedades, lo que permitió el estudio del cemento como material reactivo en el concreto.

Desde finales de los años 1980 comenzó una tendencia enfocada en el cuidado de los recursos naturales y el medio ambiente (Arredondo. S, 2011). Los materiales y actividades de construcción producen gran impacto ambiental debido a la explotación de recursos naturales y la cantidad de residuos y gases generados en su producción, es así como entonces se inició a escuchar el concepto de desarrollo sustentable (Serrano et al, 2015) (Arredondo. S, 2011). A partir de ese momento la industria cementera establece como enfoque principal la creación de un concreto sustentable, sostenible y con responsabilidad medio ambiental, para disminuir la cantidad de gases en la producción de cemento (Juenger. M et al, 2019). Como consecuencia surgen investigaciones sobre combinación del cemento con otros materiales reactivos o incluso sustitución del clinker con materiales como las puzolanas (Gómez. L et al, 2015).

A raíz de las investigaciones de materiales reactivos alternativos en la industria cementera salieron a flote un gran número de investigaciones, informes y publicaciones relacionadas con el uso de micromateriales puzolánicos (cenizas de cáscara de arroz, humo de sílice, cenizas volantes, etc) como reemplazo parcial o total del cemento portland (Lothenbach. B et al, 2011). Un ejemplo de material reactivo es la puzolana, puesto que demostró que su utilización en el concreto trae beneficios en el aspecto de la durabilidad como consecuencia del aumento de la impermeabilidad, trabajabilidad, la resistencia al ataque de sulfatos y reduce la reacción álcali-agregado (Allen & Iano, 2019)., por lo tanto, todo esto redundando en que dicha práctica mejora las propiedades de los morteros y hormigones, mientras reduce el consumo de cemento portland (Valdez. P, 2002).

1.1.2 Sector de la Producción de Materiales de Construcción

Globalmente hay una mayor cantidad de personas viviendo en las áreas urbanas que rurales, en 2018 el 55% de la población residía en áreas urbanas, y este porcentaje muestra un incremento proyectado a 68% en 2050 (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2018, p. 10). De acuerdo con un informe de la Organización de las Naciones Unidas la población mundial aumentará en 2.000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 7.700 millones actuales a los 9.700 millones en 2050 (ONU, 2019, p. 1). Esta situación trae como consecuencia la necesidad de urbanización y expansión de las ciudades; donde se necesitan enormes cantidades de materiales para la construcción de viviendas, industrias, infraestructura para servicios públicos, transporte, comercio o instalaciones de saneamiento y complementarias como túneles o puentes (Mehta & Monteiro, 2006).

El sector de la construcción es uno de los más grandes a nivel mundial. El crecimiento anual compuesto (CAGR) a nivel mundial ha tenido un crecimiento de 5.8% desde el 2000 al 2018. Grandes países como Estados Unidos y China son los principales participantes del mercado con un ritmo de crecimiento del

6% y 45% respectivamente. Por su parte, Colombia, ha tenido un crecimiento del 8.5%, cifra que permite una participación del 0.24% del mercado a nivel global. Como consecuencia del aumento acelerado y la concentración masiva de la población en las grandes ciudades, existe un impulso en la demanda de materiales de construcción. Por otro lado, la producción de materiales de construcción ha crecido en un 7.4% (CAGR), no obstante, los niveles de producción sobrepasan el consumo (Colombia productiva, 2017).

A nivel mundial en el 2020 se dio una gran reducción en el sector de la construcción frente a la pandemia del coronavirus (Covid-19) situación que provocó una paralización en la economía de los países. Sin embargo, ya para finales de 2019 se preveía una desaceleración en el crecimiento del mercado mundial (Colombia productiva, 2017). De acuerdo con los informes del Grupo Bancolombia, actualmente con la reactivación económica en Colombia las cifras muestran una tendencia positiva para el país frente a las cifras prepandemia debido a las iniciativas públicas VIS y VIP.

En la proyección de tendencias en el sector se figura los materiales con nuevas características, que tengan un valor agregado: productos con mayor ciclo de vida y con sello de sostenibilidad. Los materiales con mayor ciclo de vida se han vuelto necesarios en la industria, actualmente la mayoría de estructuras en concreto están diseñadas para un tiempo de vida de 50 años, sin embargo, es común ver como por factores ambientales se acorta su tiempo de vida reduciendo a unos 20 o 30 años.

La reparación o reemplazo de estructuras de concreto generan altos costos, por lo que la industria busca proyectar el diseño de estructuras con servicios de vida mayores (Mehta, 2001). Un ejemplo es la investigación y producción del sector en el desarrollo de concretos más durables o que incluso pueden autorepararse, dado que el estado propenso al agrietamiento del concreto provoca la permeabilidad y reducción del ciclo de servicio. Por otro lado, el sector demanda el sello de sostenibilidad en sus productos de forma que se alineen con los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), Países como Alemania se han especializado en el desarrollo de materiales gracias a iniciativas del ministerio de infraestructura que buscan la investigación y estudios de materiales de construcción en pro de la sostenibilidad (Colombia productiva, 2017).

Tomando como punto de partida la búsqueda del sector por la sostenibilidad en consecuencia del impacto ambiental generado en la industria de los materiales de construcción, se deben promover nuevas opciones en la tecnología de materiales que cambien el modelo actual, derrochador en materiales naturales y manufacturados. Los nuevos modelos de producción deben basarse en la optimización de materiales, la maximización de productividad y la reducción de costos de mantenimientos, lo que se traduciría en un producto de valor y que satisface las necesidades actuales del mercado (Mehta, 2001) (Hawken et al., 2010).

2 MARCO TEÓRICO

2.1 EL CONCRETO COMO MATERIAL PRINCIPAL DE CONSTRUCCIÓN

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción, gracias a su versatilidad, durabilidad y economía (Kosmatka et al, 2004). Debido al auge de la expansión, actualmente, la utilización del mismo es mucho mayor que hace 40 años. Se estima un consumo mundial del orden de 11.000 millones de toneladas métricas cada año (Mehta & Monteiro, 2006), su uso masivo genera la necesidad de un producto de calidad, dependiendo esta de la calidad de la pasta, del agregado y de la unión entre los dos. La investigación de materiales se ha intensificado en los últimos años, con el fin de mejorar esta junto con las características de los materiales utilizados en los proyectos de infraestructuras, entre ellos la resistencia del concreto (Pachacutec & Vilca, 2018).

A pesar de que la tecnología usada para producir concreto sea relativamente simple, la microestructura del producto resultante es altamente compleja (Druta, 2020). Por esto, para obtener un concreto de alta calidad y resistencia es indispensable una adecuada elaboración, en donde todas las partículas de agregado son completamente cubiertas por la pasta, así mismo todos los espacios son llenados por esta misma (Kosmatka et al, 2004) (Allen. E et al, 2019). Por esto el deterioro en los diferentes sistemas de infraestructura provocado por la calidad del concreto es un problema de interés mundial, siendo un factor influyente en la urbanización. Con el fin de lograr mejoras en su durabilidad y evaluar la vida útil del hormigón, es necesario considerar los procesos de deterioro desde su origen, es decir, en su microestructura la cual, es el resultado del proceso de dosificación, mezclado, colocación y curado del hormigón (Roy, 1993).

Según la Real Academia Española, un reactivo es una sustancia que se emplea para provocar una reacción química. El concreto se origina a partir de una mezcla compuesta por agua, agregados fino y grueso y cemento, sin embargo, en el concreto simple, el único material reactivo es el cemento hidráulico; que al entrar en contacto con el agua empieza un proceso de hidratación y se endurece creando una “roca” artificial a partir de una pasta. Las características de esta, variará de acuerdo a la dosificación, afectando la porosidad de la mezcla, visible solo desde un plano micro, pero reflejada externamente. Una microestructura con mayor densidad presenta mayor durabilidad (Alcázar, J., 2012). Una forma de mejorar las propiedades del concreto es mediante el uso de micromateriales reactivos, que según la función del micromaterial se puede obtener concretos con mejores propiedades de porosidad, permeabilidad, resistencia, trabajabilidad o durabilidad superando limitaciones como la incompatibilidad de fases, estructura molecular inestable, costos elevados y emisión de gases tóxicos.

2.1.1 Cemento: Material Reactivo Tradicional

El cemento es una mezcla conglomerante compuesta por clinker, yeso y en ocasiones adiciones como óxido de hierro. El clinker es el principal componente del cemento portland, y quien aporta la resistencia a este (Sánchez, 2001). Para la producción del clinker se calcina caliza y arcilla a temperaturas de 1450°C, posterior a esto los minerales son enfriados rápidamente con inyecciones de aire frío hasta reducir su temperatura a 100°C y da como resultado unos granos de entre 5 a 25mm de espesor (Sanjuán & Chinchón, 2014). Finalmente, estos granos son molidos junto a las adiciones pertinentes y el yeso, cuyo objetivo es controlar el tiempo de fraguado del cemento (Sánchez, 2001).

Una vez molidos estos componentes, ya se puede considerar la mezcla de estos como cemento. Las propiedades físicas de este varían mucho y dependen del fabricante, su gravedad específica es aproximadamente 3.15 gr/cm³, el área superficial se encuentra en un rango entre 225 – 370 m²/kg y finalmente el promedio de tamaño de partícula ronda entre 10 a 15 µm. La composición química del cemento varia similarmente dependiendo del fabricante o de las adiciones agregadas en la mezcla, estos rangos son presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química del cemento

Compuesto químico	Rango aproximado (%)
Oxido de calcio (CaO)	58.2 - 65.6
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	19.8 - 26.45
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4.1 – 9.5
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2.1 – 4.5
Oxido de Magnesio (MgO)	Trazas – 2.9
Álcalis (K ₂ O, Na ₂ O)	0.1 – 2.8
Sulfatos (SO ₃)	0.1 – 2.2
Perdida por calcinación	0.2 – 2.8

Fuente: (Sanjuán & Chinchón, 2014)

Debido a que el cemento es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, su demanda crece constantemente año tras año (Kosmatka et al, 2004). A nivel nacional la producción del mes de abril de 2022 fue de 1,215.6 mil toneladas de cemento, esto representa un crecimiento del 7% en comparación a el mismo mes del año anterior (DANE, 2022).

Microestructura y reactividad

En el siguiente análisis SEM (Microscopia electrónica de barrido) de una muestra de cemento podemos apreciar la morfología de la portlandita y el CSH, los cuales son los compuestos más importantes producidos por la hidratación del cemento (Shiferaw et al, 2019). La portlandita presenta lados bien

delimitados y con forma similar a plaquetas hexagonales, el CSH en cambio tiene una estructura laminar (Shiferaw et al, 2019) (Giraldo & Tobón, 2005).

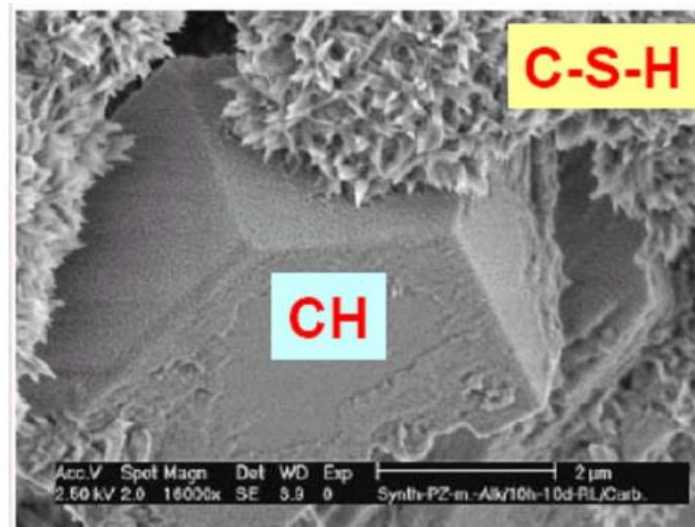


Ilustración 2. Imagen SEM de cemento portland ordinario.

Fuente: (Gómez, A, 2009)

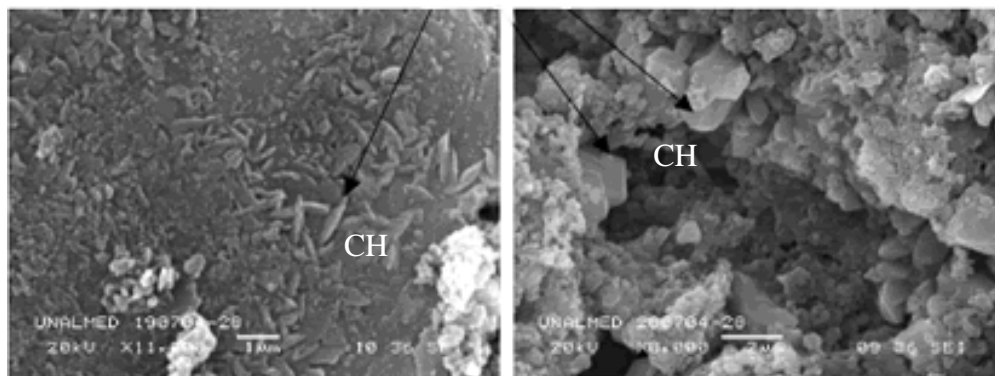


Ilustración 3. SEM de portaditas en cemento portland a 28 días de fraguado.

Fuente: Giraldo & Tobón, 2005

Resistencia a la compresión y trabajabilidad

En términos simples se puede considerar la resistencia a la fuerza de compresión como la característica más importante del concreto, y por lo tanto del cemento, dado que su fin último es soportar una determinada carga. Esta resistencia se define como la máxima carga por unidad de área capaz de soportar un elemento (Esfuerzo) a una edad de 28 días, y se cuantifica usualmente en unidades de MPa, Kg/cm³ o PSI (Kosmatka et al, 2004). Para concretos sin reemplazo de micromateriales o aditivos

especiales, la resistencia a compresión del concreto la define casi en su totalidad la relación agua cemento, esta establece que un concreto con mayor contenido de agua tiene menor resistencia y de la misma manera en sentido contrario. Sin embargo, simultáneamente con una disminución a la relación agua/cemento se afecta la consistencia y trabajabilidad del concreto, por lo anunciado anteriormente, es de vital importancia tener precisión al momento de realizar el diseño de dosificación (Kosmatka et al, 2004) (Tangarife & Silva, 2019).

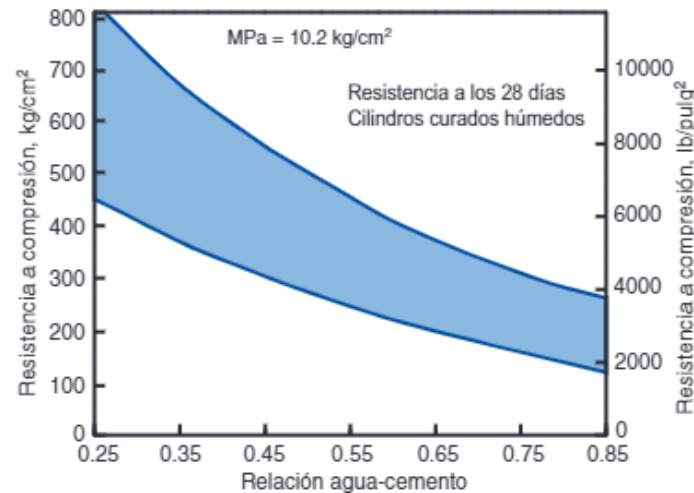


Ilustración 4. Variación de resistencias típicas para relaciones agua/cemento de concreto con cemento portland.

Fuente: (Kosmatka et al, 2004)

2.2 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS SUPLEMENTARIOS

2.2.1 Suplementos Cementicios en la Industria

Para la fabricación del concreto se usa aproximadamente un 12% de cemento en la mezcla, por esta razón, el cemento portland es uno de los materiales de mayor uso en la industria de la construcción (Mehta, 2001). Durante su producción este material requiere de grandes cantidades energéticas, esto lo hace uno de los principales participantes en la producción de gases de efecto invernadero que surgen durante la clinkerización debido a la descarbonatación de la caliza (Falikman et al., 2018) (Skibsted & Snellings, 2019). Sin embargo, el impacto ambiental generado por esta industria puede reducirse a través de la conservación de materiales y energía en la producción, por lo que la reducción o sustitución parcial del cemento en la demanda de concreto se muestra como una posible solución.

Incluso en la actualidad el uso de materiales tradicionales como el cemento es insuficiente en escenarios con requerimientos específicos y especiales (Sequeira, 2021). El concreto moderno es más que solo una mezcla de cemento, agua y agregados, este contiene aditivos minerales, mezclas químicas e incluso fibras que confieren propiedades específicas al concreto (Claude, 2000). Se ha demostrado que los micromateriales usados como suplemento cementicio pueden producir a largo plazo mayores resistencias a las obtenidas en los concretos tradicionales. Su uso también influiría en mayores ciclos de vida, haciéndolos en consecuencia más sostenibles, promoviendo la conservación de los recursos naturales en la medida que se da la reducción de las emisiones de CO₂ en la producción (Falikman et al., 2018) (Skibsted & Snellings, 2019) (Juenger et al., 2019).

Frente a la sostenibilidad estos materiales requieren de una menor intensidad de energía térmica en comparación con el cemento portland, por lo que permitiría la reducción de energía y emisión de gases en la medida de su implementación como estrategia en la industria de la construcción (Juenger et al., 2019). Los cementos y concretos deben evolucionar con una perspectiva más ambiental los que implica una adición de componentes minerales a su mezcla provocando una disminución en la relación a/mc mientras se aumenta su ciclo de vida (Claude, 2000). El desarrollo de tecnologías en el concreto permitirá hacer más concreto con la misma cantidad de material cementante. Los materiales cementante al contener menor Clinker reemplazados por micropolvos se convierten en materiales más sostenibles (Claude, 2000).

2.2.2 Orígenes de los Materiales Suplementarios Cementicios (SCMs)

Los materiales cementicios suplementarios tienen orígenes como desechos industriales, materiales naturales puzolánicos o minerales activados. Las puzolanas naturales se originan en yacimientos especiales y requieren de procesos de molienda para su aplicación. Los suplementos cementicios de origen natural fueron los primeros usados en la producción del concreto antiguo, tobas volcánicas y cal, fueron aplicados por los romanos en sus construcciones reemplazando incluso en ocasiones la arena por puzolana ya fuera negra, roja, blanca o gris, Estos concreto se caracterizaban por su alta resistencia al agua (Juenger et al., 2019) (Dedeloudis et al., 2018).

Las puzolanas naturales en su mayoría tienen orígenes volcánicos, siendo estas tobas, cenizas y pómez, gracias a esto no solo influirá en los menores costos de producción sino también en la reducción de emisiones al ser usado como reemplazo en el clinker. Estos suplementos cementicios contienen tanto componentes reactivos como no reactivos, pero en pocas cantidades, estos son minerales arcillosos, feldespato y cuarzo, mientras que por el lado reactivo se encuentran minerales zeolitos y vidrio volcánico (Dedeloudis et al., 2018). A partir de las puzolanas naturales se impulsó la búsqueda de

materiales que tuvieran las mismas propiedades puzolánicas con orígenes diferentes como los desechos industriales (Sequeira, 2021).

En el sector industrial los más usados son la caliza, cenizas volantes procedente de plantas de energía, escorias de alto horno como subproducto en el arrabio y humo sílice o silica fume de industria del ferrosilicio; por otro lado, como minerales arcillosos activados se tiene el metacaolín (Skibsted & Snellings, 2019) (Juenger et al., 2019). La industria del cemento depende actualmente de los subproductos en las industrias como fuentes de suplementos cementicios (SCMs) como ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice, sin embargo, casos como el de la producción de la ceniza volante, que es subproducto de las plantas energéticas impulsadas por carbón, se verá afectada por el cierre de estas mismas, problemática que afectará los suministros de SCMs en la industria de la construcción (Juenger et al., 2019).

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SCMs

2.3.1 Propiedades de los SCMs

Cada micromaterial usado como suplemento cementicio posee diferentes niveles de reactividad, por lo que su porcentaje como reemplazo en el diseño del concreto variará según la resistencia que aporte cada material. La variación en la reactividad de un material es definida por la alcalinidad de la solución de poros que se obtiene en los primeros días (Lothenbach et al., 2011). De acuerdo con la ASTM C-618 se considera un material como puzolánico si tiene al menos un 70% de SiO_2 , Al_2O_3 y FeO_3 .

2.3.2 Efecto de los SCMs

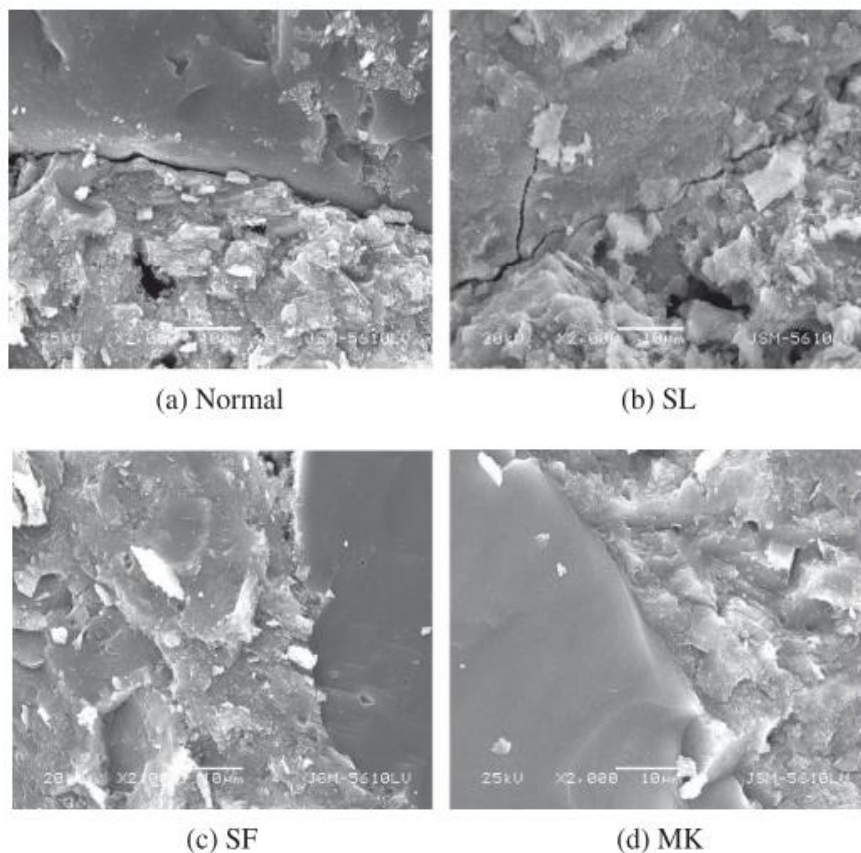
Al incorporar materiales cementicios suplementarios en el diseño de un concreto se producen cambios en la mezcla que modifican el comportamiento tradicional de un concreto. Los micromateriales manejan una estructura y tamaño especial que cambian la estructura del concreto, visible en un nivel microscópico, y se reflejan en efectos en sus propiedades. Dependiendo del diseño o porcentaje de reemplazo que se utilice, los efectos producidos beneficiaran o perjudicara el desarrollo de sus propiedades como la reactividad, trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

2.3.2.1 Efecto de los SCMs en la Microestructura y Reactividad

La microestructura del concreto es una de las características más importantes del material, influyendo en las propiedades mecánicas y la durabilidad, su forma dependerá del curado y los componentes del material, influyendo en la zona interfacial (Duan et al., 2013). La incorporación de micromateriales reactivos provoca cambios a nivel microestructural que afectan las propiedades del concreto. Con la

adición de materiales se da el efecto puzolánico el cual es producto de la reacción entre la sílice del material suplementario y el Hidróxido de calcio libre (CH) esto provocará un consumo de CH para la formación de partículas de Silicato de calcio hidratado (C-S-H) y otros productos de baja porosidad ($\text{Puzolana} + \text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CSH}$) (Cruz, E., 2018). A diferencia de la reacción que ocurre con la hidratación del cemento en la reacción puzolánica no se produce cal.

El CSH posee una estructura amorfa con ramificaciones que se entre cruzan y permiten crear enlaces entre partículas formando una estructura sólida. (Gómez A., 2009). El tiempo de reacción de los materiales cementicios suplementarios es más lenta dependiendo de la composición química de cada material, finura y forma (Lothenbach et al., 2011). Un factor importante en la inclusión de SCMs es el efecto de dilución, en donde se da un efecto de remoción del cemento, por lo que, si no es un material de reacción temprana, existirá una reducción en la ganancia de resistencia que será proporcional a cantidad de cemento que se sustituya (Zamudio & Quiroga, 2018).



Nota. (b) Escoria (del inglés slag), (c) Humo de Sílice (del inglés Silica Fume), (d) Metacaolín (del inglés Metakaolin).

Ilustración 5. Efectos de los materiales suplementarios en la micromorfología a los 28 días.

Fuente: (Duan et al., 2013)

La inclusión de suplementos cementicios provoca el efecto filler, que gracias a una mayor área superficial logra llenar los vacíos, incidiendo en las propiedades mecánicas, mejorando el proceso de hidratación y desacelerando el tiempo de hidratación gracias a la “dilución” del contenido de cemento dando espacio para la formación de silicatos de calcio hidratado esto se traduce en menor tiempo de fraguado y mejor puzolanidad (Juenger & Siddique, 2015) (Juenger et al., 2019). Existen dos mecanismos que permiten que se produzca el efecto filler: Espacio extra para la hidratación y mejoras en la nucleación gracias a una mayor área superficial. Los concretos con adiciones de SCMs tienen porosidades totales mayor a los concretos tradicionales, sin embargo, pueden desarrollar mayores resistencias y tener una menor permeabilidad gracias su fina estructura porosa (Lothenbach et al., 2011).

Los materiales cementicios suplementarios de origen natural como el metacaolín y la ceniza de cascara de arroz y de origen industrial como la escoria, cenizas volante y microsílíce permiten la mejora en el desempeño del concreto mediante su aplicación al ser productos con mayor estabilidad en sus reacciones gracias a su puzolanidad y mejora microestructural. Mediante el escaneo SEM realizado por Duan et al. (2013) se identificó el cambio en la morfología de la ITZ del concreto, además, de la influencia en los productos de gel de C-S-H y la disminución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gracias al efecto puzolánico. Las micropartículas adicionadas provocan una densificación en la zona interfacial evitando la formación de microfisuras permitiendo una óptima conexión entre zonas.

La mejora microestructural provoca efectos positivos en la estructura porosa mejorando el proceso de hidratación (Duan et al., 2013). El incremento en la durabilidad de estas mezclas está relacionado con propiedades como su resistencia a la compresión, resistencia a los ataques químicos y estabilidad dimensional, las cuales dependen directamente de la microestructura del cemento utilizado (Gomez. L et al, 2009).

2.3.2.2 Efecto de los SCMs en la Trabajabilidad

A pesar de que los SCMs aportan puzolanidad, lo cual es beneficioso, estos materiales también tienen influencia negativa al afectar la trabajabilidad del concreto. Gracias a la puzolana en la mezcla aumenta la demanda de agua necesaria en los concretos debido al tamaño de las partículas micro. También se puede dar el caso en donde debido a la alta porosidad interna esta demanda aumente ya que es absorbida por la puzolana. La demanda de agua también se ve influenciada por la aglomeración de los SCMs que se contraponen a la fluidez y trabajabilidad de la pasta hidratada (Juenger & Siddique, 2015). Es necesario la optimización del tamaño de las partículas de cemento, SCM y filler para maximizar la trabajabilidad de la mezcla, para eso se realiza un análisis reológico de las propiedades teniendo en cuenta diferentes distribuciones y tamaños de partículas.

2.3.2.3 Efecto de los SCMs en la Resistencia a la Compresión

El concreto es un material que trabaja a compresión por lo que el desarrollo de resistencia a la compresión será un efecto indispensable al incorporar materiales suplementarios. En un concreto tradicional las zonas de transición entre la pasta del cemento y los agregados tienden a ser vacíos ya que no hay partículas que ocupen dichas zonas, por lo que la resistencia en los espacios llenos solamente por pasta será menor (Sequeira, 2021). Gracias a la reacción puzolánica de los SCMs se obtienen mejores resistencias a largo plazo, pero disminuyen la resistencia temprana del concreto por la dilución del cemento (Juenger & Siddique, 2015). La resistencia a la compresión aumenta de forma gradual en la medida en que el contenido de Ca(OH)_2 disminuye (Duan et al., 2013).

La inclusión de SCMs promueve una mejor adherencia entre la pasta de cemento y los agregados, al ubicarse en las zonas de transición, siendo los suplementos cementicios un puente para la unión y formación unificada de la mezcla la cual tiene una mayor densidad, como resultado de la adherencia, se obtienen mejores resistencias a los 28 días (Duan et al., 2013) (Juenger & Siddique, 2015).

2.3.2.4 Efecto de los SCMs en la Durabilidad

Es importante diseñar concretos que mantengan su resistencia a lo largo de su vida útil bajo las diferentes condiciones ambientales (Claude, 2000). La durabilidad de un material se evalúa mediante su desempeño frente a los ataques ácidos y altas temperaturas ya que diferentes ambientes pueden provocar deterioro en la estructura de concreto. El ataque de ácidos por la reacción de los hidróxidos de calcio (Ca(OH)_2) que provocan una disolución o pérdida de masa, deteriorando y afectando la resistencia del concreto. Diversas investigaciones plantean que al usar materiales puzolánicos se da una disminución de la permeabilidad del concreto, permitiendo un menor ingreso de agentes abrasivos en la matriz del concreto gracias a densificación. Este efecto se da gracias a la formación de silicatos de calcio hidratado adicional que se producen en la reacción puzolánica (Zamudio & Quiroga, 2018).

La resistencia a la penetración de iones de cloruros está relacionada con la baja permeabilidad que controla el proceso de deterioro de la estructura en concreto, por lo que la resistencia a la penetración de iones de cloruros es una forma de determinar la durabilidad del concreto (Vaishali & Sudarsana, 2011). La permeabilidad de los iones de cloruros depende de varios factores como la composición química, la relación agua/material cementante y materiales o minerales suplementarios. La durabilidad se hace necesaria con el fin de mejorar y mantener la resistencia del concreto a lo largo del tiempo, por lo que el diseño de mezcla debe realizarse teniendo en cuenta dichos parámetros (Dhinakaran et al., 2012).

2.3.3 Metodología de Análisis de las Propiedades

La investigación sobre los suplementos cementicios se ha convertido en tema importante en donde es necesario testear en pequeñas escalas y caracterizar los materiales con el fin de estandarizar los métodos que permitan evaluar la reactividad y demás propiedades (Juenger et al., 2019). De acuerdo con lo anterior la monografía opta por la investigación de los materiales a partir del entendimiento de su composición y propiedades físicas y químicas.

En continuación con la identificación inicial de los materiales en un nivel teórico se hace necesario una revisión a nivel práctico de los efectos producidos por los micromateriales, con el objetivo de la identificación de estudios bajo diferentes condiciones de remplazo y relaciones agua cemento, de forma que se pueda entender su comportamiento. El desempeño del concreto se evalúa en cuanto a resistencia a la compresión y durabilidad, esta última evaluada mediante penetrabilidad a los cloruros. El ensayo de resistencia a la compresión se realiza bajo la norma ASTM C39 la cual consiste en aplicar una carga axial en un tiempo, con una velocidad establecida, hasta que ocurra la falla. Por otro lado, la resistencia a la penetrabilidad de cloruros se realiza mediante la ASTM C1202, la cual busca identificar la carga que logra atravesar por el material. El ensayo consiste en monitorear la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de unas secciones en un periodo, mientras se mantiene una diferencia de potencial de 60V de corriente directa a los extremos de la sección, los cuales se encuentran sumergidos en soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio (uno a cada extremo).

Adicional al desempeño de los concretos con micromateriales se tendrá en cuenta el análisis de la composición química, obtenido mediante rayos X o por información directa de los proveedores del material y la trabajabilidad medida mediante el asentamiento del concreto o slump. El slump se rige por la ASTM C143, la cual consiste en consolidar mediante varillado una muestra de concreto en estado fresco en un molde de cono truncado, este se levanta y se mide la distancia vertical del desplazamiento del cemento.

2.3.4 Normativa Para el Uso de Micromateriales

Microsílice

Para el uso de la micro sílice se debe hacer una prueba de análisis químico completo y de distribución de tamaño de partícula, los resultados de estas deben estar en concordancia con lo estipulado en la norma ASTM C1240 o en el caso de Colombia la NTC 4637, estas normas determinan los ensayos necesarios para conocer la procedencia del material, sus procedimientos y a su vez cuales son los requisitos químicos y físicos mínimos para su uso en concretos.

Tabla 2. Requisitos químicos para el uso de microsílíce.

Requisitos	Valor/Rango especificado
Contenido de SiO ₂	Min 85%
Humedad	Max 3%
Pérdida por ignición	Max 6%

Fuente: (ASTM, 2005)

Tabla 3. Requisitos físicos para el uso de microsílíce.

Requisitos	Valor/Rango especificado
Ret. en Tamiz 45 µm	Max 10%
Índice de actividad puzolánica a 7 días	Min 105%
Superficie específica	Min 15 m ² /g

Fuente: (ASTM, 2005)

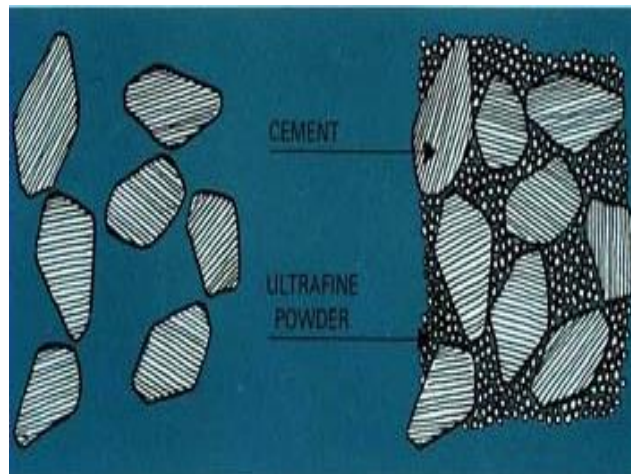


Ilustración 6. Dispersión espacial del microsílíce dentro de los vacíos entre granos de cemento

Fuente: (SFA, 2014)

Debido al diminuto tamaño de las partículas de microsílíce, la estructura cristalina formada por esta reacción llena los espacios vacíos entre los granos de cemento en la microestructura del concreto fresco. Esto aumenta la densidad de la estructura del concreto y resulta en un aumento de resistencia de entre 20 a 50% y una disminución de hasta 10 veces su permeabilidad. Aparte de esto, también evita la segregación, mejora la cohesión del concreto y su bombeabilidad (Mejía, 2011).

Cenizas volantes

Estas partículas, así como los micromateriales mencionados anteriormente deben pasar una serie de pruebas antes de su uso como suplemento o reemplazo en una mezcla de concreto, esto con el objetivo que cumpla unos requisitos químicos y físicos que establece la norma ASTM 618-03 y su equivalente en Colombia NTC 3493.

Tabla 4. Requisitos físicos para el uso de cenizas volantes.

Requisito	Clase		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida en malla húmeda 45µm (No.325) (max %)	34	34	34
Strength activity index: Con cemento portland a 7 días (min % control)	75	75	75
Con cemento portland a 28 días (min % control)	75	75	75
Requerimiento de agua (max % control)	115	105	105
Estabilidad: expansión o contracción en autoclave (max %)	0.8	0.8	0.8
Requerimientos de uniformidad Densidad: máxima variación con respecto al promedio (max %)	5	5	5
Porcentaje retenido en malla 45 µm (No. 325): máxima variación con respecto al promedio (max %)	5	5	5

Fuente: (ASTM, 2003)

2.4 MICROMATERIALES REACTIVOS

2.4.1 Microsílice Como SCMs

El microsíllice (MS) se define como un dióxido de silicio en forma de partículas no cristalinas que se obtiene de la reducción del cuarzo de alta pureza (López, J. F., 2015). Se compone de esferas de dióxido de silicio (SiO_2), que son producidas en hornos de arco eléctrico como subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio (ACI, 2000). La reducción de cuarzo a silicio a temperaturas sobre 2000°C produce vapores de SiO los cuales se oxidan y condensan en las zonas de baja temperatura a pequeñas esferas de microsíllice (Bhatty et al, 2011). De aquí el nombre alterno para el material – “Humo de sílice o vapores de sílice”.

El área superficial específica de esta mineral ronda entre 20,000 y 25,000 m^2/kg y un contenido de SiO_2 de aproximadamente 90% (Bhatty et al, 2011). Además, este tiene una gravedad específica de

aproximadamente 2.2 gr/cm^3 (ACI, 2000). El microsílíce también cuenta con un tamaño de partícula aproximado de $0.14 \mu\text{m}$, es decir, es 100 veces más pequeño que el grano promedio de cemento. Todas estas características aportan a que el microsílíce sea considerado una puzolana altamente reactiva cuando se usa en concretos, dándole ventaja sobre las mezclas comunes. (SFA, 2014).

El humo de sílice es un micromaterial altamente manufacturado por la industria: Energética, automovilística, aeroespacial y de construcción, por lo que debido a su gran demanda su precio es elevado (A. P. Gidde, et al. citado en Olalekan & Mangat, 2018). En Colombia, no se produce microsílíce nacional, por tanto, las empresas que lideran la industria son del exterior, y exportan dicho material para su comercialización en Colombia, entre estas están, SIKA, Master builders y Toxement, sin embargo, no hay datos publicados sobre la cantidad de producción de este mineral. En términos globales, la industria productora de microsílíce está proyectada a alcanzar un tamaño de mercado de \$701.6 millones de dólares para 2025 teniendo en cuenta un CAGR de 4.5% durante 2020-2025 (IndustryARC, 2021).

Microestructura, reactividad y resistencia a la compresión

La microsílíce (MS) es un material altamente puzolánico (Muñoz Pérez et al., 2021) Está compuesto principalmente e incluso exclusivamente por SiO_2 con un tamaño de partícula altamente fino y una alta reacción puzolánica (Lothenbach et al., 2011). Al ser agregado al concreto se dan dos eventos: reacción puzolánica y efecto filler (Sequeira, 2021). El efecto puzolánico se da al entrar en contacto con el concreto, lo que provoca una reacción con el hidróxido de calcio (CH) que es producto de la reacción de los silicatos con el agua, es decir, la sílice provoca una reacción puzolánica que permite una disminución en la cantidad de hidróxido de calcio lo que permite paralelamente la formación de silicato de calcio hidratado (C-S-H) producto que permite una disminución en la porosidad de la matriz. El efecto filler provoca mejoras en la microestructura del concreto al ocupar espacios, generando zonas de nucleación para el desarrollo de la hidratación (Mondal et al., 2010) (Canul Polanco, 2017) (Sequeira, 2021). Además, la adición del humo de sílice acelera la tasa de hidratación en las primeras horas (Sequeira, 2021).

Como consecuencia del tamaño de la partícula de microsílíce se produce un incremento en la velocidad de reacción, la resistencia inicial y durabilidad del concreto adicionado (López, J. F., 2015). En un ensayo SEM se logró identificar que las partículas del humo de sílice tienen formas esféricas (Srinivasreddy et al., 2013). En el análisis de difracción de rayos X realizado por Srinivasreddy et al. (2013) se observó un gráfico con curvas suaves y amplias indicando una estructura amorfa

El microsílíce permite el aumento en el desarrollo de resistencia a la compresión del concreto gracias al efecto filler que se produce a nivel microestructural llenando los vacíos enlazando las partículas de pasta y agregado (Bhanja & Sengupta, 2005).

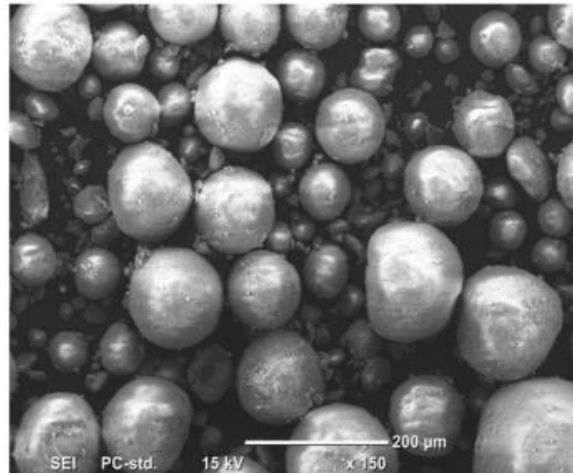


Ilustración 7. Imagen SEM de muestra de microsílíce.

Fuente: (Srinivasreddy et al., 2013)

2.4.2 Cenizas Volantes Como SCM

Las cenizas volantes (CV) son partículas finamente divididas producto de la combustión de carbón pulverizado utilizado en centrales termoeléctricas a temperaturas cercanas a 1600 °C que es transportado por gases de combustión. Este está compuesto generalmente en mayor proporción por alúmina (Al_2O_3), Óxidos de hierro (Fe_2O_3) y sílice (SiO_2), que se presentan en forma de óxido y representan hasta el 90% de la totalidad de las partículas de cenizas volantes (ACI, 2002).

Las cenizas volantes pueden tener diferentes características debido a la heterogeneidad del material, por lo que sus propiedades finales dependen del tipo de carbón que las produce y la temperatura (Valderrama et al., 2011). Las CV se clasifican en tres categorías distinguiéndose por el tipo de mineral del cual se producen las cenizas volantes: Clase N, Producidas a partir de puzolanas puras o calcinadas naturalmente; Clase F, Producidas por la quema de antracita o carbón bituminoso; Clase C, Cenizas volantes producto de lignito o carbón sub-bituminoso (ASTM, 2003).

Las propiedades físicas y químicas de este micromaterial dependen del tipo de carbón usado, la tecnología empleada para el quemado, pulverización del carbón y la recolección de la ceniza. La gravedad específica de las cenizas volantes varía usualmente entre 2.2 y 2.8 gr/cm^3 , cerca de $\frac{2}{3}$ de la

gravedad específica del cemento. Sin embargo, su área superficial es similar a la del cemento, con 200 m²/kg (ACI, 2002). Finalmente se establece que el efecto positivo de las cenizas volantes sobre el concreto no se da producto de su área superficial, sino por el tamaño de sus partículas, que en este caso puede tener diámetros entre 1 μm y 150 μm (CEDEX, 2011).

Las características geográficas de Colombia lo hacen un país rico en yacimientos de carbón, y naturalmente con el fin de generar energía se opta por el proceso de combustión del carbón en centrales térmicas a lo largo del país, y al realizar dicha combustión el carbón produce las ya mencionadas “cenizas volantes” (Chavez & Guerra, 2015).

Debido a esto a nivel nacional hay múltiples empresas que comercializan este micromaterial como: Ovnicom S.A.S, Cimafe S.A.S y Enel S.A, estas obtienen el material de quemadores de centrales termoeléctricas y prácticamente abastecen la totalidad del mercado nacional. Sumado a esto la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) en el año 2020 estimó que la demanda de energía eléctrica tendrá un aumento anual entre 2.68% a 3.05% para el periodo 2021-2035, este aumento provocará a su vez una mayor necesidad de quema de carbón en las termoeléctricas y más residuos de cenizas volantes que pueden ser aprovechados en la industria. En la perspectiva global, el mercado de cenizas volantes movió 32.83 billones de dólares en 2021 y se proyecta que llegará a 45.73 billones en 2028, con un CAGR de 4.8% (Jamdade, 2021).

Microestructura, Reactividad y Resistencia a la compresión

La ceniza volante es una puzolana que permite concretos con altas resistencias, mejoras en la durabilidad, trabajabilidad, sus propiedades son similares a las de las puzolanas naturales (Sathawane et al., 2013). El efecto puzolánico de este micromaterial dependerá de sus componentes y su finura, por lo que la reactividad de este micromaterial aumentará gracias la molienda, permitiendo mejores desempeños con un menor contenido de reemplazo (Valderrama et al., 2011). Como material suplementario permite el desarrollo de concretos sustentables no solo por la reducción en el uso de cemento, gracias al reemplazo de un 50-60%, sino también por requerir una menor demanda de agua (Wang & Park, 2015).

La ceniza volante se puede definir como materiales heterogéneos que contienen partículas de diferentes formas y tamaños (tanto regulares como irregulares). Las irregulares consisten principalmente de aglomerados, cuarzo e inquemados de carbono, en cambio, las partículas regulares son esféricas (Ferrosferas, cenosferas y plerosferas) (Komljenovic et al, 2010), estas formas pueden ser apreciadas usando la técnica SEM (Ilustración 7).

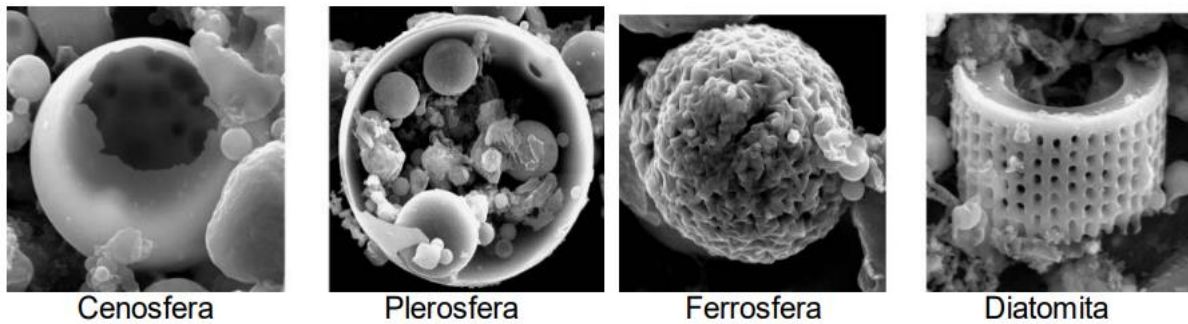


Ilustración 8. Morfología de las cenizas volantes

Fuente: (Komljenovic et al, 2010)

En su composición principalmente se encuentran compuestos de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), pero también presenta compuestos de óxido de magnesio (MgO), calcio (CaO), sulfatos (SO_3) en una menor proporción (Valderrama et al., 2011). Las partículas de ceniza volante se caracterizan por su forma esférica o cenosferas huecas (López, J. F., 2015). En el ensayo SEM se logró visualizar las formas esféricas de las partículas de ceniza volante (Srinivasreddy et al., 2013).

Referente a la trabajabilidad la Adición de ceniza volante produce una aceleración en el proceso de hidratación (Wang & Park, 2015) y mejoras en la trabajabilidad (Valderrama et al., 2011). Sin embargo, gracias a el reemplazo del cemento por ceniza volante y la dilución del cemento se mostrarán sus efectos en desarrollo de resistencia mucho después en el proceso de hidratación (Zamudio & Quiroga, 2018).

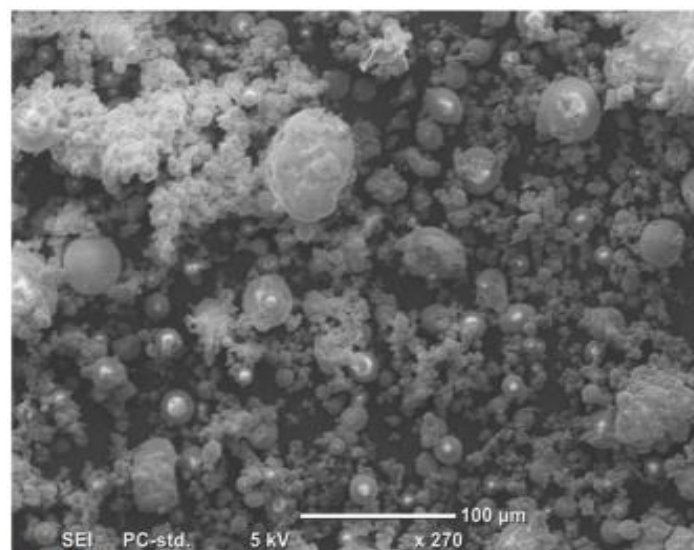


Ilustración 8. Imagen SEM de muestra de ceniza volante.

Fuente: (Srinivasreddy et al., 2013)

El concreto con ceniza volante no muestra una mayor resistencia temprana que la del concreto, por lo que es menor, sin embargo, la resistencia tardía del concreto con material suplementario en un 45-55% y una relación agua material cementante menor muestra un mejor desarrollo de resistencia la del concreto (Wang & Park, 2015).

2.4.3 Metacaolín Como SCM

El metacaolín ($Al_2Si_2O_7$) (MK por sus siglas en inglés) es un aluminosilicato que está compuesto en un 96.5% por Al_2O_3 y SiO_2 y ha sido activado térmicamente producto de calcinar un mineral arcilloso llamado caolinita a temperaturas de entre 500 y 600°C. Aproximadamente a esta temperatura se logra una transformación de su estructura cristalina, ocasionada por la rotura de los enlaces de Van der Waals (OH) (Restrepo et al, 2006).

Entre sus propiedades resalta su color, que al ser blanco le da ventaja sobre otros micromateriales ya que permite su uso en aplicaciones arquitectónicas especiales y para producción de cemento blanco adicionado (Restrepo et al, 2006). A su vez este material tiene una forma de partícula laminar y estas tienen tamaños entre 0.5 μ m y 5 μ m (Zamudio & Quiroga, 2018). El MK también cuenta con un área superficial de entre 15,000 a 18,000 m²/kg y una gravedad específica promedio entre 2.4 y 2.6 gr/cm³ (Bhargav & Kumar, 2017).

Al ser absolutamente necesario para la obtención del metacaolín un mineral específico, este solo es producido en ciertos países del mundo, entre sus mayores productores se encuentran Estados Unidos, China e India. En términos de volumen, la demanda en 2012 fue de 250,000 toneladas, siendo la industria de la construcción la que consumió el 50% de este producto con un valor estimado de 48 millones de dólares (FastMarkets, 2017). Sumado a esto, el valor total estimado del mercado en 2012 era 124.2 millones y el crecimiento esperado para 2020 fue superado ampliamente por más de 600 millones, llegando a estar valorado en 756.87 M y con un crecimiento esperado para 2028 del 4.9% (Jamdade, 2021).

Microestructura y Reactividad

El metacaolín se puede considerar como un material relativamente nuevo en la industria de la construcción (Narmatha et al., 2016). La incorporación de metacaolín como suplemento cementicio en los concretos produce una microestructura más densa de la pasta con menor porosidad total y tamaño de poros en comparación con el concreto simple tradicional e incluso con el concreto adicionado con microsílíce (Güneyisi et al., 2012). La reacción puzolánica que se produce gracias a este material cambia la microestructura de concreto al consumir los CH y producir silicatos de calcio hidratado adicionales

(CSH) (Narmatha et al., 2016). El MK gracias a su tamaño de partícula y su actividad hidráulica, logra superar el efecto de la dilución, contribuyendo al calor de hidratación y al desarrollo de resistencia en edades más tempranas (Zamudio & Quiroga, 2018).

Resistencia a la compresión y Durabilidad

El uso del metacaolín como material suplementario le confiere al concreto mejoras en sus propiedades mecánicas como el aumento de la resistencia a la compresión (Vergara, K., 2015). La producción de silicatos de calcio hidratado produce el aumento de la resistencia, disminución en la porosidad y mayor durabilidad (Narmatha et al., 2016). Un ejemplo de esto se da con un concreto con Metacaolín como suplemento en un 5 a 15%, el cual muestra resistencias superiores en 39 y 44% frente a concretos de 62 a 86 MPa a los 28 días. Se da un aumento a la tracción y compresión, con un concreto con Metacaolín en un 15% se muestran resistencias de 4.39 Y 5.92 MPa (Güneyisi et al., 2012). Un ejemplo del aumento en la resistencia se pudo observar en la prueba realizada por Duan et al. (2013) en donde al usar Metacaolín aumentó la resistencia a la compresión.

El metacaolín como adición en un 5-15% mejora la microestructura de poros del concreto permitiendo una menor absorción inicial de la superficie, esto se debe gracias a reacción puzolánica en donde el hidróxido de calcio libre de la hidratación del cemento se consume y produce silicatos de calcio. Pero la porosidad disminuye hasta con un contenido del 10% pero aumenta con contenidos superiores. También con un contenido de 15%, la permeabilidad de gases se reduce en un 52-56%, esto se debe a la porosidad reducida gracias al tamaño de las partículas de metacaolín. En el metacaolín también se da una reducción en la absorción de agua y porosidad (Juenger & Siddique, 2015).

2.4.4 Cenizas de Cáscara de Arroz Como SCM

Las cenizas de cáscara de arroz (CCA) es un micromaterial que se obtiene como producto de la combustión de la cascarilla de arroz, está a al quemarse a aproximadamente entre 550 y 700°C deja como residuo 17.8% de cenizas con una concentración de aproximadamente 94.5% de Óxido de silicio (SiO_2) (Varón, 2005) (Zareei et al, 2017).

Al ser el arroz un alimento producido en prácticamente todo el mundo y a su vez procesado de maneras distintas en cada locación provoca un amplio rango de propiedades en las CCA. En el caso de su tamaño de partícula esta llega a medir entre 5 y 42 μm (Hu et al, 2020) (Siddique et al, 2015), el área superficial se encuentra en rangos de 18,890 a 288,000 m^2/kg (Siddique et al, 2015) (Min-Hong et Mohan, 1996) (Chandrasekhar et al, 2003) y finalmente tiene una gravedad específica que ronda entre 1.98 y 2.23 (Rukzon et al, 2009) (Chindaprasirt et al, 2007).

Debido al consumo masivo de arroz, la reutilización de la cascarilla puede considerarse una oportunidad para el cuidado del medio ambiente, ya que solo en Colombia en el segundo semestre de 2021 se produjo 2,117,930 toneladas de arroz (DANE, 2022), y con un 20-25% correspondiente al peso de la cascarilla (Llanos et al, 2016), se estima que se produce aproximadamente 500,000 toneladas de desperdicios, los cuales no están siendo aprovechados en su totalidad. Para países asiáticos como India, el cual se ubica como un gran productor de arroz, el uso de este material de desecho en la industria del concreto soluciona dos problemas: gasto energético y, problemas en la disposición de los residuos (Sathawane et al., 2013). Además, al tener en cuenta la producción mundial que según la FAO será de 520.3 millones de toneladas en el primer semestre de 2022, la producción colombiana no representa ni un 0.5% sobre la totalidad (FAO, 2022).

Microestructura y Reactividad

La ceniza de cascara de arroz ha sido usada gracias a su reactividad como material puzolánico que permite mejora en la microestructura en la zona interfacial entre la pasta y el agregado (Siddique et al, 2016). Está compuesta por sílice amorfa, el cual al ser un material altamente reactivo provocará una mejora en la resistencia y durabilidad del concreto (Srinivasreddy et al., 2013). La CCA está compuesta principalmente por sílice amorfo, componente con gran área superficial y propiedades puzolánicas (Sathawane et al., 2013), la sílice reacciona con el hidróxido de calcio y forma geles adicionales de (C-S-H). El tamaño de las partículas de ceniza de cáscara de arroz depende del enfriamiento que ocurre luego de la combustión, siendo este inversamente proporcional, por lo que se obtendrá tamaños mayores con un menor tiempo de enfriamiento, la finura del material será necesaria para el efecto puzolánico (Bapat, 2013). En un ensayo SEM (Ilustración 9.) se logró identificar que las partículas de la ceniza de cáscara de arroz tienen formas irregulares, forma que afecta considerablemente las propiedades finales del concreto (Srinivasreddy et al., 2013).

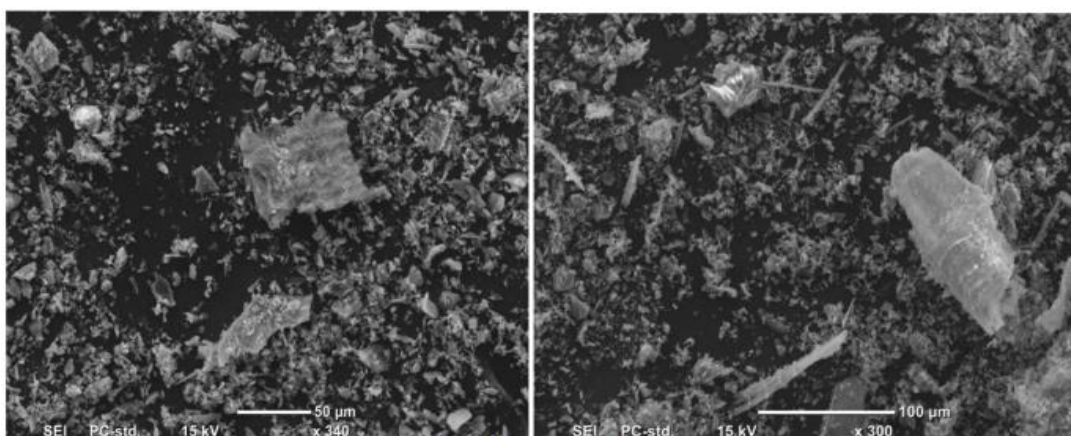


Ilustración 9. Imagen SEM de muestra de ceniza de cáscara de arroz (Srinivasreddy et al., 2013)

Fuente: (por Srinivasreddy et al., 2013)

Por otro lado, en el análisis de difracción de rayos X también realizado por Srinivasreddy et al. (2013) se logra identificar para la ceniza de cáscara de arroz curvas suaves y amplias indicando una estructura amorfa de manera similar a como ocurre con la microsílice. El estudio muestra que la sílice se presenta principalmente en una forma amorfa, confirmando propiedades altamente reactivas que mejoran su resistencia y durabilidad.

Trabajabilidad

La CCA tiene gran área superficial debido al sílice amorfo que incurrirá en un material áspero, lo que implica que requiere mayor demanda de agua, al ser un micromaterial altamente poroso la trabajabilidad del concreto será afectada con su implementación (Bapat, 2013) (Sathawane et al., 2013) por lo que para obtener concreto óptimos con CCA será necesarios controlar la molienda y agregar superplastificante a la mezcla (Bapat, 2013). La ceniza de cascara de arroz no desarrolla buena resistencia a edades tempranas, debido a la reducción en la disponibilidad de agua, ya que la CCA absorbe gran cantidad durante el mezclado lo que la hace estar disponible a edades tardías para mantener la hidratación del cemento (Siddique et al., 2016).

Resistencia a la Compresión y Durabilidad

El desarrollo de resistencia del material se le atribuye al efecto filler (Siddique et al., 2016). La ceniza de cáscara de arroz incrementa la resistencia a la compresión como consecuencia del grado de finura de las partículas y efectos puzolánicos que permiten llenar los vacíos formando enlaces más fuertes entre las partículas de C-S-H (Srinivasreddy et al., 2013). También se ha demostrado que las cenizas de la cáscara de arroz en un 15% se puede usar como reemplazo parcial al cemento, sin afectar la resistencia a la compresión y aumentado en un 9% la resistencia a la tensión por división y al usarla como reemplazo parcial del cemento en un 5-30% se obtienen también mayores resistencias a la compresión a los 28 y 91 días (Juenger & Siddique, 2015) (Zerbino et al., 2012).

En la implementación de la ceniza de cáscara de arroz se logra una reducción en la absorción de agua la porosidad. Las partículas pequeñas de la CCA mejoran el empaquetamiento de las partículas, haciendo una matriz más densa que reduce el volumen de poros (Siddique et al., 2016).

2.4.5 Escorias Granuladas de Alto Horno Como SCM

La escoria granulada de alto horno (EG) es un subproducto de la producción del arrabio, este es el único micromaterial analizado que no está compuesto mayormente por SiO_2 (34.07%), su mayor componente es el CaO (38.58%) y en menor medida Al_2O_3 (11.95%) (Castellano, 2011). Sin embargo, la composición química de la escoria varía levemente dependiendo de los minerales usados para la

producción del arrabio. El tamaño de partícula de este residuo industrial llega a ser menor a $45\mu\text{m}$ luego de la molienda, con un área superficial ronda entre 400 y $600\text{ m}^2/\text{kg}$, (Cabrera et al, 2016) además este tiene una gravedad específica aproximada de $2.81\text{-}2.94\text{ g/cm}^3$ (El-Chabib, 2020).

Este micromaterial es producido durante el proceso de limpieza de impurezas de los minerales que componen el arrabio, separando el hierro de las impurezas. Finalmente, a unos 1500°C la composición de ambos productos evoluciona y llega a la parte baja del horno en estado líquido, fluyendo hacia afuera del mismo y se separan definitivamente por diferencia de densidades (Castellano, 2011). Posterior a esto, para obtener la escoria granulada se somete a un proceso llamado granulación, en este se enfría bruscamente la escoria líquida con un jet de agua fría (López, J. F., 2015). Este proceso dispersa la escoria en partículas pequeñas similares a la arena y otorga la alta reactividad a la escoria. Finalmente, esta misma se debe secar y moler hasta que obtenga una finura similar a la del cemento (Castellano, 2011).

Al ser la EG un residuo del proceso siderúrgico, este micromaterial es relativamente sencillo de obtener en su estado básico, sin embargo, los procesos de preparación y molienda no son realizados por todas las empresas y son pocas en Colombia las que tienen recorrido y confiabilidad ofreciendo este producto, como es el caso de la Acería Paz del Río. La producción mundial de arrabio en 2019 fue de 1,281,998 mil toneladas métricas, esto representa un aumento del 2.33% respecto a 2018 (Statista, 2020). Teniendo en cuenta que se estima una producción de entre 300 a 600 kg de escoria por cada tonelada de arrabio producida, se puede asumir una producción de entre 384,599 y 769,199 mil toneladas de escoria producida mundialmente (Castellano, 2011). Sumado a esto, se estima un crecimiento mundial con un CAGR de 8.52% durante los años 2021-2025 (SpendEdge, 2021).

Microestructura, Reactividad y Resistencia a la Compresión

Las escorias de alto horno tienen como componente principal partículas de aluminosilicato de calcio con formas amorfas. Como efecto de su composición mediante agua y activadores, se produce la hidratación de la escoria de forma similar a la hidratación que ocurre con el cemento portland (López, J. F., 2015). Las escorias permiten el efecto filler llenando los vacíos en la microestructura del concreto aumentando la compactación (Abd El-Hakim et al., 2021).

La escoria tiene una estructura morfológica única debido a su angularidad, esta forma mejora la conexión entre la pasta y el agregado, aumentando la resistencia a la compresión y reduciendo los vacíos de un concreto adicionado con este material. Un concreto con escoria como suplemento cementicio se comporta como unidad siendo más resistente (Abd El-Hakim et al., 2021).

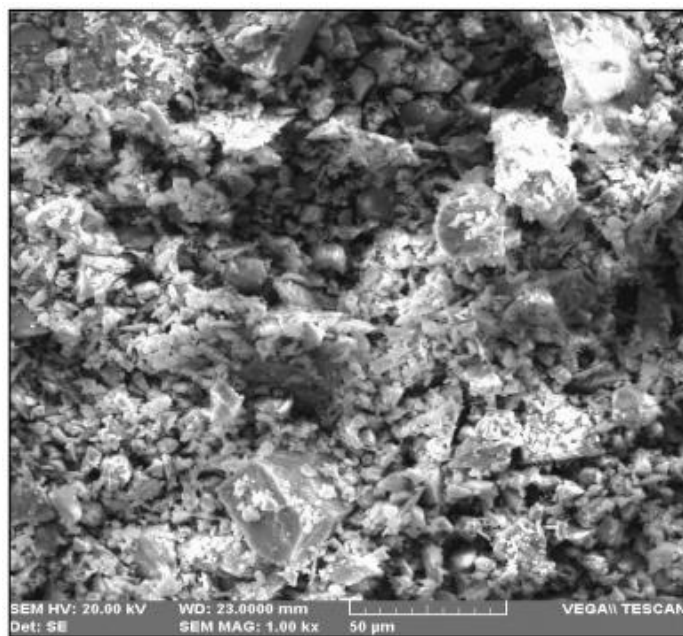


Ilustración 10. Microscopía electrónica de la Escoria (Cruz. E., 2018)

Fuente: (Cruz, 2018)

2.5 ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS

Para el análisis de las propiedades físicas se tendrán en cuenta 3 filtros, 1. Análisis de la facilidad de producción y/o obtención del micromaterial en el territorio colombiano; 2. Comparación de tamaño de partículas, áreas superficiales y composición química.

2.5.1 Análisis de la Facilidad de Producción y/o Obtención de Micromateriales en el Territorio Colombiano

El primer filtro tiene como finalidad establecer la factibilidad del uso de los micromateriales dentro de la industria colombiana. Para esto se tendrá en cuenta el método de producción, temperatura a la cual se produce y la dificultad de obtención si es un producto exportado.

El MS puede ser uno de los micromateriales más difíciles de producir a pesar de que se obtiene como subproducto en la producción de silicio y ferrosilicio, que son dos materiales con mucha demanda en el mercado global por diferentes motivos, esto se debe a que necesita alcanzar temperaturas de más de 2000°C en un horno de arco eléctrico para lograr obtener el vapor de sílice. Sin embargo, a pesar de que este sea un proceso arduo y que no se realiza en el territorio nacional, debido a la gran demanda de

MS como suplemento en mezclas de concreto este es relativamente fácil de conseguir por medio de importaciones.

A pesar de que la EG sea un subproducto de una industria tan demandada como la siderúrgica y de tener una temperatura de producción menor que el MS (1500°C), en Colombia apenas existe una empresa conocida y capacitada para su producción. Debido a esto, no tiene mucha facilidad de obtención, aunque sea un producto nacional.

En el caso de las CV que tienen una temperatura de producción cercana al MS (1600°C), su obtención es más sencilla. Como este se crea como derivado de la combustión de carbón en centrales termoeléctricas colombianas es un SCM relativamente abundante, sin embargo, con las nuevas propuestas de implementación de energías limpias, su producción puede decrecer en un futuro.

De manera similar a las cenizas volantes, las CCA podrían obtenerse fácilmente ya que son producidas a partir del desperdicio en el procesamiento del arroz, el cereal más consumido y abundante a nivel mundial (FAO, 2014). Sumado a esto su temperatura de producción no es tan elevada (550°C-700°C), y por tanto no se necesita maquinaria específica para la combustión de la cascarilla. Por otro lado, las CCA presentan el inconveniente de no tener uniformidad en sus propiedades físicas, esto dado que estas dependen del suelo donde se cultive, el clima y los nutrientes que reciba. (Habeeb,2010) Esta incertidumbre crea un espectro de comportamientos amplio como material reactivo, ya que no hay uniformidad de resultados y estos pueden variar según el productor o incluso el lote producido de un mismo lugar.

Finalmente, el MK es el micromaterial que más dificultades presenta para su obtención, a pesar de que su temperatura de producción es la menor (500°C-600°C), para su adquisición es necesario la extracción de caolín de las minas, para su posterior calcinación. Sumada a esto, existen pocos productores de MK en Colombia y su importación es compleja.

2.5.2 Comparación de Tamaño de Partículas, Áreas Superficiales y Composición Química

Un gran número de estudios han reportado que la actividad puzolánica depende básicamente de tres factores: Contenido de sílice, área específica y tamaño de partícula (Cordeiro et al, 2011). Por tanto, el siguiente filtro busca establecer qué combinación de propiedades físicas y químicas resultan en una reacción positiva en el concreto.

En el caso del tamaño de partícula, entre menor sea este, se llenarán mejor los espacios vacíos entre la pasta de cemento y las partículas de agregado fino y grueso. Esto tendrá como resultado una mayor

resistencia, durabilidad y permeabilidad. El área superficial será analizada puesto que un SMC con una alta área superficial tiene la capacidad de absorber más agua de la mezcla y a su vez reaccionar más rápido, provocando así que la relación A/MC sea mayor y el concreto tenga más resistencia. Finalmente, la cantidad de SiO_2 que contiene el micro material como base de comparación de la puzolanidad de los micromateriales.

Iniciando con el micromaterial con características más pobres se tiene las CV, esta tiene un área superficial apenas más mayor que el cemento ($300\text{-}600\mu\text{m}$) y su tamaño de partícula varía enormemente ($1\text{-}150\mu\text{m}$), por tanto, se asume que la naturaleza de su buen comportamiento puzolánico corresponde a su composición química diversa.

Similar a este es la CCA, esta tiene un rango enorme respecto a las propiedades físicas dependiendo de qué nutrientes recibió durante el cultivo del producto. Con un área superficial de 18,890 hasta 288,000 llega a ser el SCM con la mayor de estas propiedades, sin embargo, también tiene un amplio rango de tamaños de partícula promedio ($5\text{-}42\mu\text{m}$) lo cual no es conveniente para la mezcla de concreto. Sin embargo, es el SCM con mayor porcentaje de SiO_2 (94.5%).

Compartiendo características de ambos se encuentra la EG, esta tiene un área superficial en rangos ligeramente superiores a la CV, y un tamaño de partícula que depende del grado de molienda realizado, pero siempre menor a $45\mu\text{m}$. Respecto a su composición química, este es el único SCM donde el SiO_2 no es el principal componente, siendo este el CaO lo que provoca una mayor oportunidad de reacción con el SiO_2 existente al hidratarse y convertirse en CH.

En el caso del MK se observa un área superficial grande ($15,000\text{-}18,000\mu\text{m}$) y un tamaño de partícula que no supera los $5\mu\text{m}$. Esto demuestra una clara ventaja sobre los otros SCMS teniendo en cuenta únicamente los valores de propiedades físicas. Sumado a esto es el SCM con mayor sumatoria de compuestos químicos puzolánicos (96.5%).

Finalmente, el MS tiene un área superficial ligeramente mayor a el MK ($20,000\text{-}25,000\mu\text{m}$), cuenta con el menor tamaño de partícula dentro de los micro materiales estudiados ($5\mu\text{m}$) y cuenta con un elevado porcentaje de SiO_2 (90%), por tanto, se asume que este tiene mejor comportamiento puzolánico. Siendo esto respaldado por su gran uso y demanda mundial.

Tabla 5. Propiedades físicas de los micromateriales reactivos estudiados.

Micromaterial	Composición química dominante	Temperatura de producción	Área superficial (m ² /kg)	Tamaño de partícula (μm)	Gravedad específica (gr/cm ³)
Cemento	CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (95-97%)	1450°C	225-370	10.0-15.0	3.15
Microsílice	SiO ₂ (90%)	>2000°C	20,000-25,000	0.14	2.2
Ceniza volante	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y Fe ₂ O ₃ (90%)	1600°C	300-600	1-150	2.2-2.8
Metacaolín	SiO ₂ y Al ₂ O ₃ (96.5%)	500°C-600°C	15,000-18,000	0.5-5	2.4-2.6
Ceniza de cáscara de arroz	SiO ₂ (94.5%)	550°C-700°C	18,890-288,000	5.0-42	1.98-2.23
Escoria granulada de alto horno	CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ (84.6%)	1500°C	400-600	<45	2.81-2.94

Fuente: (Autores, 2022)

2.6 ESTUDIOS SOBRE MICROMATERIALES

Estudio por Sequeira, 2021

Materiales: CCA-MS-CV

En el estudio realizado por Sequeira (2021) se buscaba evaluar las propiedades de diferentes materiales suplementarios como: CCA, MS y CV (dos muestras). Se evaluaron según composición, trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad. En el ensayo de difracción de rayos X se logró identificar la composición mineralógica de los materiales mostrando composiciones diferentes para la CV1 y CV2, siendo la primera compuesta principalmente por (SiO₂) y (Al₆Si₂O₁₃) mientras que el segundo se compone principalmente de Portlandita (Ca(OH)₂). Para la CCA se tiene un alto contenido de SiO₂.

Tabla 6. Composición química de los materiales utilizados en el estudio de Sequeira Aragón (2021)

Muestra	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	LOI	Humedad
CCA	0.43	0.81	2.21	1.28	0.24	0.24	0.00	0.00	84.98	0.09	9.74	1.16
CV 1	13.15	6.61	8.63	3.98	3.65	0.24	1.96	0.05	57.40	0.74	2.32	1.68
CV 2	1.22	48.33	0.35	0.10	0.92	0.00	0.00	18.37	4.55	0.07	26.36	0.30

Fuente: (Sequeira, 2021)

Se utilizó una mezcla patrón del 310 kg/m³ con una resistencia de 5000 PSI y una relación agua cemento de 0.56 y se diseñaron muestras con contenidos de reemplazo de cemento en un 5 y 10% para MS y 15 y 25% para CCA Y CV, manteniendo la misma relación agua cemento, sin embargo, se usó superplastificante MasterGlenium 3020 de la marca BASF. En el ensayo de fluidez (ASTM C143-08) para reemplazo de 15 y 25% para las muestras de CCA fueron de 5 y 3.5 in, para CV1 de 6.25 y 5 in y CV2 de 7.5 y 8 in por lo que el menor asentamiento se obtuvo para CCA 25% y el mayor para CV2. Con excepción de la muestra de CV2 la fluidez de las muestras con reemplazo muestran menor fluidez que la muestra patrón (7.25 in) esto implicaría un mayor requerimiento de agua que provocaría pérdida de resistencia o incluir el uso de aditivos especialmente en materiales como MS y CCA que son micromateriales porosos con gran área superficial.

Tabla 7. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Sequeira Aragón (2021)

Material	a/mc	Fluidez (in)	Fluidez (cm)
Concreto patrón	0.56	7.25	18.415
CCA 15%	0.56	5	12.7
CCA 25%	0.56	3.5	8.89
MS 5%	0.56	6	15.24
MS 10%	0.56	5	12.7
CV1 15%	0.56	6.25	15.875
CV1 25%	0.56	5	12.7
CV2 15%	0.56	7.5	19.05
CV2 25%	0.56	8	20.32

Fuente: (Sequeira, 2021)

Por otro lado, en el mismo ensayo se estudió la resistencia a la compresión a los 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días, los resultados. Para los 3 y 7 días ninguna muestra con material suplementario superó la resistencia de muestra patrón (3990 Y 4350 PSI). Para el día 14 la resistencia del MS 5% (5130 PSI) superó la muestra patrón (4980 PSI). Para el día 28 las muestras con contenidos de MS mostraron resistencias superiores (5570 y 5680 PSI), a la de la muestra patrón (5490 PSI). Sin embargo, para la prueba a los 56 días ninguna muestra superó la resistencia del concreto patrón (6720 PSI). Finalmente, a los 90 días se obtuvieron mejores resultados para la resistencia a la compresión con cuatro muestras con resultados superiores: MS 5 Y 10% (6700, 6840 PSI), CV1 15% (6710 PSI) y CCA 15% (6660 PSI).

Tabla 8. Resistencia a la compresión en el estudio de Sequeira Aragón (2021)

Edad	Resistencia a la compresión (MPa)					
	3	7	14	28	56	90
Material						
Concreto Patrón	28	30	34	38	46	45
CCA 15%	21	23	28	36	40	46
CCA 25%	18	20	25	32	38	40
MS 5%	27	30	35	40	46	46
MS 10%	26	28	33	39	45	47
CV1 15%	15	19	26	32	41	46
CV1 25%	12	14	18	20	26	34
CV2 15%	21	24	28	30	36	38
CV2 25%	16	20	27	24	30	34

Nota: Datos originales en PSI

Fuente: (Sequeira, 2021)

Según la teoría del reemplazo para el humo de sílice los contenidos óptimos varían entre 3 y 5% en donde se finalizan las reacciones puzolánicas por falta de portlandita por lo que de acuerdo con los resultados obtenidos y la poca variación en la resistencia se sugiere en uso de MS con un contenido de reemplazo del 5% (Sequeira, 2021).

De acuerdo con los resultados obtenido para la ceniza volante solamente se obtuvieron resultados favorables para el ensayo a los 90 días manteniéndose los en los ensayos anteriores con valores muy por debajo de la muestra patrón, implicando que la adición de ceniza volante no solo no está aportando a la resistencia a edad temprana, sino que, por el contrario, está influyendo en su disminución, especialmente para la muestra con contenido de CV1 25% y CV2 15 y 25%. En la prueba a los 90 días las muestras lograron superar la muestra patrón con un contenido de CV1 15% indicando una reacción puzolánica tardía, que pudiera estar influenciada por la finura de las partículas y demostrando que un contenido de reemplazo mayor a 15% provoca la disminución en la resistencia y no son óptimos. Para el caso del CV2 ninguna de las muestras logró superar la muestra patrón lo que confirma la influencia de la cantidad de sílice para la reacción puzolánica que para el caso era baja, y el alto contenido de cal.

Por parte del ensayo a la penetración de iones de cloruro se obtuvieron resultados variados. El resultado para la muestra patrón fue de baja penetrabilidad. La muestra con MS 10% y CCA 25% mostraron una permeabilidad a iones de cloruro Muy baja (874 Y 979 culombios). Para las muestras de CV1 se obtuvieron valores muy superiores a la muestra patrón (4172 Y 6015 para reemplazo de 15 y 25%), en el resto de muestra el resultado se mantuvo en una penetrabilidad de iones de cloruro bajo.

Tabla 9. Resistencia a la compresión en el estudio de Sequeira Aragón (2021)

	Carga (C)	Penetrabilidades de cloruro
Edad	90	
Material		
Concreto patrón	1842	Bajo
CCA 15%	1305	Bajo
CCA 25%	979	Muy Bajo
MS 5%	1388	Bajo
MS 10%	874	Muy Bajo
CV1 15%	4172	Alto
CV1 25%	6015	Alto
CV2 15%	1900	Bajo
CV2 25%	2199	Moderado

Fuente: (Sequeira, 2021)

Estudio por Srinivasreddy et al., 2013

Materiales: CV

En el ensayo realizado por Srinivasreddy et al. (2013) se evaluó la mezcla de varios SCMs, sin embargo, para efectos de estudio se tendrá en cuenta solamente los ensayos con un solo material, en consecuencia, se evaluó la trabajabilidad de CV con un contenido de 30% y concreto de control. El resultado del slump fue de 130 mm siendo un resultado mucho más fluido en comparación al concreto de control con 70 mm (se usó superplastificante). Para este contenido en el ensayo a la compresión a los 3 y 7 días se obtuvieron resultados de 18.15 y 27.88 MPa para el concreto con adición de CV y 19.28 y 26.98 MPa, es decir, superó solamente al concreto de control para el día 7 lo que podría ser un indicador del desarrollo de resistencia a edad tardía.

Tabla 10. Resultados del estudio de Srinivasreddy et al. (2013)

	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Edad	7	14
Material	a/mc		
Concreto patrón	0.62	19.28	26.98
CV 30%	0.52	18.15	27.88

Fuente: (Srinivasreddy et al., 2013)

Estudio por Valderrama et al., 2011

Materiales: CV-MS

En el ensayo realizado por Valderrama et al. (2011) se analizaron diseños de concretos con suplemento de ceniza volante con contenidos de 10, 20, 30, 30% para compararlos con un concreto patrón y un concreto con MS. El componente principal de la ceniza volante es SiO₂ (56.86) y Al₂O₃ (23.51%) y para el cemento es de CaO (60.2) y SiO₂ (20.84). Para su diseño se mantuvo una relación agua-materiales cementantes de 0.5 con el fin de cumplir con el parámetro de durabilidad de la NSR-98 ítem C.4.2. por lo que se requirió el uso de superplastificante. El tamaño de partícula usada fue de 19.803 µm obtenido mediante un proceso de molienda en molino de bolas durante 45 min.

Tabla 11. Composición química de los materiales utilizados en el estudio de Valderrama et al. (2011)

Composición química	CV	Cemento
SiO ₂	56,86	20,87
Al ₂ O ₃	23,51	4,35
Fe ₂ O ₃	4,39	3,93
CaO	0,83	60,2
MgO	0,6	2,74
Na ₂ O	0,39	0,08
K ₂ O	1,4	0,23
Pérdidas por ignición	10,68	2,19
SO ₃	--	2,71
Propiedades físicas:	--	--
Densidad (g/cm³)	2,26	3,14
Tamaño de partícula (µm)	32,5	14,73
Finura Blaine (m²/kg)	--	501,8

Fuente: (Valderrama et al., 2011)

En la prueba de resistencia realizada por Valderrama et al. (2011) para los 28, 70, 100 y 130 días, se obtuvo una menor resistencia para la muestra con contenidos de CV 30% manteniéndose entre los 40 a 45 MPa por lo que se puede afirmar que el aumento en el contenido de reemplazo en un 30% provoca pérdida en la resistencia. Los ensayos indican la baja reactividad a edades tempranas para todos los ensayos. La muestra con contenido de CV 10% fue la que mostró un mejor mayor desarrollo de resistencia; a los 25 días, su resultado fue menor que la muestra con contenido de la muestra patrón, CV 20% Y MS 10%, sin embargo, a los 130 días se mostró como la muestra con mayor resistencia (63 MPa) superando las muestra con otros contenidos y el concreto patrón, implicando que tiene una reacción más lenta.

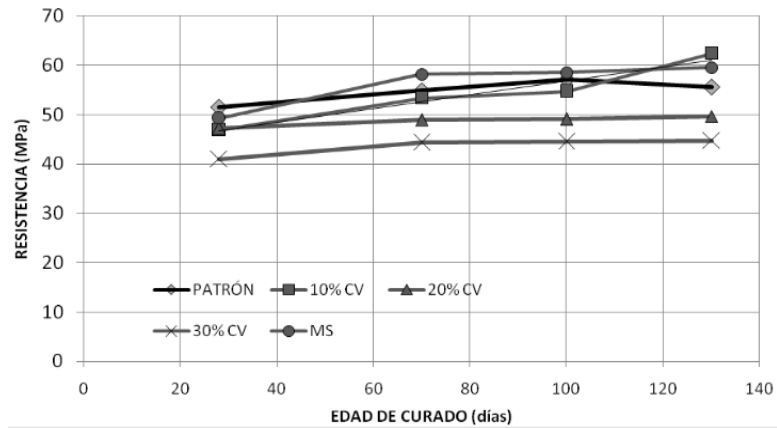


Ilustración 11. Resistencia a la compresión en el estudio de Valderrama et al., (2011)

Fuente: (Valderrama et al., 2011)

Tabla 12. Resistencia a la compresión en el estudio de Valderrama et al., (2011)

Resistencia a la compresión (MPa)						
Edad	28	56	70	90	100	130
Material						
Concreto patrón	52	53	53	54	55	56
CV 10%	46	51	54	55	56	63
CV 20%	46	47	48	49	49	50
CV 30%	40	42	43	44	44	45
MS 10%	50	55	58	59	59	60

Fuente: (Valderrama et al., 2011)

Valderrama et al. (2011) realizó la prueba de durabilidad según la ASTM C1202 para muestras a las 28, 70 y 100 días. Los resultados muestran que los diseños de concreto con materiales suplementarios presentan mayor resistencia a la penetración de cloruros. Para el caso de la durabilidad de la CV un mayor contenido de reemplazo se traduce en una mayor resistencia a los cloruros, obteniéndose así una permeabilidad alta y moderada (con cargas 4300, 2890 y 2561 culombios) para CV 30%. Por el contrario, los mayores valores de carga ocurrieron para la muestra con menor contenido de CV 10% mostrando una permeabilidad alta (5159, 3733, 3362 culombios). El material que reportó mejores resultados es el MS10% con una permeabilidad moderada (cargas de 3037, 2447 y 2051 culombios).

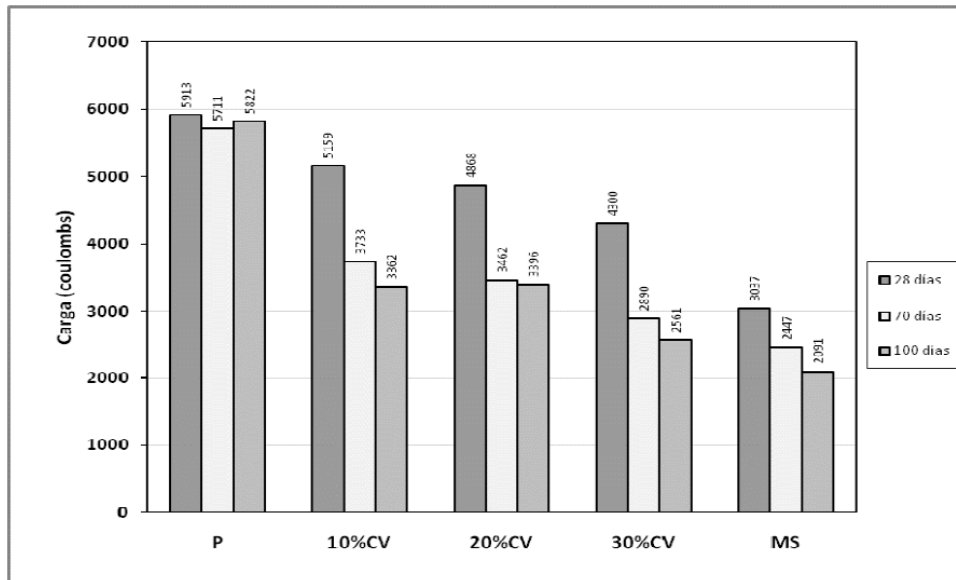


Ilustración 12. Resistencia a la compresión en el estudio de Valderrama et al., (2011)

Fuente: (Valderrama et al., 2011)

Tabla 13. Permeabilidad de iones de cloruros en el estudio de Valderrama et al. (2011)

Edad	25		70		100	
	Carga (C)	Permeabilidad iones de cloruro	Carga (C)	Permeabilidad iones de cloruro	Carga (C)	Permeabilidad iones de cloruro
Concreto patrón	5913	Alta	5711	Alta	5822	Alta
CV 10%	5159	Alta	3733	Moderada	3362	Moderada
CV 20%	4363	Alta	3462	Moderada	3396	Moderada
CV 30%	4300	Alta	2890	Moderada	2561	Moderada
MS 10%	3037	Moderada	2447	Moderada	2091	Moderada

Fuente: (Valderrama et al., 2011)

Estudio por Cruz. E., 2021

Materiales: CV-EG

En el ensayo realizado por Cruz. E. (2018) se estudió el uso de ceniza volante y escoria granulada de alto horno como materiales suplementarios en el diseño del concreto. Mediante una prueba SEM se identificó la composición, la ceniza volante está formada principalmente por SiO₂ (49,53), Al₂O₃ (22,67) y CO₂ (18,28), mientras que la escoria se encuentra compuesta principalmente por Fe₂O₃ (53,35%), CaO (5,25), SiO₂ (3,17) Y SO₃(3,17). De acuerdo con los requisitos químicos de las ASTM C618 la ceniza volante clasifica tipo C por su contenido >70% en la reacción SiO₂+ Al₂O₃ Fe₂O₃ > 70 % y contenido de CaO; la escoria presenta una ausencia de Al₂O₃ y bajo contenido de SiO₂, sin embargo, muestra alto contenido de Fe₂O₃ por lo que cumpliría con los requisitos químicos de puzolana tipo C.

Tabla 14. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Cruz. E., 2021

Análisis por compuesto	Muestras	
	EG	CV
Na₂O	000	000
MgO	000	101
Al₂O₃	000	2,267
SiO₂	317	4,953
K₂O	202	234
CaO	525	082
Fe₂O₃	5,335	390
SO₃	317	000
CoO	047	000
CuO	126	000
CO₂	000	1,828
TiO₂	000	145

Fuente: (Cruz. E., 2021)

En el ensayo a la compresión se analizó la resistencia para cada material con contenidos de 10, 20 y 30% de reemplazo, además, de un patrón concreto. El resultado de la muestra patrón fue de 254.7 kg/cm² a los 28 días. El diseño de concreto con EG 10% Y CV 20% fueron los que presentaron mejores resultados, sin embargo, los diseños de escoria y ceniza volante no superaron la resistencia del concreto patrón con ningún contenido de reemplazo de 10% (208,8 y 200.7 kg/cm²), 20% (204.7 y 222.1 kg/cm²) o 30% (200,7 y 208.8 kg/cm²). El diseño de concreto con EG 10% Y CV 20% fueron los que presentaron mejores resultados. Los resultados para la escoria reflejan un mejor comportamiento con contenidos de reemplazo menores, por otro lado, la ceniza volante mostró mejor comportamiento con un contenido medio del 20%.

Tabla 15. Resistencia a la compresión a los 28 días en el estudio de Cruz. E., 2021.

Muestra	Reemplazo %	Resistencia Kg/cm²
Cemento		254.7
EG (F)	10	209
	20	205
	30	178
CV (F)	10	201
	20	222
	30	209

Fuente: (Cruz. E., 2021)

Estudio por Torres et al. (2011)

Materiales: MK-MS

En el ensayo realizado por Torres et al. (2011) se buscaba conseguir un concreto con buen desempeño usando metacaolín como material suplementario además de compararlo con un concreto con humo de sílice. Para el estudio se utilizó un concreto de referencia con una relación agua cemento de 0.4, para mantener una relación agua-cementante se utilizó un aditivo superplastificante, calculado respecto a la cantidad de cementante. En todas las mezclas se usó un total de 450 kg de material cementante, por otra parte, para las pruebas con MK se incluyen hasta un reemplazo del 30% y hasta un 10% para el HS.

Tabla 16. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Torres et al. (2011)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Pérdida al fuego (%)	Gravedad específica (%)	Finura Blaine (m ² /kg)
Cemento	20.27	5.34	3.91	61.70	1.44	3.57	3.10	420.00
MK	52.57	44.95	1.50	-	-	0.52	2.48	-
HS	94.28	1.06	0.29	1.37	0.00	2.91	2.20	15.000-30.000

Fuente: (Torres et al., 2011)

De acuerdo con la prueba del Slump se presenta un menor asentamiento para la muestra patrón (5 cm), seguido de este la prueba se realiza con un contenido del 10% de metacaolín (9 cm). Se presentó un mismo resultado para los con contenidos de 15% de MK (10 cm) y 10% de HS (10 cm). La prueba que presentó mayor asentamiento se obtuvo con un contenido de reemplazo del 30% de MK, sin embargo, esta fluidez no es del todo óptima.

Tabla 17. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Torres et al. (2011)

Material	a/mc	Slump (cm)
Concreto patrón	0.4	5
MS 10%	0.4	10
MK 10%	0.4	9
MK 20%	0.4	15
MK 30%	0.4	20

Fuente: (Torres et al., 2011)

En el trabajo de Torres et al. (2011) también se realizó un ensayo a la compresión según la ASTM C39, en donde se obtuvo concreto adicionados con mayor resistencia al concreto de control. tanto para el concreto con MK como el de HS. El concreto de control mostró resistencia de 35 y 43 MPa a los 7 y 28 días respectivamente. Los contenidos de reemplazo fueron de 10, 20 y 30%, para cada uno se obtuvieron 38 y 45, 41 y 52 y 25 y 32 MPa para los 7 y 28 días en cada caso. Por otro lado, se obtuvieron valores de resistencias de 49 Y 58 MPa para el ensayo con Humo de sílice. El ensayo mostró que se obtienen concretos con materiales suplementarios de MK y HS, siendo el segundo un material con mayor desarrollo de resistencia a pesar de tener menor contenido de reemplazo, además de tener una alta reactividad. El trabajo de Torres et al. muestra un reemplazo del MK del 20% como el contenido óptimo.

Tabla 18. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Torres et al. (2011)

Resistencia a la compresión (MPa)		
Edad	7	28
Material		
Concreto patrón	35	43
MS 10%	49	58
MK 10%	38	45
MK 20%	41	52
MK 30%	25	32

Fuente: (Torres et al., 2011)

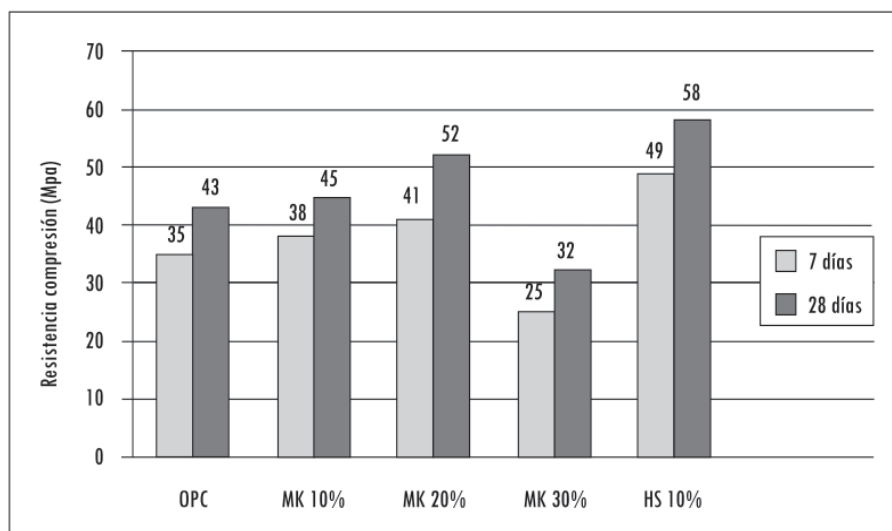


Ilustración 13. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días en el estudio de Torres et al. (2011).

Fuente: (Torres et al., 2011)

Para evaluar su durabilidad también se realizó un ensayo de permeabilidad a cloruros según la norma ASTM C1202. Los resultados se mostraron paralelos al ensayo de absorción de agua en donde se obtuvo una menor permeabilidad para las muestras con MK 10% y 20% en donde la carga fue de 622 y 410 culombios respectivamente lo cual indican una permeabilidad muy baja a los cloruros. siendo resultados menores a la muestra patrón con una permeabilidad moderada (2007 culombios) y el ensayo con HS 10% con permeabilidad baja (1295 culombios).

Tabla 19. Composición química de los materiales utilizados en el ensayo de Torres et al. (2011)

Edad	90	
Material	Carga (C)	Penetrabilidades de cloruro
Concreto patrón	2007	Moderada
MS 10%	1295	Baja
MK 10%	622	Muy Baja
MK 20%	410	Muy Baja
MK 30%	-	-

Fuente: (Torres et al., 2011)

De acuerdo con los ensayos realizados para las muestras con metacaolín y microsílíce de Torres et al. (2011), el metacaolín muestra un aumento en la resistencia en comparación al concreto patrón, no obstante muestra mejor desarrollo en su durabilidad. Por otro lado, para la muestra adicionada con microsílíce se obtienen mejores resultados en cuanto a resistencia, pero menores en durabilidad frente al metacaolín.

Estudio por Duan et al. (2013)

Materiales: MK-MS-EG

En el ensayo realizado por Duan et al. (2013) se estudió la aplicación de humo de sílice, metacaolín y escoria granulada de alto horno y se comparó su desempeño con un concreto patrón. Se realizó un análisis de la composición química de los materiales, análisis microestructural y análisis de la resistencia a la compresión y durabilidad. El concreto patrón estaba compuesto por CaO (62.6%), SiO₂ (21.35%), Al₂O₃ (4.67%) y Fe₂O₃ (3.31%). El humo de sílice estaba compuesto casi en su totalidad por SiO₂ (94.74%), MgO (1.80%) y Fe₂O₃ (1.21%). La escoria presentaba partículas de CaO (35.17%), SiO₂ (34.26%), Al₂O₃ (17.11%), MgO (6.41%) y Fe₂O₃ (1.23), por lo que cumpliría con el 70% mínimo para

aplicaciones como adición. El metacaolín se compone principalmente por SiO₂ (50.27%) y Al₂O₃ (34.46%) y demás partículas Fe₂O₃ (0.75).

Tabla 20. Composición química de los materiales usados en el estudio de Duan et al., 2013

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
Cemento	21.35	3	4.67	62.60	3.08	2.25	0.95
MS	94.74	1.21	0.90	0.32	1.80	0.52	0.57
EG	34.26	1.23	17.11	35.17	6.41	1.72	1.59
MK	50.27	0.75	34.46	0.29	-	0.21	12.65

Fuente: (Duan et al., 2013)

Las muestras se diseñaron con una relación agua material cementante de 0,5 con un contenido total de 360 kg/m³ de material cementante en donde 10% era reemplazado con materiales suplementarios. El ensayo a la resistencia a la compresión a los 28 y 180 días mostró un mejor desempeño de los concretos adicionados superando la resistencia del concreto patrón (aprox 36 y 47 MPa a los 28 y 180 días respectivamente). Para el concreto adicionado con metacaolín se obtuvieron valores cercanos a los 45 y 54 MPa mostrándose con el mejor desempeño. Los resultados con microsílíce siguieron al metacaolín con resistencias de aproximadamente 43 y 52 MPa. Finalmente, el concreto adicionado con escoria fue el que mostró menor resistencia, sin embargo, superó al concreto patrón con valores de aproximadamente 39 y 48 MPa.

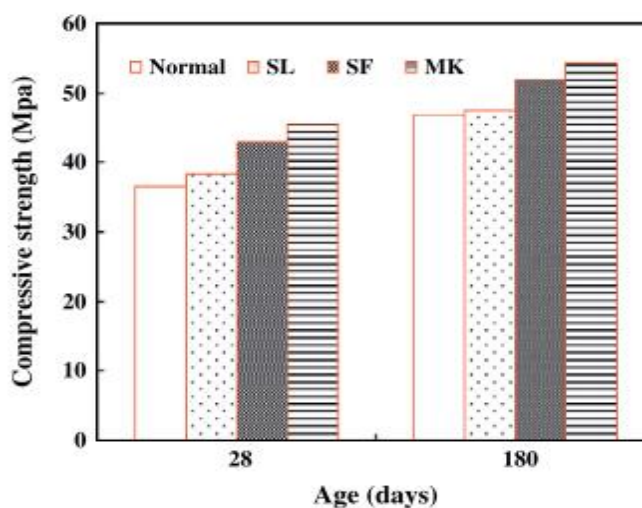


Ilustración 14. Efectos de los suplementos cementicios en la compresión a los 28 y 180 días en el estudio de Duan et al. (2013)

Fuente: (Duan et al., 2013)

Tabla 21. Resistencia a la compresión en el estudio de Duan et al., 2013

Resistencia a la compresión		
Edad	28	180
Material		
Concreto patrón	36	47
MS 10%	43	52
EG 10%	39	48
MK 10%	45	54

Fuente: (Duan et al., 2013)

Estudio por Sathawane et al. (2013)

Materiales: MS-CCA

En el ensayo realizado por Sathawane et al. se buscaba conseguir un concreto con una resistencia de 32.1 MPa manteniendo una relación agua cemento constante de 0.44 con un reemplazo de hasta un 30%. Se realizó un concreto de control, un concreto con un 30 % de reemplazo de ceniza volante y varias pruebas con contenidos diferentes que incluían también la ceniza de cáscara de arroz (CCA) como material suplementario, el contenido de ceniza volante disminuyó en un 2.5% y este contenido era suplido por la CCA en cada ensayo hasta llegar a un 15% ambos. El concreto patrón se compone de cemento principalmente con partículas de CaO (62.91%), SiO₂ (19.71%), Al₂O₃ (5.20%), Fe₂O₃ (3.73%), SO₃ (2.72%) y MgO (2.54%). La ceniza volante utilizada se compone principalmente de SiO₂ (40%), Al₂O₃ (25%), Fe₂O₃ (6%), MgO (3.71%) y CaO (2%). La ceniza de cáscara de arroz tiene principalmente SiO₂ (78.21%), Al₂O₃+Fe₂O₃ (4.43%) y MgO (4.89%).

Los resultados mostraron que se obtuvo un mayor slump para el concreto con un reemplazo de un 30% de Ceniza volante (16.92% mayor que el concreto de control) y a partir de ese valor se muestra una disminución constante para las mezclas con reemplazo con contenido de ceniza volante y cáscara de arroz (hasta 29.23% menor que el concreto de control). Estos resultados muestran que la adición de ceniza volante aumenta la trabajabilidad debido a baja cementación, sin embargo, la adición de ceniza de cáscara de arroz disminuye la trabajabilidad producto del requerimiento de agua por tener mayor área superficial.

En el trabajo de Sathawane et al. también se realizó un ensayo a la compresión, en el que se obtuvo un mejor resultado para el concreto de control con resistencias de 35.56, 39.11, 45.78, 48 y 49.78 N/mm² para los 7, 14, 28, 56 y 90 días respectivamente. Seguido del concreto de control, el concreto con un contenido de 22% de ceniza volante y 7.5% de ceniza de cáscara de arroz mostró mayores resistencias.

Las resistencias obtenidas fueron de 22.67, 34.67, 41.78 y 46.67 N/mm² para los 7, 14, 28, 56 y 90 días respectivamente.

Los resultados muestran que ninguno de los concretos y combinaciones diseñadas con materiales suplementarios presentan un desempeño mejor al concreto patrón tanto en la resistencia temprana como tardía. Sin embargo, los mejores diseños se obtuvieron con MS 25% y CCA 5% (45.78 MPa), MS 22.5 y CCA 7.5% (46.67 MPa) y MS 30% (44.89 MPa) en la resistencia tardía y MS 30% para la resistencia temprana.

Estudio por Güneyisi et al. (2012)

Materiales: MK-MS

En el estudio de Güneyisi et al. (2012) se evaluó el desempeño de concretos con adiciones de MK y MS variando la relación agua-material cementante (0.25 y 0.35) y el porcentaje de material suplementario. El concreto patrón estaba compuesto por cemento portland, principalmente por CaO (63.60%), SiO₂ (19.49%), Al₂O₃ (4.45%), Fe₂O₃ (3.38%), MgO (2.63%) Y SO₃ (2.84%). El metacaolín se compone principalmente de SiO₂ (52.68%), Al₂O₃ (36.34%), Fe₂O₃ (2.14%), CaO (0.78%) Y MgO (0.16%). Para el microsílíce predominaba el SiO₂ (90.36%) y tenía contenido de K₂O (1.52%), Fe₂O₃ (1.31%), Al₂O₃ (0.71%) y CaO (0.45). De acuerdo con la composición tanto el metacaolín como el microsílíce cumplen con el requerimiento mínimo de composición del 70%. La prueba, ensayo de diseños de concretos con MK 5%, MK 15%, MS 5% y MS 15% para las dos relaciones de agua-material cementante, además de un concreto patrón.

Tabla 22. Composición química de los materiales usados en el estudio de Güneyisi et al. (2012)

Compuesto	Material		
	Cemento	MK	MS
CaO (%)	63.60	0.78	0.45
SiO ₂ (%)	19.49	52.68	90.36
Al ₂ O ₃ (%)	4.54	36.34	0.71
Fe ₂ O ₃ (%)	3.38	2.14	1.31
MgO (%)	2.63	0.16	-
SO ₃ (%)	2.84	-	0.41
K ₂ O (%)	0.58	0.62	1.52
Na ₂ O (%)	0.13	0.26	0.45
Loss of ignition (%)	2.99	0.98	3.11
Gravedad específica	3.13	2.50	2.20

Fuente: (Güneyisi et al., 2012)

Para la primera relación (0.25) solamente el MK 5% mostró un mejor desempeño (aprox. 67 MPa) al concreto patrón (aprox. 66 MPa) a los 3 días. Seguido a este el diseño con MK 15% (aprox. 64 MPa), MS 5% (aprox. 62 MPa) y MS (aprox. 61 MPa). A partir del día siete todos los diseños superan la resistencia a la compresión del concreto patrón (aprox. 69 MPa), le sigue MK 5% aprox. 72%), MS 5% (aprox. 72 MPa), MS 15% (aprox. 64 MPa) y finalmente el que mostró mayor desarrollo de resistencia a los siete días fue el MK 15% (aprox. 79 MPa). Para los 28 días se obtienen resultados similares con la diferencia de un mayor desarrollo de resistencia para la muestra con MS 15% (aprox. 86 MPa), le sigue MK 15% (aprox. 84 MPa), MS 5% (aprox. 79 MPa) MK 5% (aprox. 78 MPa) y finalmente el concreto patrón (aprox. 75 MPa).

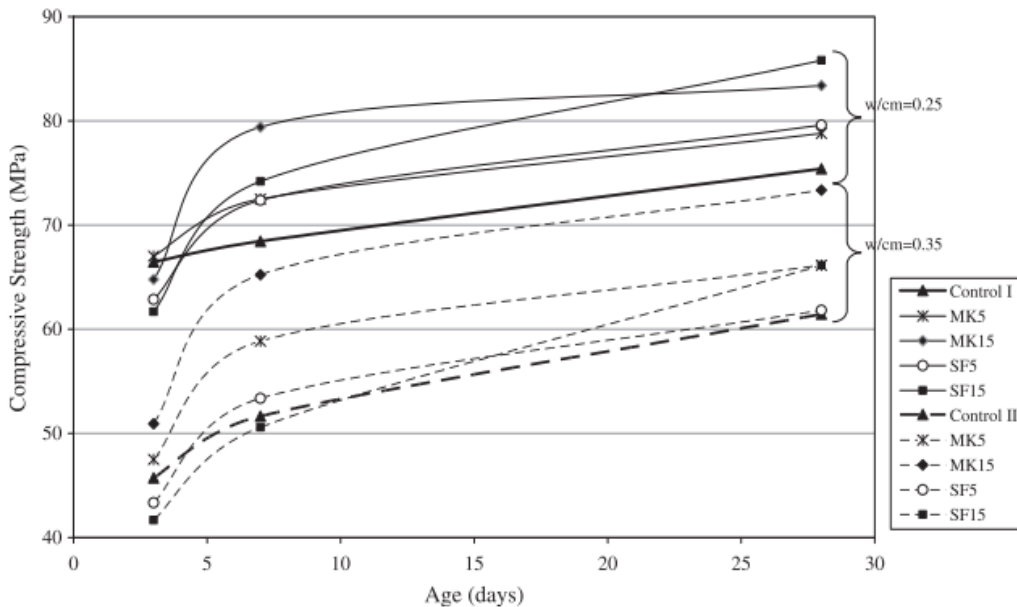


Ilustración 15. Efectos del MS y MK en el desarrollo de la resistencia a la compresión en el estudio de Güneyisi et al. (2012)

Fuente: (Güneyisi et al., 2012)

Para la segunda relación (0.35) dos muestras de MK 5% (aprox. 47 MPa) y 15% (aprox. 51 MPa) superaron la muestra patrón (aprox. 45 MPa) ubicándose las muestras de MS 5% (aprox. 43 MPa) y 15% (aprox 42 MPa) por debajo, con resistencias menores a los 3 días. A partir del día siete con excepción de la muestra de MS 15% (aprox. 51 MPa), todos los diseños superan la resistencia a la

compresión del concreto patrón (aprox. 52 MPa), le sigue MS 5% (aprox. 54 MPa), MK 5% (aprox. 58 MPa) y finalmente el que mostró mayor desarrollo de resistencia a los siete días fue el MK 15% (aprox. 65 MPa). Para los 28 días se muestra una gran diferencia en el desarrollo de resistencia de mayor correspondiente a MK 15% (aprox. 73 MPa) en comparación en el menor correspondiente al concreto patrón y la muestras con MS 15% (aprox. 62 MPa). Por debajo del MK 15% se ubica MK 5% y MS 15 % con el mismo valor (aprox. 65 MPa).

Tabla 23. Resistencia a la compresión en el estudio de Güneyisi et al. (2012)

Material	Edad a/mc	Resistencia a la compresión (MPa)		
		3	7	28
		Concreto patrón	66	69
MK 5%		67	72	78
MK 15%	0.25	64	79	84
MS 5%		62	72	79
MS 15%		61	64	86
Concreto patrón		42	52	61
MK 5%		47	58	65
MK 15%	0.35	51	65	73
MS 5%		43	54	62
MS 15%		42	51	65

Fuente: (Güneyisi et al., 2012)

El ensayo a la compresión mostró diferencias significativas para la variación de la relación agua-material cementante, obteniendo un mejor desempeño con una relación menor, es decir, para mezclas con mayor contenido de material cementante. Se observó un mejor desarrollo de resistencia a largo plazo para los diseños con contenido suplementario en un 15%, MS 15% y MK 15% para la relación de 0.25 implicando la influencia de la composición en el diseño para el desarrollo de resistencia.

Estudio por Bhanja & Sengupta (2005)

Materiales: MS

El estudio de Bhanja & Sengupta (2005) formuló ensayos de concreto con humo de sílice como material suplementario probando bajo diferentes condiciones variando la relación agua-material cementante y el contenido de reemplazo, ambos, con un amplio rango de estudio. La microsíllice usada estaba compuesta principalmente por SiO₂ (90.9%) y un área superficial de 18,000 m²/kg. La relación agua-material

cementante utilizada fue de 0.26, 0,30, 0,34, 0,38 y 0,42, probados cada uno con contenidos de reemplazo de 5, 10, 15, 10 y 25%.

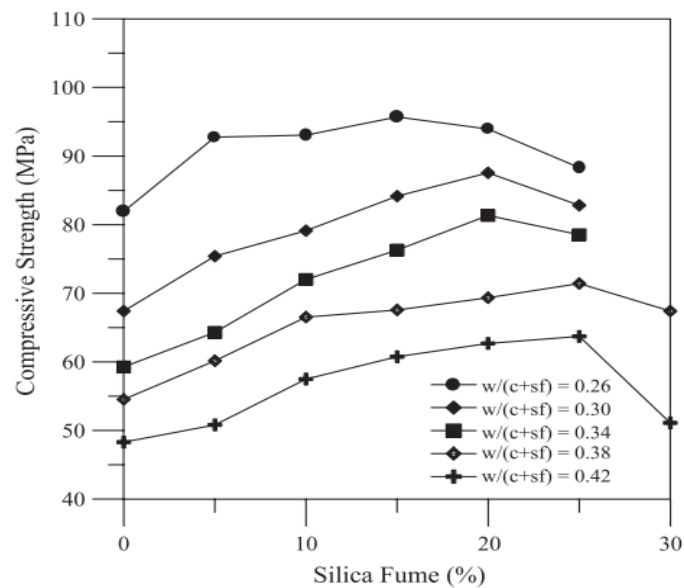


Ilustración 16. Relación entre resistencia a la compresión a los 28 días y porcentaje de reemplazo con humo de sílice

Fuente: (Bhanja & Sengupta, 2005).

Para la relación a/mc de 0.26 le sigue MS 20% (94 MPa), MS 5 Y 10% (93 MPa), MS 25% (88 MPa) y finalmente el concreto patrón (82 MPa). La curva de a/mc 0.26 no muestra una forma representativa, por lo que se dan aumentos, valores constantes y disminuciones. Para la relación a/mc 0,30, la mayor resistencia a la compresión se obtuvo para MS 20% (87 MPa), seguido de MS 15% (84 MPa), MS 25% (83 MPa), MS 10% (78 MPa), MS 5% (75 MPa) y finalmente el concreto patrón (67 MPa). En la curva de la relación a/mc 0.3 se puede observar el pico marcado para el contenido óptimo de material suplementario, que ocurre en como MS 20%.

Para la relación a/mc 0.34 se mostró un patrón similar al observado en la curva de a/mc 0,3, mostrando un pico para MS 20% (81 MPa), seguido de MS 25% (78 MPa), MS 15% (76 MPa), MS 10% (72 MPa), MS 5% (64 MPa) y finalmente el concreto patrón (59 MPa). Para la curva de la relación. Las curvas de la relación a/mc 0.38 y 0.42 se muestra una diferencia en el pico mostrándose para MS 25% y disminuyendo drásticamente con el contenido de MS 30% en la relación de a/mc de 0.42. Para la relación de a/mc 0.38 luego del pico para MS 25% (71 MPa), seguido de MS 20% (69 MPa), MS 15 y 30% (67 MPa), MS 10% (66 MPa), MS 5% (60 MPa) y finalmente el concreto patrón (54 MPa). Para

la relación a/mc 0.42 luego del pico para MS 25% (64 MPa), seguido de MS 20% (63 MPa), MS 15% (60 MPa), MS 10% (57 MPa), MS 30 y 5% (51 MPa) y finalmente el concreto patrón (48 MPa).

Tabla 24. Resistencia a la compresión en el estudio de Bhanja & Sengupta (2005)

	Resistencia a la compresión (MPa)	
	Edad	28
	a/c	
Concreto patrón		82
MS 5%		93
MS 10%	0.26	93
MS 15%		96
MS 20%		94
MS 25%		88
Concreto patrón		67
MS 5%	0.3	75
MS 10%		78
MS 15%		84
MS 20%		87
MS 25%		83
Concreto patrón		59
MS 5%	0.34	64
MS 10%		72
MS 15%		76
MS 20%		81
MS 25%		78
Concreto patrón		54
MS 5%	0.38	60
MS 10%		66
MS 15%		67
MS 20%		69
MS 25%		71
MS 30%		67
Concreto patrón		48
MS 5%	0.42	51
MS 10%		57
MS 15%		60
MS 20%		63
MS 25%		64
MS 30%		51

Fuente: (Bhanja & Sengupta, 2005).

De acuerdo con los resultados obtenidos para los ensayos a la compresión se pudo observar la influencia de la relación agua-material cementante en el desarrollo de resistencia, mostrando una relación inversa entre dichas variables. Para todos los casos se superó la resistencia del concreto patrón. Los ensayos con resistencias más altas corresponden a la relación a/mc de 0.26, obteniéndose hasta una resistencia de aproximadamente 96 MPa para MS 15% (los resultados se obtuvieron de la gráfica por lo que son valores aproximados).

Estudio por (Poon et al., 2006)

Materiales: MS-MK

El estudio de Poon et al., (2006) ensayo concreto usando MK y MS como suplementos cementicios, analizando diferencias en cuanto a la relación a/mc y el contenido de reemplazo. Las relaciones usadas fueron de 0.3 y 0.5, mientras que los contenidos variaron de 5, 10 y 20% para el MK y 5 y 10% para el MS. El MK del estudio se compone principalmente de SiO₂ (53.2 %) y Al₂O₃ (43.9 %), mientras que en la MS dominaba el SiO₂ (85-96 %). Para las pruebas con la relación a/mc de 0.3 se usó superplastificante.

Poon et al., (2006) realizó el ensayo de la resistencia a la compresión a los 3, 7, 28 y 90 días. En la resistencia temprana (7 días), las muestras con a/mc de 0.3 adicionada con MK 5% (88.2 MPa), 10% (99.8 MPa) y 20% (87.6 MPa) superaron el concreto patrón (81.1 MPa). Las muestras con MS para ambos casos se mantuvieron con resistencias inferiores. Para la resistencia tardía todas las muestras superaron el concreto patrón, indicando la baja velocidad de reacción de la MS en comparación con el MK. La relación de a/mc 0.3 permitió el desarrollo de resistencias mayores.

Para el ensayo a la penetrabilidad de cloruros las muestras de la relación a/mc siguieron presentando mejor rendimiento especialmente los ensayos con suplemento de MK 10 Y 20% en donde la carga pasada fue la menor correspondiente a 135 y 124 culombios respectivamente. Los mejores resultados de penetrabilidad de cloruros corresponden a los mejores resultados de resistencia a la compresión.

Tabla 25. Resistencia a la compresión en el estudio de Poon et al., (2006)

Material	Edad a/c	Resistencia a la compresión (MPa)			
		3	7	28	90
Concreto patrón	0.3	68.5	81.1	96.5	102.5

MK 5%		73	88.2	103.6	112.9
MK 10%		85.9	99.8	116.8	120.3
MK 20%		70.8	87.6	99.6	113.8
MS 5%		67	79.3	106.5	110.2
MS 10%		63.2	76.9	107.9	115.6
Concreto patrón		28.6	41.2	52.1	60.4
MK 5%		32.6	45.9	57.1	66.4
MK 10%	0.5	40.4	55.2	66.2	71.6
MK 20%		30	43.2	58.4	69.1
MS 5%		27.4	47	54.3	67.5
MS 10%		25.8	47.4	58.4	69.1

Fuente: (Poon et al., 2006)

Estudio por Nagrockiene et al. (2019)

Materiales: MS

El estudio de Nagrockiene et al. (2019) se enfoca en el uso de microsíllice como material suplementario, realizando ensayos con diferentes contenidos de remplazo (2.5, 5, 7.5 y 10%) con el fin de compararlos con las propiedades de un concreto sin adiciones. En el estudio de composición química se logró observar cómo componente predominante el CaO para el cemento en un 63.5% y el SiO₂ para el microsíllice. Los concretos ensayados se diseñaron una relación a/mc de 0.47. Para los concretos con MS se usó plastificante (0.2, 0.3, 0.6 y 0.8% del peso del cemento). Los resultados del slump mostraron que para un menor remplazo la fluidez era mayor, sin embargo, para los contenidos de MS 7.5 y 10% se obtuvo un slump igual al del concreto patrón (205 mm).

Nagrockiene et al. (2019) realizó ensayos para observar el desarrollo de la resistencia a compresión de los diseños de concretos a los 7 y 28 días. Los resultados del ensayo mostraron que para todos los contenidos de remplazo se supera la resistencia obtenida por el concreto patrón, temprana y tardía. Se puede observar una relación directa entre la resistencia y el contenido de remplazo sin embargo es de esperarse un cambio en esta relación al ir aumentando el contenido de remplazo tras pasar el remplazo óptimo. El diseño con MS 10% fue el que presentó mejor desarrollo de resistencia (57.39 Y 59.06 MPa a los 7 y 28 días respectivamente).

Tabla 26. Composición química de los materiales usados en el estudio de Nagrockiene et al. (2019)

Material		
Compuesto	Cemento	MS
SiO ₂ (%)	20.76	93.35
Al ₂ O ₃ (%)	6.12	0.92
Fe ₂ O ₃ (%)	3.37	0.71
CaO (%)	63.50	0.69
MgO (%)	-	0.72
K ₂ O (%)	1.00	0.86
SO ₃ (%)	0.80	0.13

Fuente. (Nagrockiene et al., 2019)

Tabla 27. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Nagrockiene et al. (2019)

Material	a/mc	Slump (cm)
Concreto patrón	0.47	20.5
MS 2.5%	0.47	21.9
MS 5%	0.47	21.5
MS 7.5%	0.47	10.5
MS 10%	0.47	20.5

Fuente. (Nagrockiene et al., 2019)

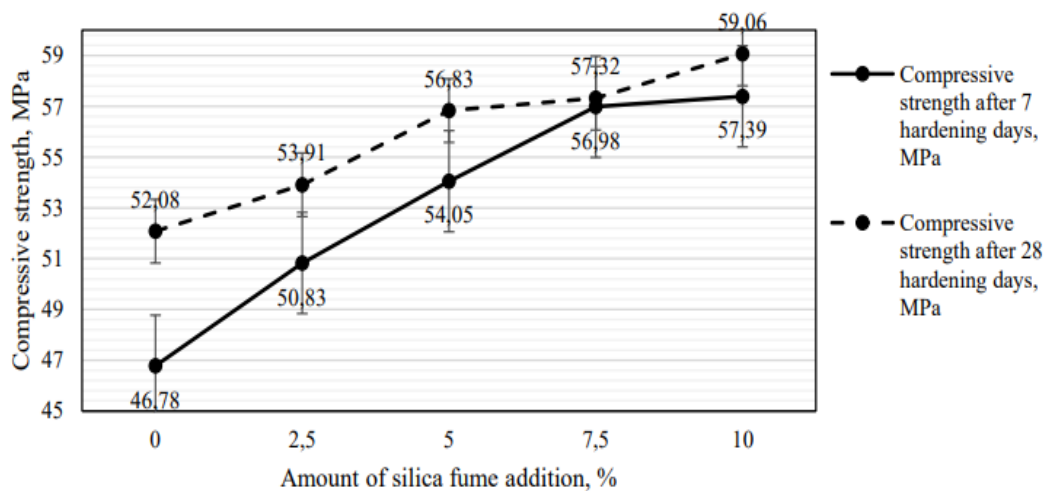


Ilustración 17. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días en el estudio de Nagrockiene et al. (2019)

Fuente. (Nagrockiene et al., 2019)

Estudio por Seleem et al. (2010)

Materiales: MS-EG-MK

El estudio de Seleem et al. (2010) realizó una evaluación entre micromateriales con el fin de obtener concretos de alta resistencia para uso marino. Diseños concretos con microsílíce, escoria de alto horno y metacaolín con un contenido de remplazo del 20% y una relación a/mc de 0.32, además, en su diseño incluyó un reductor de agua para obtener la fluidez deseada. El estudio incluyó diseños con micromateriales combinados sin embargo no se tendrán en cuenta. En el estudio de la composición química se logró identificar altos contenidos de sílice para todos los micromateriales: microsílíce (94,5%), metacaolín (58.52%) y escoria (30.38).

Tabla 28. Composición química de los materiales usados en el estudio de Seleem et al. (2010)

Compuesto	Material			
	Cemento	MS	EG	MK
SiO ₂ (%)	20.39	94.5	30.38	58.52
Al ₂ O ₃ (%)	5.60	1.03	9.05	35.54
Fe ₂ O ₃ (%)	3.43	0.78	3.82	1.15
CaO (%)	63.07	1.10	45.88	1.24
MgO (%)	2.91	0.46	5.39	0.19
K ₂ O (%)	0.38	0.27	0.52	0.25
SO ₃ (%)	0.35	0.43	0.32	0.05

Fuente: (Seleem et al., 2010)

En el estudio se realizó el ensayo a la compresión a la edad de 28 días, 3, 6 y 12 meses, los resultados mostrados por los concretos con remplazo contra el concreto patrón reflejaron una gran diferencia. Para todas las edades el ensayadas se mostró un aumento significativo en el desarrollo de resistencia, el material que mostro mayor desarrollo de resistencia fue el concreto diseñado con remplazo de microsílíce logrando resistencias de hasta 60 MPa a los 28 días, seguido del metacaolín con 46 MPa y la escoria con. 41 MPa.

Tabla 29. Resistencia a la compresión en el estudio de Seleem et al. (2010)

Material	Resistencia a la compresión (MPa)				
	Edad a/c	28d	3m	6m	12m
Concreto patrón (Mc)	0.32	34	38	41	43
MS 20% (Mf)	0.32	60	61	64	68
EG 20% (Msg)	0.32	41	43	49	50

MK 20% (Mk)	0.32	46	49	51	54
--------------------	------	----	----	----	----

Fuente: (Seleem et al., 2010).

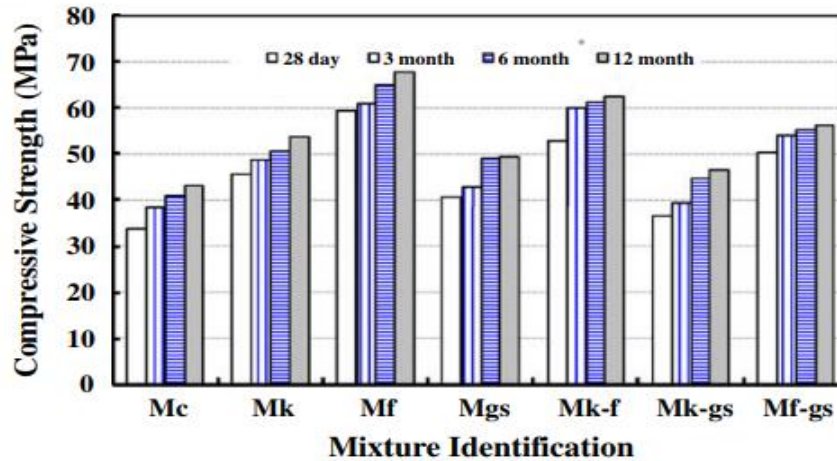


Ilustración 18. Resistencia a la compresión en el estudio Seleem et al. (2010)

Fuente: (Seleem et al., 2010).

Estudio por Narmatha et al. (2016)

Materiales: MK

Narmatha et al. (2016) realizó un estudio sobre el metacaolín como material suplementario, para ellos probó diseños con contenidos de 5, 10, 15 y 20% de remplazo, además, en su diseño hizo uso de superplastificante. En el análisis de componente se observó predominancia de sílice (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3) para el metacaolín y de óxido de calcio (CaO) y Sílice (SiO_2) para el cemento. Para los diseños en estado fresco se obtuvieron slump menores para las mezclas con contenido de remplazo, siendo el menor obtenido para MK 20% (100mm).

Tabla 30. Composición química de los materiales usados en el estudio de Narmatha et al. (2016)

Compuesto	Material	
	Cemento	MK
SiO_2 (%)	34	54.3
Al_2O_3 (%)	5.50	38.30
CaO (%)	63.00	0.39
Fe_2O_3 (%)	4.40	4.28
MgO (%)	1.26	0.08
K_2O (%)	0.48	0.50

SO₃ (%)	1.92	0.22
---------------------------	------	------

Fuente: (Narmatha et al., 2016)

Tabla 31. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio de Narmatha et al. (2016)

Material	SP	a/mc	Slump(cm)
Concreto patrón	3	0.32	12
MK 5%	3.25	0.32	11
MK 10%	3.6	0.32	11.5
MK 15%	3.8	0.32	10.5
MK 20%	4	0.32	10

Fuente: (Narmatha et al., 2016)

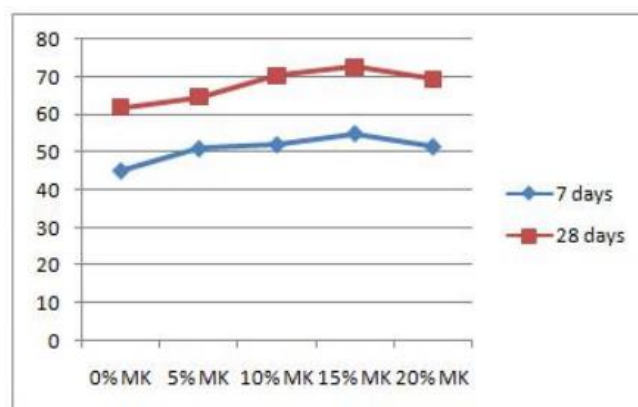


Ilustración 19. Resistencia a la compresión en el estudio de Narmatha et al. (2016)

Fuente: (Narmatha et al., 2016)

La Resistencia a la compresión de los diseños de mezcla con remplazo superan al concreto patrón en un 4.36% (MK 5%), 13.73% (MK 10%), 17,45% (MK 15%) y 12.44% (MK 20%) a los 28 días. Se obtuvo el pico de resistencia a la compresión para el diseño de MK 15% con 72.7 MPa indicando la proporción óptima de remplazo durante el estudio. Los resultados muestran al metacaolín como un buen material puzolánico de remplazo para la producción de concretos de alta resistencia.

Tabla 32. Resistencia a la compresión en el estudio de Narmatha et al. (2016)

Edad	Resistencia a la compresión (MPa)	
	7	28
Material		
Concreto patrón	45.1	61.925
MK 5%	50.875	64.55
MK 10%	51.875	70.425
MK 15%	54.825	72.7
MK 20%	51.4	69.65

Fuente: (Narmatha et al., 2016)

Estudio por John, N. (2013)

Materiales: MK

El estudio de John, N. (2013) se enfocó en el metacaolín como material suplementario, para ello, ensayo diseños con porcentajes de 5, 10, 15 y 20% de remplazo con una relación a/mc de 0.45. De acuerdo a la composición química del metacaolín cumple con el porcentaje mínimo por normativa. Para el ensayo de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días se mantuvo el mismo pico de resistencia, siendo este para el diseño con MK 15% con una resistencia de 41.19 y 51.56 para 7 y 28 días respectivamente. Todos los diseños con material suplementarios en diferentes proporciones superaron el concreto patrón.

Tabla 33. Resistencia a la compresión en el estudio de John, N. (2013)

Material	Composición química	Edad a/mc	Resistencia a la compresión (MPa)	
			7	28
Concreto patrón			28.74	37.04
MK 5%			32.07	38.22
MK 10%	SiO ₂ 53 Al ₂ O ₃ 45.00	0.45	38.07	43.7
MK 15%	CaO 0.09 Fe ₂ O ₃ 0.90		41.19	51.56
MK 20%			38.96	45.49

Fuente: (John, N., 2013)

Estudio por Dhinakaran et al. (2012)

Materiales: MK

El estudio de Dhinakaran et al. (2012) hace una revisión de los efectos producidos en concretos con diferentes porcentajes remplazo de metacaolín para varias relaciones de a/mc. Las relaciones usadas son 0.32, 0.35, 0.4 y 0.5 con porcentajes de 5, 10 y 15% contra un concreto patrón. Dhinakaran et al. (2012) realizó un análisis de componentes y ensayos para el concreto en estado fresco, resistencia a la compresión y durabilidad. En el análisis de compuestos se observó predominancia de SiO₂ en un 96.8% para el metacaolín, y 31.38% para el cemento. Para los diseños se usó superplastificante en porcentaje según el peso. Los slump fueron bajos con un rango de 5.2-7.5 para los diseños con metacaolín y de 6.5-9 para el concreto patrón. El metacaolín mejora la trabajabilidad para una menor relación a/mc en donde se usó un mayor porcentaje de superplastificante, esto se debe a la finura y superficie del material provee un mejor efecto de lubricación lo que se traduce en mejor trabajabilidad.

Tabla 34. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio Dhinakaran et al., 2012

Material	SP % por peso	a/mc	Slump
Concreto patrón	1		6.5
MK 5%	1.1	0.32	7.5
MK 10%	1.2		7.2
MK 15%	1.4		5.7
Concreto patrón	1		7
MK 5%	1.1	0.35	6.2
MK 10%	1.2		8.6
MK 15%			5.3
Concreto patrón	0.8		7
MK 5%	0.6	0.4	7.5
MK 10%	0.9		5.3
MK 15%	1.1		7.5
Concreto patrón	-		9
MK 5%	0.1	0.5	5.2
MK 10%	0.3		5.5
MK 15%	0.7		6.5

Fuente: (Dhinakaran et al. 2012).

En el estudio de la resistencia a la compresión a diferentes edades se logró observar que el metacaolín tiene un buen desarrollo de resistencia tanto en edades tempranas como tardías, que llega a sobrepasar la resistencia obtenida por un concreto patrón. Esto se observa en las resistencias obtenidas para todos los diseños con metacaolín bajo diferentes relaciones de a/mc. A lo largo del experimento también se observa que las resistencias mayores se obtienen para los diseños de MK 10 y 15% con relación a/mc de 0.32.

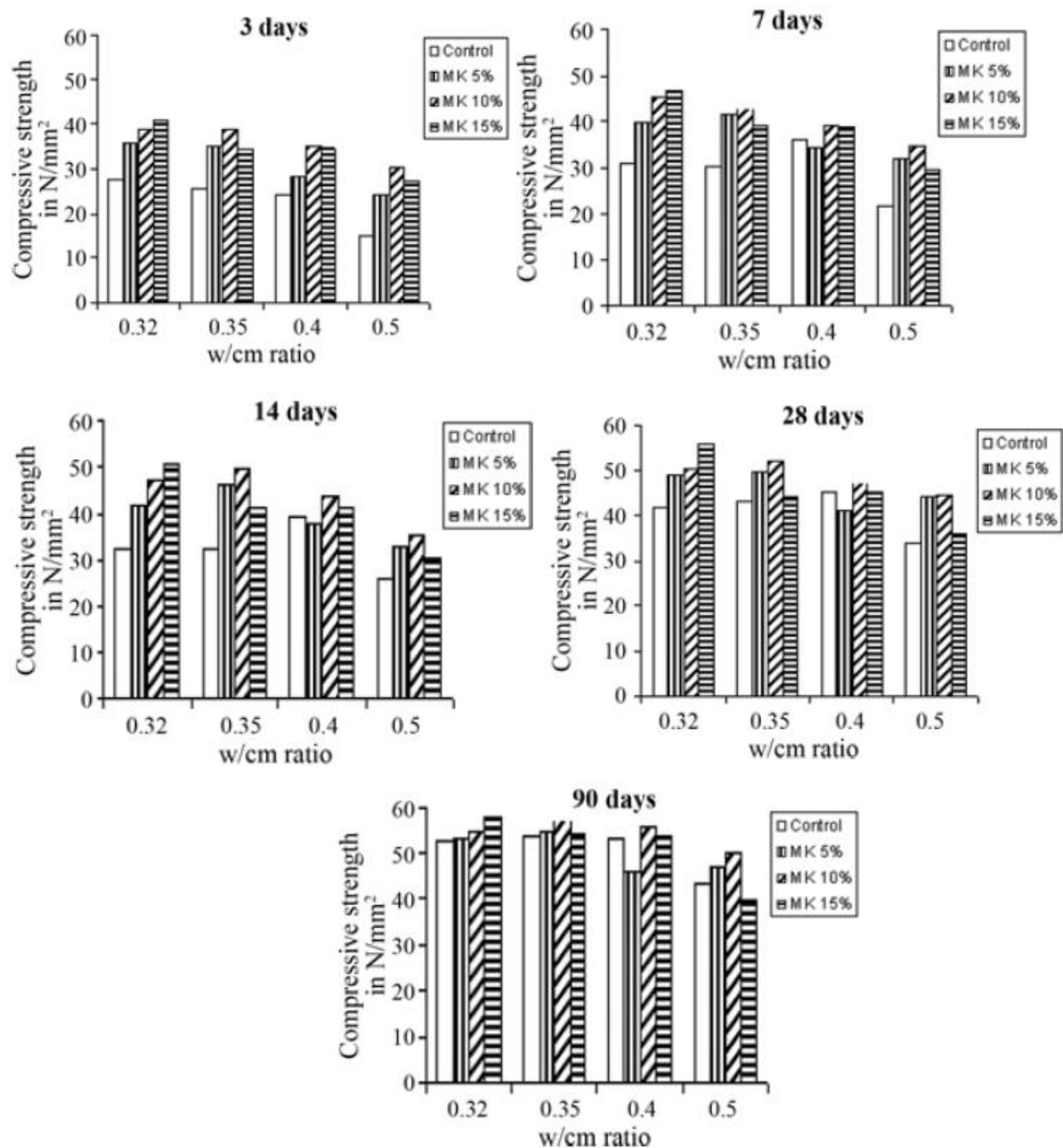


Ilustración 20. Resistencia a la compresión en el estudio de Dhinakaran et al., 2012

Fuente: (Dhinakaran et al. 2012).

Los resultados del estudio de la permeabilidad de iones de cloruros muestran una tendencia de menor permeabilidad para los diseños con mayor contenido de remplazo en la relación de a/mc 0.32, sin embargo, con el aumento de esta relación las gráficas muestran el punto de inflexión siempre para MK 10%. Para todos los casos la carga leída se considera baja o muy baja. Los resultados se atribuyen a la acción del efecto filler, la reacción puzolánica y la aceleración de la hidratación del cemento.

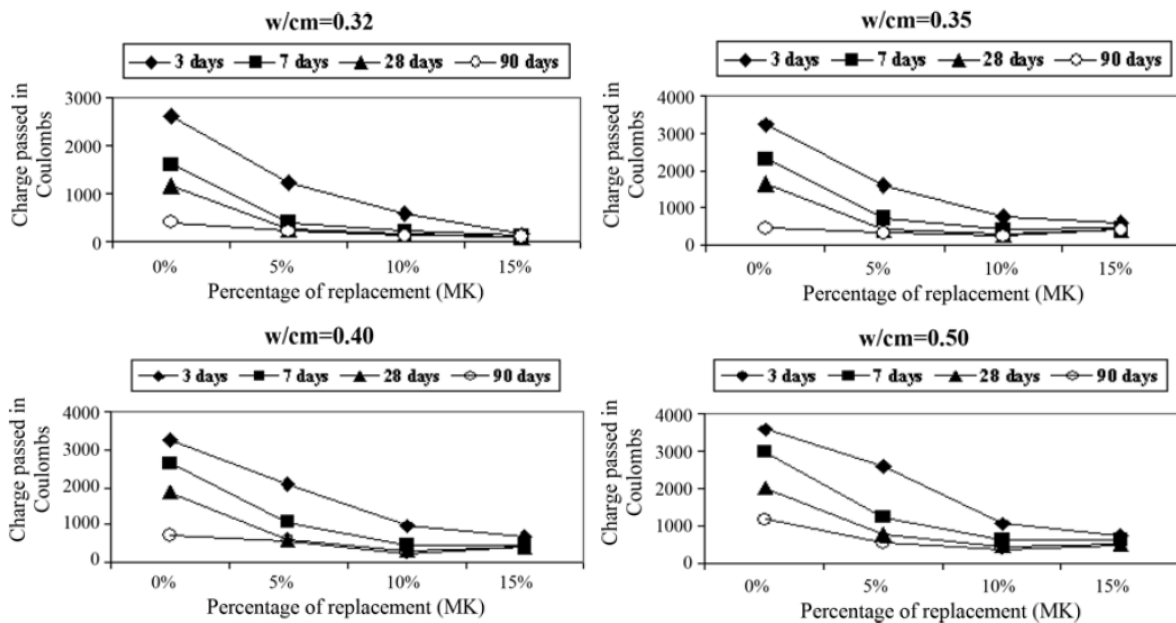


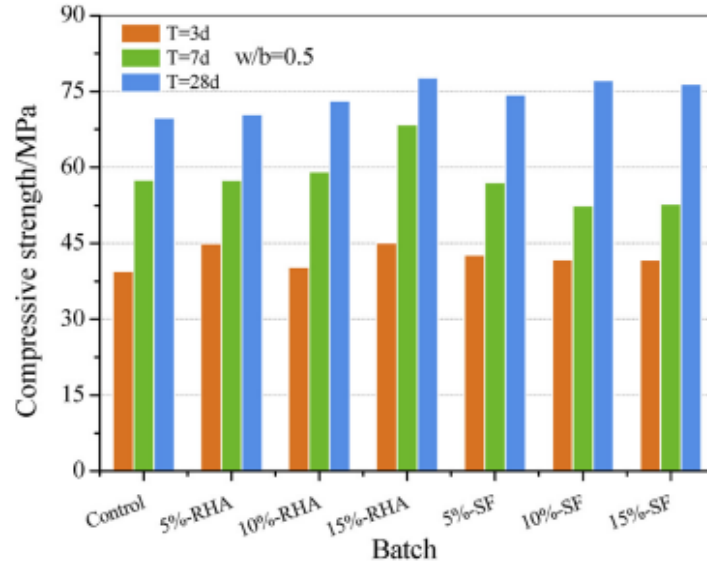
Ilustración 21. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Dhinakaran et al., 2012

Fuente: (Dhinakaran et al. 2012).

Estudio por Hu et al. (2020)

Materiales: CCA-MS

Hu et al.(2020) estudio al metacaolin como un material sostenible y mejores propiedades para ello, ensayo concretos con porcentajes de remplazo de 5, 10 y 15% y los comparo con los mismos diseños para microsilice bajo la condicion de una realcion a/mc de 0.5. El ensayo de la resistencia a la compreaión muestra un mayor desarrollo de resitencia para el diseño de CCA 15%, seguido de MS 10%, encontrandose casi al mismo nivel. En los resultado se obeserva que existe un paralelidad de resultados entre el concreto patrón y CCA 5% lo que de alguna forma implicaria un concreto mas sostenible gracias al menor uso de cemento. Sin embargo, en la medida en que el valor de remplazo aumenta se obtienen mejores resistencia.



* RHA es Ceniza de cascara de arroz y SF es microsílíce*

Ilustración 22. Resistencia a la compresión en el estudio de Hu et al., 2020

Fuente: (Hu et al., 2020)

Estudio por Chindaprasirt et al., 2008

Materiales: CCA-CV

El estudio de Chindaprasirt et al., 2008 investiga los efectos del concreto con adiciones de ceniza de cascara de arroz y los compara con diseños con cenizas volante y ceniza de palma (esta última no será tenida en cuenta) como material de remplazo. El análisis de compuestos muestra altos valores de SiO₂ para la CCA (93.2%) y el CV (41.1%). La CV también muestra alto contenido de Al₂O₃ (21.6%) y Fe₂O₃ (11.3%). El estudio uso una relación a/mc de 0.5, además, se usó superplastificante según el peso en los diseños. La reducción de este en las CV se asocia a la forma esférica. Por otro lado, la incorporación de CCA aumenta el requerimiento de SP debido a su superficie porosa.

Tabla 35. Composición química de los materiales usados en el estudio de Chindaprasirt et al., 2008

Compuesto	Material		
	Cemento	CCA	CV
SiO ₂ (%)	20.9	93.2	41.1
Al ₂ O ₃ (%)	4.80	0.40	21.6
Fe ₂ O ₃ (%)	3.40	0.10	11.3
CaO (%)	65.40	1.10	14.4
MgO (%)	1.30	0.1	3.3
Na ₂ O	0.20	0.1	1.1

K₂O (%)	0.40	1.30	2.6
SO₃ (%)	2.70	0.90	2.2
LOI	0.90	3.77	2.5
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃	-	93.70	74

Fuente: (Chindaprasirt et al., 2008).

En el ensayo a la compresión se observa poca o nula diferencia entre los resultados para la ceniza de cascara de arroz y la ceniza volante, superando ambos, los resultados del concreto patrón. Para la resistencia temprana se observa que para ambos contenidos de remplazo no existe un buen desarrollo de resistencia, la cual si se observa en los diseños con remplazo del 20% que superan al concreto patrón.

Tabla 36. Resistencia a la compresión en el estudio de Chindaprasirt et al., 2008

	SP%	Edad a/mc	Resistencia a la compresión (MPa)		
			7	28	90
			Concreto Patrón	1.9	43.5
CCA 20%	2.2	0.5	44.5	58.5	62.5
CCA 40%	3.7		33.5	55	62
CV 20%	0.4		44.5	59.5	63.5
CV 40%	0.1		33	55	62

Fuente: (Chindaprasirt et al., 2008).

En el ensayo a la penetrabilidad de cloruros ya se muestra una diferencia en cuanto a la CCA y la CV, indicando una menor penetrabilidad para la CCA con mayor contenido de remplazo CCA 40%. Los resultados de la CV indicarían una penetrabilidad moderada y baja mientras que para la CCA es baja.

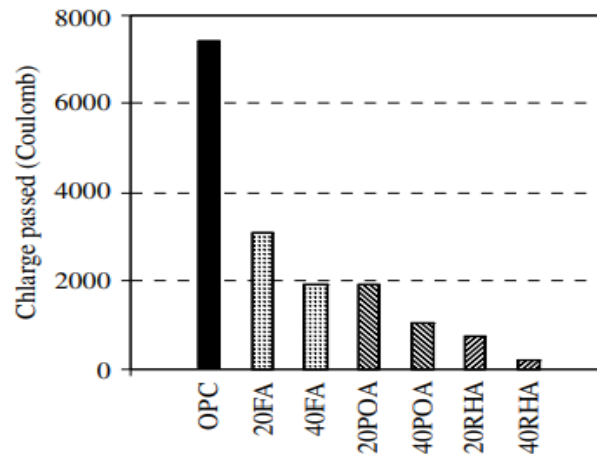


Ilustración 23. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Chindaprasirt et al., 2008

Fuente: (Chindaprasirt et al., 2008)

Estudio por Madandoust et al., 2011

Materiales: CCA

Madandoust et al. (2011) realiza un análisis de las propiedades mecánicas y la durabilidad de concretos con remplazo de 0-30% de ceniza de cascara de arroz. La CCA usada provenía de Irán mostrando una composición química con un 90.9% de SiO₂. Las mezclas fueron diseñadas con una relación de agua/material cementante de 0.53, además, se utilizó superplastificante. El ensayo del slump mostro un menor revenimiento para una mayor cantidad de remplazo obteniéndose slumps entre 55-45 mm para los diseños con CCA y de 60 mm para el concreto patrón. Por otro lado, en el ensayo a la compresión a los 28, 90, 180 y 270 días se observó un comportamiento similar para los contenidos de CCA 15 y 20% con el concreto patrón, obteniéndose resultados homólogos o cercanos. La resistencia solo pudo ser superada para la edad de 270 días para los concreto de CCA 15 Y 20%, el CCA 25% no logro superarlo.

Tabla 37. Composición química de los materiales usados en el estudio de Madandoust et al., 2011

Compuesto	Material	
	Cemento	CCA
SiO ₂ (%)	20	90.9
Al ₂ O ₃ (%)	6	0.83
Fe ₂ O ₃ (%)	4.20	0.60
CaO (%)	64.50	0.80

MgO (%)	1.20	0.56
Na₂O + K₂O	0.8	1.55

Fuente: (Madandoust et al., 2011)

Tabla 38. Características de las mezclas de concreto en estado fresco en el estudio Madandoust et al, 2011.

	SP (kg/m³)	a/mc	Slump
Concreto Patrón	-		65
CCA 15%	4.1	0.53	55
CCA 20%	4.23		56
CCA 25%	4.4		50

Fuente: (Madandoust et al., 2011)

Tabla 39. Resistencia a la compresión en el estudio en el estudio Madandoust et al., 2011.

Edad	Resistencia a la compresión (MPa)			
	28	90	180	270
Material				
Concreto Patrón	35	43.5	45.5	46
CCA 15%	32.1	42.5	44.5	46.4
CCA 20%	31	41.7	44	46.7
CCA 25%	29.7	38.5	42.5	45.6

Fuente: (Madandoust et al., 2011)

Estudio por Ganesan et al., 2008

Materiales: CCA

El estudio de Ganesan et al. (2008) busco identificar el porcentaje de remplazo óptimo para concretos con ceniza de cascara de arroz, para ello, probó diseños con remplazos de 5 a 35% con una relación a/mc de 0.53. El estudio de componentes mostro un alto contenido de SiO₂ para la ceniza de cascara de arroz con 87.32%, lo que lo hace su componente principal. El ensayo del slump muestra que para contenidos menores de remplazo existe un mayor revenimiento, obteniendo su valor máximo para CCA 5% con 105 mm y mínimo con CCA 30% con 41 mm, indicando una relación inversa. Por otro lado, el ensayo a la compresión mostro que para valores de remplazo de CCA 5 a 25% se superan las resistencias

obtenidas por el concreto sin adiciones. Se observa también un buen desarrollo temprano de resistencia a los 7 y 14 días.

Tabla 40. Composición química de los materiales usados en el estudio de Ganesan et al., 2008

Compuesto	Material	
	Cemento	CCA
SiO₂ (%)	20.25	87.32
Al₂O₃ (%)	5.04	0.22
Fe₂O₃ (%)	3.16	0.28
CaO (%)	63.61	0.48
MgO (%)	4.56	0.28
LOI	3.12	2.1

Fuente: (Ganesan et al., 2008).

Tabla 41. Características de las mezclas de concreto en estado fresco y resistencia a la compresión en el estudio Ganesan et al., 2008

	a/mc	Edad	Resistencia a la Compresión (MPa)				
			Slump	7	14	28	90
Concreto Patrón		98	27.2	32.3	37.1	38.3	
CCA 5%		106	27.6	34.2	40	43.3	
CCA 10%		115	28	35.3	41.3	44.8	
CCA 15%	0.53	91	29.3	36	41.8	45.7	
CCA 20%		81	29.7	39.3	42.5	46	
CCA 25%		74	28.7	36.1	38.8	43	
CCA30%		64	27.4	33.5	37.6	38.7	
CCA 35%		41	25.7	31.1	35.1	37.2	

Fuente: (Ganesan et al., 2008).

Ganesan et al. (2008) evaluó la durabilidad de los diseños mediante el ensayo de penetrabilidad a iones de cloruros a los 28 y 90 días. Los resultados mostraron que para contenidos menores de remplazo la resistencia a la penetrabilidad de iones es mucho menor, sin embargo, los valores se mantienen en el rango Bajo. La carga total que pasa por el concreto depende en parte de la conductividad eléctrica, por lo que menores contenidos de carbón inquemado (LOI 2.1%) se esperarían una menor carga, favoreciendo los resultados desde el punto de vista de la permeabilidad a cloruros.

Tabla 42. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Ganesan et al., 2008

Edad	Penetrabilidad iones de cloruro			
	28	P I (cl)	90	P I (cl)
Material				
Concreto Patrón	2800	Moderada	2500	Moderada
CCA 5%	1850	Baja	2250	Moderada
CCA 10%	1050	Baja	1500	Baja
CCA 15%	900	Muy Baja	1250	Baja
CCA 20%	800	Muy Baja	1000	Muy Baja
CCA 25%	700	Muy Baja	850	Muy Baja
CCA30%	650	Muy Baja	750	Muy Baja
CCA 35%	750	Muy Baja	1000	Muy Baja

Fuente: (Ganesan et al., 2008).

Teniendo en cuenta los resultados de resistencia a la compresión y durabilidad un concreto con remplazo de CCA 20% tendría la mayor resistencia y buena durabilidad del concreto, sin embargo, con el fin de maximizar el porcentaje de remplazo manteniendo las propiedades del concreto el CCA 30% sería la opción limite.

Estudio por Nath & Sarker, 2011

Materiales: CV

El estudio de Nath & Sarker, 2011 investigo los efectos de la ceniza de cascara de arroz como remplazo en el concreto, para ello utilizo contenido de 30 y 40% con relación es de a/mc de 0.29, 0.31 y 0.32. En su diseño incluyo uso de superplastificante. Nath & Sarker (2011) realizo un estudio de la resistencia a la compresión a los 3, 7, 28, 56 y 90 días. El ensayo muestra un mayor desarrollo de resistencias para relaciones menores de a/mc obteniendo su máximo valor para CV 40% con a/mc 0.29, sin embargo, este desarrollo de resistencia se da para resistencias tardías y no tempranas.

Por otro lado, se realizó un análisis de durabilidad mediante el ensayo de penetrabilidad a iones de cloruro. Para todos los diseños con contenido de remplazo se obtuvo una menor penetración, manteniéndose en el rango bajo con una carga de 1400 a 1900 Columbios. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para la resistencia y durabilidad es recomendable un porcentaje de remplazo de hasta CV 40% pero se recomienda una relación menor de 0.29 para maximizar la resistencia.

Tabla 43. Composición química de los materiales usados en el estudio de Nath & Sarker, 2011

Material		
Compuesto	Cemento	CV
SiO ₂ (%)	21.1	50.5
Al ₂ O ₃ (%)	4.7	26.57
Fe ₂ O ₃ (%)	2.70	13.77
CaO (%)	63.00	2.13
MgO (%)	2.60	1.54
SO ₃	2.50	0.41
K ₂ O	-	0.77
Na ₂ O	0.50	0.45
LOI	2.00	0.60

Fuente: (Nath & Sarker, 2011).

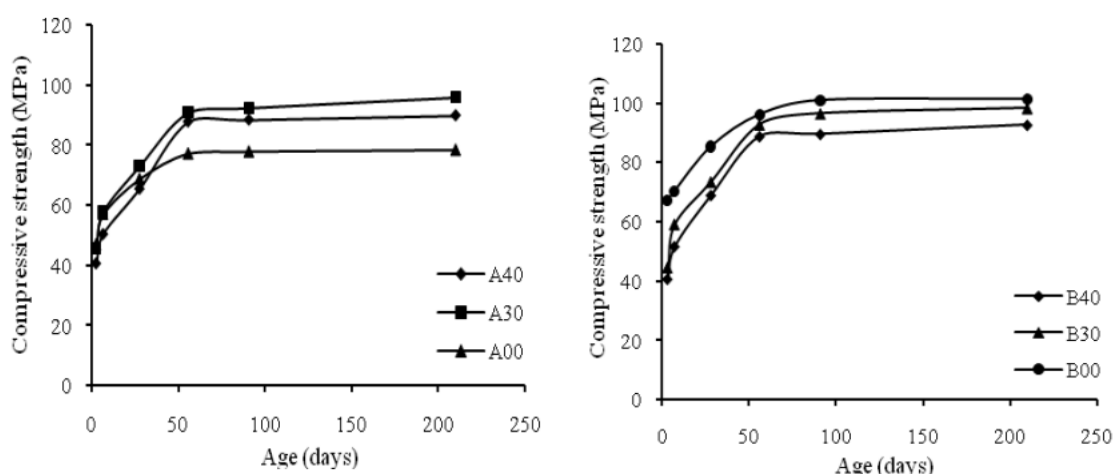


Ilustración 24. Resistencia a la compresión en el estudio Nath & Sarker, 2011

Fuente: (Nath & Sarker, 2011)

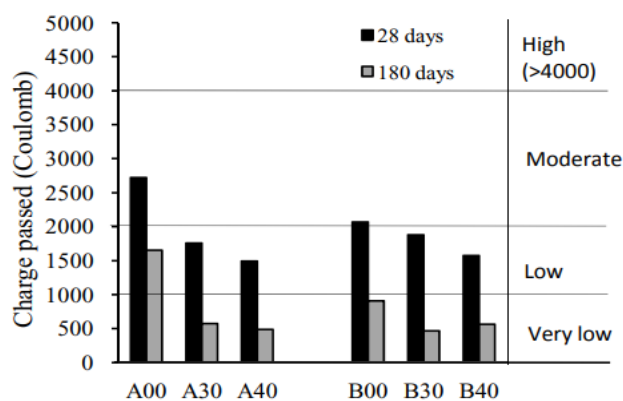


Ilustración 25. Penetrabilidad a iones de cloruro en el estudio de Nath & Sarker, 2011

Fuente: (Nath & Sarker, 2011).}

Estudio por Tan & Pu, 1998

Materiales: EG – CV - MS

En el estudio realizado por Tan & Pu (1998) se investiga el comportamiento de concretos con sustituciones de CV y EG finamente molidas al 20%, esto con el fin de encontrar un posible material de reemplazo para el microsíllice, por tener una oferta limitada y alto precio.

Tabla 44. Proporción de mezclas de concreto (Tan & Pu, 1998)

	SP (kg/m ³)	a/mc	Slump(cm)
Concreto Patrón	7.5		18
CV 20%	7.5	0.3	15
EG 20%	7.5		16
MS 7%	7.5		17

Fuente: (Tan & Pu, 1998).

La ceniza volante es molida hasta alcanzar un área superficial de 602.1 m²/kg y la escoria granulada 592.3 m²/kg. Sumado a esto la EG presenta una excelente composición, llegando a tener 72.2% entre CaO y SiO₂.

Tabla 45. Composición química de los aglutinantes usados en Tan & Pu, 1998

Compuesto	Material			
	Cemento	CV	EG	SF
CaO (%)	64.38	5.16	35.32	1.61
SiO₂ (%)	20.71	45.1	36.88	90.11
Al₂O₃ (%)	4.93	29.42	14.18	1.6
Fe₂O₃ (%)	4.38	16.68	1.05	0.63
SO₃ (%)	2.30	-	-	-
MgO (%)	1.68	1.67	7.33	-
K₂O	0.58	2.31	0.45	-
Na₂O	0.33	1.21	0.31	-

Fuente: (Tan & Pu, 1998).

Como resultado de este estudio, se concluye que la incorporación de 20% CV o EG puede incrementar significativamente la resistencia a compresión del concreto después de 3 días. Sin embargo, a pesar de que la EG presenta mejor comportamiento en sus edades tempranas, no se encontró gran diferencia entre estas al final.

Tabla 46. Resistencia a la compresión de concretos a diferentes edades (Tan & Pu, 1998)

Edad	Resistencia a la compresión (MPa)			
	1	3	28	56
Material				
Concreto patrón	39	53.8	60.6	73.8
CV 20%	37.3	51.4	79.3	81.1
EG 20%	37.7	57.4	79.9	82.3
MS 7%	44.7	60.8	81.2	86.4

Fuente: (Tan & Pu, 1998).

Estudio por Yang et al, 2020

Materiales: EG

El objetivo del estudio realizado por Yang et al, 2020 es evaluar el desarrollo de resistencia a la compresión del concreto con sustituciones de EG. Este utiliza una relación agua/cemento de 0.6 constante con sustituciones de 10, 30 y 50% de EG como micromaterial suplementario.

Tabla 47. Proporción de mezclas de concreto a evaluar (Yang et al, 2020)

	SP (kg/m³)	a/mc
Concreto Patrón	1.156	
EG 10%	0.976	0.6
EG 30%	0.659	
EG 50%	0.481	

Fuente: (Yang et al, 2020)

El cemento patrón utilizado es cemento Portland ordinario tipo I con una gravedad específica de 3.14 g/cm³ y un área superficial de 323 m²/kg. En el caso de la EG, se tiene en cuenta la norma ASTM C989 y se utiliza un micromaterial con área superficial de 426 m²/kg y gravedad específica de 2.84 g/cm³. Los componentes químicos de ambos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 48. Composición química de los materiales utilizados (Yang et al, 2020)

Compuesto	Material	
	Cemento	EG
SiO₂ (%)	21.07	35.35
Al₂O₃ (%)	5	14
Fe₂O₃ (%)	2.92	0.36

CaO (%)	62.40	41.91
MgO (%)	2.07	7.74
SO₃ (%)	2.34	0.1
K₂O	0.59	-
Na₂O	0.26	-
LOI	1.19	0.31

Fuente: (Yang et al, 2020)

A partir de los resultados obtenidos se pudo concluir que la resistencia a la compresión del concreto en edades tempranas disminuye a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de EG en la mezcla.

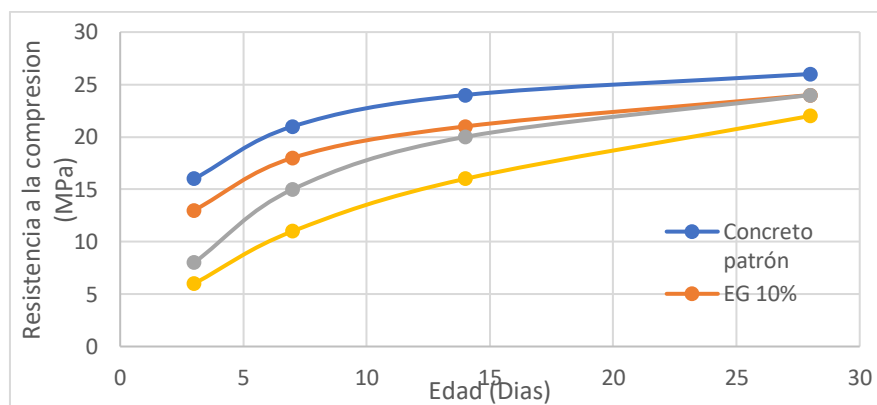


Ilustración 26. Resistencia a la compresión de las mezclas evaluadas con diferente % de reemplazo (Yang et al, 2020)

Fuente: (Yang et al, 2020)

2.6.1 Análisis de los Estudios.

Para el análisis de los efectos del uso de los materiales reactivos suplementarios en los concretos, se evaluarán los parámetros de microestructura, durabilidad y resistencia a la compresión en los estudios revisados para los diferentes materiales.

Microsílice

En el estudio de Sequeira (2021) se usó una relación a/mc de 0.56. Los resultados muestran que los valores de resistencia temprana (7 días) para MS 5% (30 MPa) y MS 10% (28%) no superaron el concreto patrón (30 MPa), sin embargo, se dio un desarrollo de resistencia tardía (28 días) para ambas

muestras (MS 5% 40 MPa y MS10% 39 MPa) superando la resistencia del concreto patrón (38 MPa). En este ensayo se obtuvo una mayor resistencia con un menor contenido de reemplazo. El slump refleja una mezcla muy fluida (15.24 y 12.7 cm), por otro lado, la penetrabilidad a cloruros resulta baja o muy bajo para este material y reemplazo

Los estudios de Poon et al. (2006), Duan et al. (2013) y Valderrama et al. (2011), se diseñaron con una relación a/mc de 0.5 con contenidos de reemplazo de MS 10%. Al compararlos se observan resultados cercanos entre los autores Poon et al. y Valderrama et al., donde su concreto patrón presentó la misma resistencia de 52 MPa a los 28 días y sus resistencias para MS 10% fueron de 50 y 58 MPa. Sin embargo, el ensayo de Duan et al. difiere de con sus resultados, mostrando resistencias menores de 43 MPa para la misma relación. El ensayo de MS 5% de Poon et al. muestra que con contenidos de reemplazo menores se sigue obteniendo resistencias por encima del patrón. Referente a la durabilidad se observan grandes diferencias, para Poon et al. se obtienen valores en rango bajo, mientras que para Valderrama et al. un rango moderado, sin embargo, la variabilidad de sus resultados pudo ser consecuencia de diferencias en el porcentaje de inquemados.

Los diseños de Nagrockiene et al. (2019) contenían menores cantidades de reemplazo (MS 2.5, 5, 7.5 y 10%) con una relación menor de 0.47. Para este ensayo el concreto patrón también tenía una resistencia de 52 MPa, al compararlo con los resultados de mayores relaciones se observa que el desarrollo de resistencia va aumentando para relaciones menores teniendo un pico de resistencia con contenidos de reemplazo de MS 10%. En el estudio de Torres et al. (2011) y Sathawane et al. (2013) se usó una relación de 0.4, sin embargo, a pesar de que los contenidos de reemplazo son diferentes (10 y 30% respectivamente) se logra observar que para grandes reemplazos el microsilice perjudica el desarrollo de resistencia.

El estudio de Güneysi et al. (2012) usó una relación de 0.35, mostrando resistencias mayores en comparación a los diseños anteriores, alcanzando resistencia de 62 y 65 MPa para reemplazo de 5% y 15% respectivamente. También, para su diseño a/mc 0.25 se logra obtener un aumento en los resultados de resistencias (79 y 86 MPa para Ms 5 y 10%), sin embargo, el pico de resistencias se obtiene con Poon et al. con su diseño de concreto con MS 5 y 10% con relación de 0.3 fue el estudio que presentó resistencias mayores. El estudio de Bhanja & Sengupta (2005) ilustra una tendencia de aumento de resistencia para relaciones menores, igual que los estudios anteriores, sin embargo, al ser un estudio más amplio permite ver el comportamiento para reemplazo de 5-30%, resultados que muestran que el reemplazo óptimo para el rango de a/mc de 0.25-0.3 se encuentra en el rango de MS 10-15%. Teniendo como precedente los resultados de los estudios se podría indicar que la relación óptima se encontraría entre 0.25-0.3 a/mc óptima con reemplazos entre 10 a 15%.

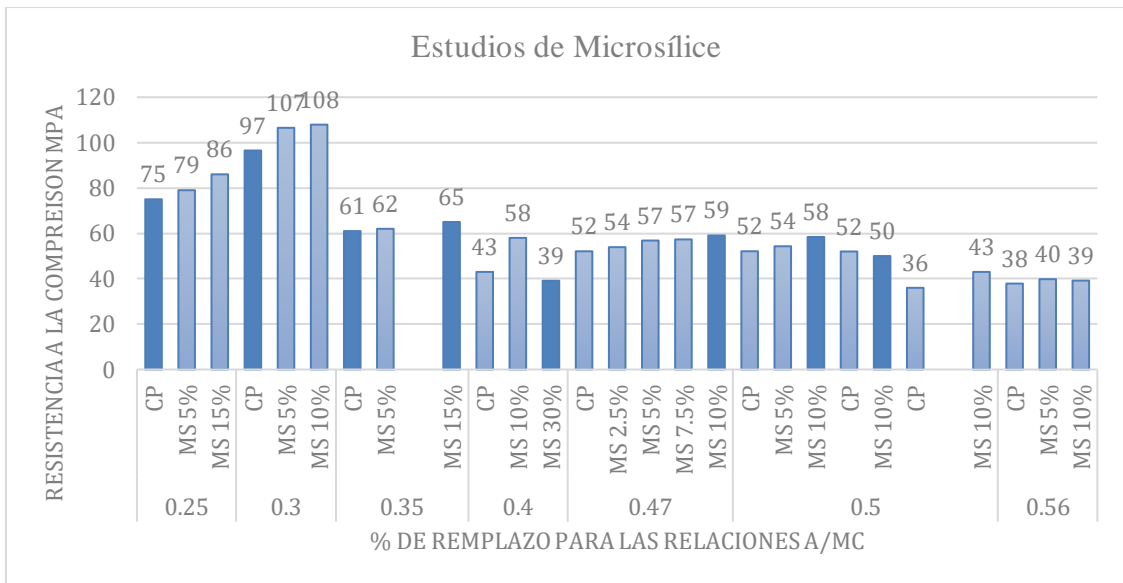


Ilustración 27. Resistencia a la compresión de los estudios analizados

Fuente: (Autores, 2022)

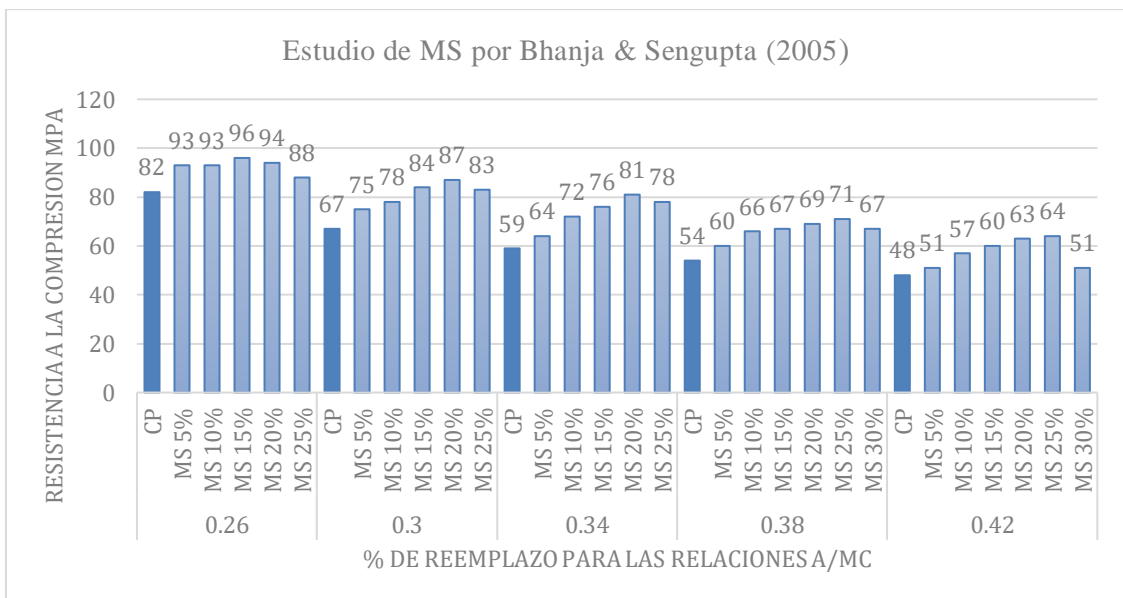


Ilustración 28. Resistencia a la compresión para el estudio de Bhanja & Sengupta (2005).

Fuente: (Bhanja & Sengupta, 2005)

Tabla 49. Recopilación de estudios sobre microsílíce.

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Resistencia a la Compresión						Durabilidad					
				Edad	3	7	14	28	56	90	28		90		
				Slump (cm)							% Aumento a los 28 días	Carga (C)	P I (cl)	Carga (C)	P I (cl)
Güneyisi et al., 2012	Concreto patrón	CaO 63.6 SiO ₂ 19.9 Al ₂ O ₃ 4.54 Fe ₂ O ₃ 3.38 MgO 6.63	0.25		66	69		75							
	MS 5%	CaO 0.45 SiO ₂ 90.36			62	72		79		5.3					
	MS 15%	Fe ₂ O ₃ 1.38			61	64		86		14.7					
Poon et al., (2006)	Concreto patrón	CaO 64.7 SiO ₂ 21	0.3		69	81		97		103		1035	Baja	931	Muy baja
	MS 5%	SiO 85-96			67	79		107		110	10.4	665	Muy baja	426	Muy baja
	MS 10%				63	77		108		116	11.8	360	Muy baja	336	Muy baja
Seleem et al., 2010	Concreto patrón	SiO ₂ 20.39 Al ₂ O ₃ 5.60 Fe ₂ O ₃ 3.43 CaO 63.07	0.32					34							
	MS 20%	SiO ₂ 94.5 Al ₂ O ₃ 1.03 CaO 1.10						60			76.5				
Güneyisi et al., 2012	Concreto patron	CaO 63.6 SiO ₂ 19.9 Al ₂ O ₃ 4.54 Fe ₂ O ₃ 3.38 MgO 6.63	0.35		42	52		61							
	MS 5%	CaO 0.45 SiO ₂ 90.36			43	54		62			1.6				
	MS 15%	Fe ₂ O ₃ 1.38			42	51		65			6.6				

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Edad	Resistencia a la Compresión						% Aumento a los 28 días	Durabilidad				
					Slump (cm)	3	7	14	28	56		90	28		90	
													Carga (C)	PI (cl)	Carga (C)	PI (cl)
Torres et al., 2011	Concreto patrón	CaO 61.70 SiO ₂ 20.27 Fe ₂ O ₃ 3.91 Al ₂ O ₃ 3.34 MgO 1.44	0.4	5		35		43					2007	Moderada		
	MS 10%	SiO ₂ 94.28 CaO 1.37 Al ₂ O ₃ 1.06 Fe ₂ O ₃ 0.29		10		49		58		34.9			1295	Baja		
Sathawane et al., 2013	Concreto patrón		0.4	0.65*		36	39	46	48	50						
	MS 30%	SiO ₂ 40 Al ₂ O ₃ 25 Fe ₂ O ₃ 6 CaO 2.0 MgO 3.71		0.76*		33	33	39	42	45	-14.6					
Nagrokiene et al. (2019)	Concreto patrón	SiO ₂ 20.76 Al ₂ O ₃ 6.12 Fe ₂ O ₃ 3.37 CaO 63.50 K ₂ O 1.00 SO ₃ 0.80	0.47	20.5		47		52								
	MS 2.5%	SiO ₂ 93.35 Al ₂ O ₃ 0.92		21.9		51		54		3.5						
	MS 5%	Fe ₂ O ₃ 0.71		21.5		54		57		9.1						
	MS 7.5%	CaO 0.69 MgO 0.72		10.5		57		57		10.1						
	MS 10%	K ₂ O 0.86		20.5		57		59		13.4						
Poon et al., (2006)	Concreto patrón	CaO 64.7 SiO ₂ 21	0.5		29	41		52		60		2971	Moderada	2789	Moderada	
	MS 5%				27	47		54		68	4.2	1641	Baja	1235	Baja	
	MS 10%	SiO 85-96			26	47		58		69	12.1	1523	Baja	1053	Baja	

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Slump (cm)	Resistencia a la Compresión						Durabilidad				
					Edad	3	7	14	28	56	90	28		90	
					% Aumento a los 28 días	Carga (C)	P I (cl)	Carga (C)	P I (cl)						
Valderama et al (2011)	Concreto patrón	SiO ₂ 20.87 Al ₂ O ₃ 4.35 Fe ₂ O ₃ 3.93 CaO 60.2 MgO 2.74	0.5					52	53	54		5913	Alta	5711	Alta
	MS 10%	-						50	55	59	-3.8	3037	Moderada	2447	Moderada
Duan et al., 2013	Concreto patrón	CaO 62.60 SiO ₂ 21.34 Fe ₂ O ₃ 3.31 Al ₂ O ₃ 4.67 MgO 3.08	0.5					36							
	MS 10%	SiO ₂ 94.74 MgO 1.80 Fe ₂ O ₃ 1.21 MgO 1.80 Al ₂ O ₃ 0.90						43			19.4				
Sequeira, 2021	Concreto patrón	SiO 20.24 Al ₂ O ₃ 4.74 Fe ₂ O ₃ 2.17 CaO 61.57	0.56		18.415	28	30	34	38	46	45			1840	Bajo
	MS 5%				15.24	27	30	35	40	46	46	5.1		1390	Bajo
	MS 10%				12.7	26	28	33	39	45	47	3.5		870	Muy Bajo

Fuente: (Autores, 2022)

Ceniza volante

En los estudios de ceniza volante se usaron relaciones a/mc 0.5, 0.56, 0.29 y 0.26 para diferentes contenidos de reemplazo. El estudio de Sequeira (2021) evaluó dos muestras con composiciones químicas diferentes bajo la misma relación a/mc. El estudio de Valderama et al. (2011) y el estudio de Cruz. E. (2021) evaluaron un mismo material bajo diferentes contenidos de reemplazo. Para todos los contenidos de reemplazo y relaciones a/mc los resultados de resistencia temprana no mostraron valores superiores al concreto patrón, lo que implicaría que la resistencia fue desarrollada únicamente por el contenido de cemento, mostrándose como inerte. La resistencia tardía a los 90 días con el contenido de 10% del ensayo de Valderama et al. (2011) y contenido 15% de Sequeira, 2021 se superó la resistencia del concreto patrón. A pesar de que en el estudio de Chindaprasirt et al. (2007) se logró igualar la resistencia del concreto patrón, pero solamente para CV 20% a los 28 días, pero no para el resto de estudios con diferentes porcentajes de reemplazo, que si alcanzaron al concreto patrón a los 90 días. Se podría hablar un proceso lento de reacción, cuyo valor óptimo de reemplazo varía de los 10-20%.

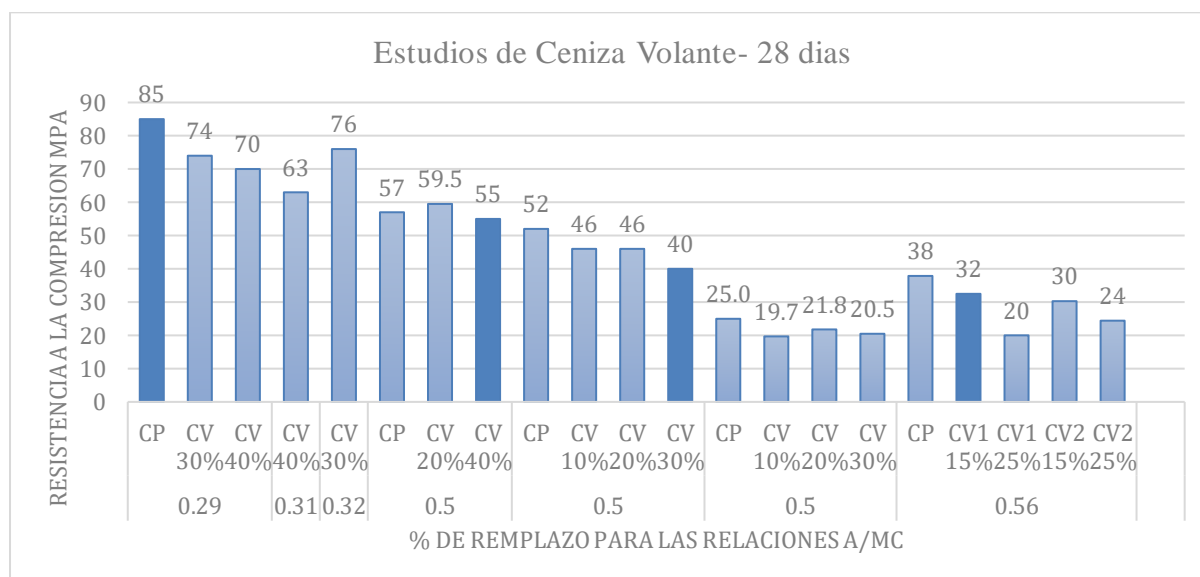


Ilustración 29. Resistencia a la compresión a los 28 de los estudios analizados para ceniza volante.

Fuente: (Autores, 2022).

El ensayo de Nath et al. (2011) se basa en diseños con relaciones a/mc de 0.29 para altos contenidos de reemplazo. Los resultados de resistencias a la compresión a los 28 y 90 días son desfavorables, con valores por muy por debajo al concreto patrón (85 MPa) en un 12 a 17% inferior (74 y 70 MPa para CV 30 y 40% respectivamente a los 28 días) lo que evidencia que para reemplazo mayores de 30% se disminuye la resistencia.

De acuerdo con los resultados obtenido se infiere que a mayor porcentaje de remplazo y mayor relación a/mc aumenta el tiempo en alcanzar la resistencia deseada, sin embargo, para el mercado de la construcción no es viable obtener las resistencias requeridas después de 90 días.

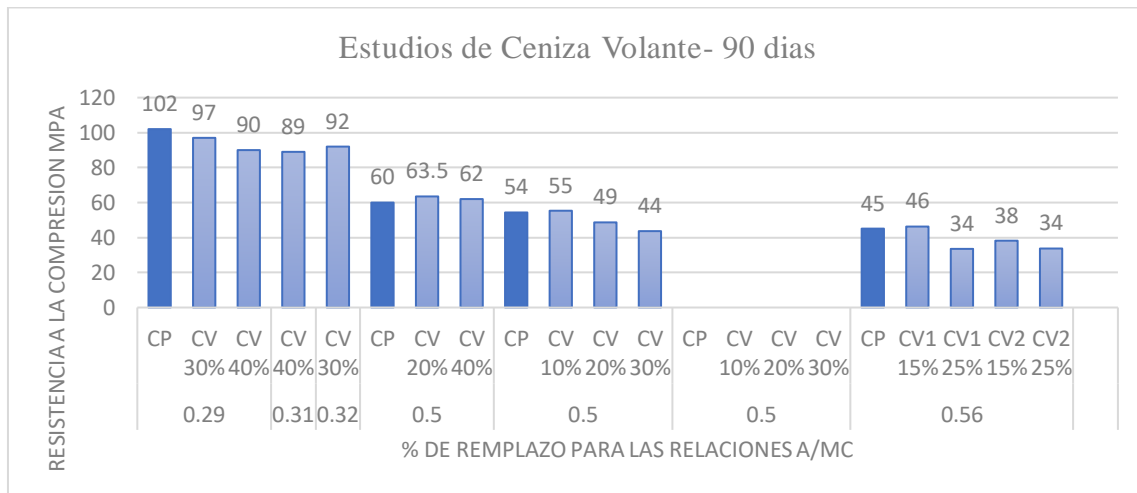


Ilustración 30. Resistencia a la compresión a los 28 de los estudios analizados para ceniza volante

Fuente: (Autores, 2022).

El ensayo de Nath et al. (2011) se basa en diseños con relaciones a/mc de 0.29 para altos contenidos de remplazo. Los resultados de resistencias a la compresión a los 28 y 90 días son desfavorables, con valores por muy por debajo al concreto patrón (85 MPa) en un 12 a 17% inferior (74 y 70 MPa para CV 30 y 40% respectivamente a los 28 días) lo que evidencia que para remplazo mayores de 30% se disminuye la resistencia. De acuerdo con los resultados obtenido se infiere que a mayor porcentaje de remplazo y mayor relación a/mc aumenta el tiempo en alcanzar la resistencia deseada, sin embargo, para el mercado de la construcción no es viable obtener las resistencias requeridas después de 90 días.

Por otra parte, en el análisis de cloruros refleja un comportamiento similar al resultante en los ensayos de resistencia a la compresión sin embargo a pesar de obtenerse una penetrabilidad a los cloruros alta para las relaciones de 0.5 y 0.56 estas siguen siendo teniendo menor penetrabilidad a la del concreto patrón. Se pudo observar también que cuando se obtienen altas resistencias la resistencia a los cloruros es menor teniendo una penetrabilidad mucho mayor. Para la adición de cenizas volantes el contenido óptimo es del 30%-40% con relación de 0.29 asumiendo el 40 % como el porcentaje de remplazo máximo.

Tabla 50. Recopilación de estudios sobre ceniza volante.

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Slump	Resistencia a la Compresión						Durabilidad					
					Edad	3	7	14	28	56	90	28		90		
											% Aumento a los 28 días	% Aumento a los 90 días	Carga (C)	P I (cl)	Carga (C)	P I (cl)
Nath et al., 2011	Concreto Patrón	SiO ₂ 21.1 Al ₂ O ₃ 4.7 Fe ₂ O ₃ 2.7 CaO 63	0.29	16	68	71	85	96	102			2070.5	Moderada	2070.5	Moderada	
	CV 30%	SiO ₂ 50.5 Al ₂ O ₃ 26.5		17.5	44	58	74	93	97	-12.9	-4.9	1881	Baja	1881	Baja	
	CV 40%	Fe ₂ O ₃ 13.7 CaO 2.13		15	41	51	70	89	90	-17.6	-11.8	1575	Baja	1575	Baja	
	CV 40%			0.31	18.5	40	45	63	87	89	-25.9	-12.7	1493	Baja	1493	Baja
	CV 30%			0.32	17	43	58	76	90	92	-10.6	-9.8	1757.5	Baja	1757.5	Baja
Chindaprasirt et al., 2007	Concreto Patrón	SiO ₂ 93.2 Al ₂ O ₃ 0.4 Fe ₂ O ₃ 0.1	0.5			43.5		57		60			7450	Alta		
	CV 20%	SiO ₂ 41.1 Al ₂ O ₃ 21.6				44.5		59.5		63.5	4.4	5.8	3050	Moderada		
	CV 40%	Fe ₂ O ₃ 11.3 CaO 14.4				33		55		62	-3.5	3.3	1959	Baja		
Valderama el al (2011)	Concreto Patrón	SiO ₂ 20.87 Al ₂ O ₃ 4.35 Fe ₂ O ₃ 3.93 CaO 60.2 MgO 2.74	0.5				52	53	54			5913	Alta	5711	Alta	
	CV 10%	SiO ₂ 56.86 Al ₂ O ₃ 23.51					46	51	55	-11.5	1.8	5159	Alta	3733	Moderada	
	CV 20%	Fe ₂ O ₃ 4.39 CaO 0.83					46	47	49	-11.5	-10.4	4363	Alta	3462	Moderada	
	CV 30%	MgO 0.6					40	42	44	-23.1	-19.6	4300	Alta	2890	Moderada	

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Edad Slump	Resistencia a la Compresión						Durabilidad			
					3	7	14	28	56	90	28		90	
					% Aumento a los 28 días	% Aumento a los 90 días	Carga (C)	P I (cl)	Carga (C)	P I (cl)				
Cruz. E., 2021	Concreto Patrón						24.98							
	CV 10%	SiO ₂ 49.53 Al ₂ O ₃ 22.67	0.5				19.68			-21.2				
	CV 20%	CO ₂ 18.28 Fe ₂ O ₃ 3.90					21.78			-12.8				
	CV 30%	CO ₂ 18.28					20.48			-18.0				
Sequeira, 2021	Concreto Patrón	SiO 20.24 Al ₂ O ₃ 4.74 Fe ₂ O ₃ 2.17 CaO 61.57 LOI 2.32		18.415	28	30	34	38	46	45			1840	Bajo
	CV1 15%	SiO ₂ 54.6 Al ₆ Si ₂ O ₁₃	0.56	16.129	15	19	26	32	41	46	-14.2	2.6	4170	Alto
	CV1 25%	35.9 LOI 2.32		12.7	12	14	18	20	26	34	-47.2	-25.7	6020	Alto
	CV2 15%	Ca(OH) ₂ 62.0 CaSO ₄ 22.70		19.05	21	24	28	30	36	38	-20.0	-15.3	1900	Bajo
	CV2 25%	CaCO ₃ 15.30 LOI 26.36		20.32	16	20	27	24	30	34	-35.5	-25.2	2200	Moderado

Fuente: (Autores, 2022).

Metacaolín

Los estudios de metacaolín usan relaciones a/mc de 0.25 a 0.5 con diferentes contenidos de reemplazo. Los ensayos de Dhinakaran et al. (2012), Duan et al. (2013) y John, (2013) mostraron de resistencias similares a pesar que el ensayo de John (2013) se realizó para una relación de 0.45 y los otros para una relación de 0.5. A los 28 días los valores del concreto patrón variaban entre 34-37 MPa, mientras que los diseños con MK obtuvieron resistencias de 44-45 MPa. El ensayo de Poon et al. (2006) también uso una relación de 0.5, sin embargo, sus resistencias fueron mayores (66.2 MPa para MK 10%). El ensayo de Poon et al. (2006) se realizó para contenido de MK 5, 10 y 20% obteniéndose el pico de resistencia para MK 10%, sin embargo, para los ensayos de John (2013) y Dhinakaran et al. (2012) el pico de resistencia se obtiene para 15%, por lo que se podría inferir si se fueran realizado diseños CON MK 15% en el ensayo Poon et al. (2006) los resultados fueran sido homólogos, ubicando MK 15% como el pico de resistencia en donde se logra reaccionar con el máximo contenido.

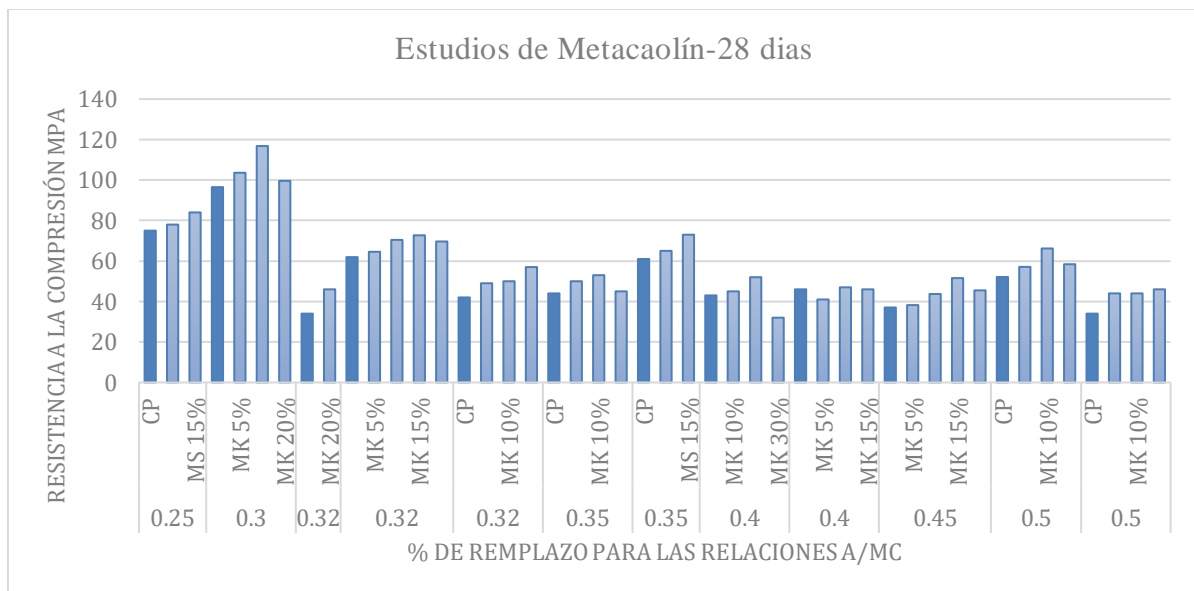


Ilustración 31. Resistencia a la compresión a los 28 días de los estudios analizados para metacaolín,

Fuente: (Autores, 2022).

Los ensayos de Torres et al. (2011) y Dhinakaran et al. (2012) usaron relaciones a/mc de 0.4 lo que permitió que pudieran desarrollar resistencias mayores. Sus resultados fueron homólogos: concreto patrón de 43 y 46 MPa y resistencias de 45 y 47 MPa para MK 10%. Para esta relación el pico cambia pasando al porcentaje de reemplazo de 20% ya que para reemplazo mayores la resistencia disminuye.

Dhinakaran et al. (2012) también realizó diseños para relaciones a/mc de 0.32 y 0.35, sin embargo, no se muestra una diferencia representativa entre ambos estudios. Para estas relaciones el pico de resistencia con 50 y 53 MPa se obtiene para MK15%. Narmatha et al. (2016) con la misma relación de 0.32 obtuvo resistencias más altas de 70 y 72 MPa para MK 10 y 15% a los 28 días. Para este caso el pico máximo se obtiene para 5%.

Poon et al., 2006 también realizó diseños con relación de a/mc de 0.3 con los que se obtuvieron el pico más alto resistencia, con valores de 99, 116 y 103 MPa para MK 20, 10 y 5% ya que, para relaciones menores, 0.25 las resistencias disminuyeron a 78 y 84 MPa para MK 5, 15%. La relación a/mc de 0.3 estudiada por Poon et al. (2006) se mostraría como óptima para una mayor resistencia, usando contenidos de remplazo de MK 10-20% siendo 20% el límite máximo de remplazo sin disminuir la resistencia.

Al analizar los resultados de la penetrabilidad de iones de cloruros a los 28 días, se observa que para todos los diseños propuestos de concretos adicionados con MK se mantiene el rango muy bajo, sin embargo, se destaca la mayor resistencia a los iones de cloruros para MK 10% Y 20%.

Tabla 51. Recopilación de estudios sobre metacaolín.

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Slump	Resistencia a la Compresión				% Aumento a los 28 días	Durabilidad													
					Edad	3	7	28		90	28	90											
Güneyisi et al., 2012	Concreto Patrón	CaO 63.6 SiO ₂ 19.9 Al ₂ O ₃ 4.54 Fe ₂ O ₃ 3.38 MgO 6.63	0.25			66	69	75															
	MK 5%	SiO ₂ 52.68 Al ₂ O ₃ 36.34												67	72	78	4.0						
	MK 15%	Fe ₂ O ₃ 2.14 Fe ₂ O ₃ 1.31												64	79	84	12.0						
Poon et al., 2006	Concreto Patrón	CaO 64.7 SiO ₂ 21	0.3			68.5	81.1	96.5	102.5		1035	Baja	931	Muy baja									
	MK 5%	SiO ₂ 53.2													73	88.2	103.6	112.9	7.4	862	Muy baja	646	Muy baja
	MK 10%	Al ₂ O ₃ 43.9													85.9	99.8	116.8	120.3	21.0	199	Muy baja	135	Muy baja
	MK 20%	TiO ₂ 1.68													70.8	87.6	99.6	113.8	3.2	240	Muy baja	124	Muy baja
Seleem et al., 2010	Concreto Patrón	SiO ₂ 20.39 Al ₂ O ₃ 5.60 Fe ₂ O ₃ 3.43 CaO 63.07	0.32					34															
	MK 20%	SiO ₂ 58.52 Al ₂ O ₃ 35.54 Fe ₂ O ₃ 1.15 CaO 1.24															46	35.3					
Narmatha et al., 2016	Concreto Patrón	SiO ₂ 34 Al ₂ O ₃ 5.50 CaO 63.00 Fe ₂ O ₃ 4.40	0.32			12		45.1	61.925														
	MK 5%														11	50.875	64.55	4.2					
	MK 10%	SiO ₂ 54.3													11.5	51.875	70.425	13.7					
	MK 15%	Al ₂ O ₃ 38.30 Fe ₂ O ₃ 4.28													10.5	54.825	72.7	17.4					
	MK 20%														10	51.4	69.65	12.5					

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Slump	Resistencia a la Compresión				% Aumento a los 28 días	Durabilidad				
					Edad	3	7	28		90	28	90		
Dhinakaran et al. 2012	Concreto patron	SiO ₂ 31.38 Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 6.89 CaO 62.2	0.32	6.5	28	31	42	53		1100	Baja	500	Muy Baja	
	MK 5%	SiO ₂ 96.88		7.5	36	40	49	54	16.7	250	Muy Baja	250	Muy Baja	
	MK 10%	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 0.28		7.2	39	45	50	55	19.0	100	Muy Baja	150	Muy Baja	
	MK 15%			5.7	41	46	57	58	35.7	50	Muy Baja	150	Muy Baja	
	Concreto patrón	SiO ₂ 31.38 Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 6.89 CaO 62.2		7	25	30	44	54		1600	Baja	500	Muy Baja	
	MK 5%	SiO ₂ 96.88		0.35	6.2	35	41	50	55	13.6	400	Muy Baja	400	Muy Baja
	MK 10%	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 0.28		8.6	39	42	53	57	20.5	100	Muy Baja	200	Muy Baja	
	MK 15%			5.3	34	39	45	55	2.3	200	Muy Baja	400	Muy Baja	
	Güneyisi et al., 2012	Concreto patrón		CaO 63.6 SiO ₂ 19.9 Al ₂ O ₃ 4.54 Fe ₂ O ₃ 3.38 MgO 6.63	0.35		42	52	61					
MS 5%		SiO ₂ 52.68		47		58	65		6.6					
MS 15%		Al ₂ O ₃ 36.34 Fe ₂ O ₃ 2.14		51		65	73		19.7					
Torres et al., 2011	Concreto patrón	CaO 61.70 SiO ₂ 20.27 Fe ₂ O ₃ 3.91 Al ₂ O ₃ 3.34 MgO 1.44	0.4	5		35	43					2007	Moderada	
	MK 10%	SiO ₂ 52.57		9		38	45		4.7			622	Muy Baja	
	MK 20%	Al ₂ O ₃ 44.95		15		41	52		20.9			410	Muy Baja	
	MK 30%	Fe ₂ O ₃ 1.50		20		25	32		-25.6			-	-	

Fuente: (Autores, 2022).

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Resistencia a la Compresión					Durabilidad					
				Edad	3*	7	28	90	% Aumento a los 28 días	28		90		
				Slump										
Dhinakaran et al. 2012	Concreto patrón	SiO ₂ 31.38 Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 6.89 CaO 62.2 MgO 2.02	0.4	7	24	36	46	54		1800	Baja	750	Muy Baja	
	MK 5%	SiO ₂ 96.88		7.5	28	34	41	56	-10.9	600	Muy Baja	500	Muy Baja	
	MK 10%	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 0.28		5.3	34	39	47	57	2.2	250	Muy Baja	250	Muy Baja	
	MK 15%			7.5	34	38	46	54	0.0	400	Muy Baja	400	Muy Baja	
John, 2013	Concreto patrón		0.45			28.74	37.04							
	MK 5%	SiO ₂ 53				32.07	38.22		3.2					
	MK 10%	Al ₂ O ₃ 45.00				38.07	43.7		18.0					
	MK 15%	CaO 0.09				41.19	51.56		39.2					
Duan et al., 2013	Concreto patrón	CaO 62.60 SiO ₂ 21.34 Fe ₂ O ₃ 3.31 Al ₂ O ₃ 4.67	0.5				36							
	MK 10%	SiO ₂ 50.27 Al ₂ O ₃ 34.46 Fe ₂ O ₃ 0.75					45		25.0					
	Concreto patrón	CaO 64.7 SiO ₂ 21		0.5		28.6	41.2	52.1	60.4		2971	Moderada	2789	Moderada
	MK 5%	SiO ₂ 53.2				32.6	45.9	57.1	66.4	9.6	2071	Moderada	1065	Baja
MK 10%	Al ₂ O ₃ 43.9		40.4		55.2	66.2	71.6	27.1	918	Muy baja	752	Muy baja		
MK 20%	TiO ₂ 1.68		30		43.2	58.4	69.1	12.1	640	Muy baja	580	Muy baja		
Dhinakaran et al. 2012	Concreto patrón	SiO ₂ 31.38 Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 6.89 CaO 62.2	0.5	9	15	22	34	43		2000	Baja	1200	Baja	
	MK 5%	SiO ₂ 96.88		5.2	24	32	44	48	29.4	750	Muy Baja	600	Muy Baja	
	MK 10%	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ 0.28		5.5	30	35	44	50	29.4	500	Muy Baja	400	Muy Baja	
	MK 15%			6.5	28	30	46	40	35.3	500	Muy Baja	500	Muy Baja	

Ceniza de Cascara de Arroz

Los estudios de ceniza de cascara de arroz usan relaciones a/mc de 0.5 a 5.6 para diferentes contenidos de remplazo. El estudio de Sequeira (2021) y Madandoust et al. (2011) mostro resultados desfavorables para los diseños con CCA con relaciones a/mc de 0.56 y 0.53 con remplazos de 15 a 25% en donde no se alcanzó la resistencia del concreto patrón a 28 días ni a los 90 días (con excepción de CCA 15% para 0.56).

Chindaprasirt et al., (2007) y Hu et al.(2020) hicieron estudios con CCA con relaciones de 0.5, sus diseños, composición y temperatura de combustión son similares, pero usaron porcentajes de remplazo diferentes. Los resultados evidencian un buen desarrollo de resistencia para contenidos entre CCA 5 y 15% de remplazo a los 28 días ya que se produce una disminución de resistencia con los diseños con CCA 20 y 40%. Indicando a 15% como el porcentaje óptimo para dicha relación a/mc.

Por otro lado, los ensayos de durabilidad muestran que el remplazo parcial con ceniza de cascara de arroz disminuye la penetrabilidad a cloruros de rango alto y moderado a rango muy bajo y bajo. Se logra observar que a medida que se aumenta el porcentaje de remplazo disminuye la durabilidad, siendo estos inversos.

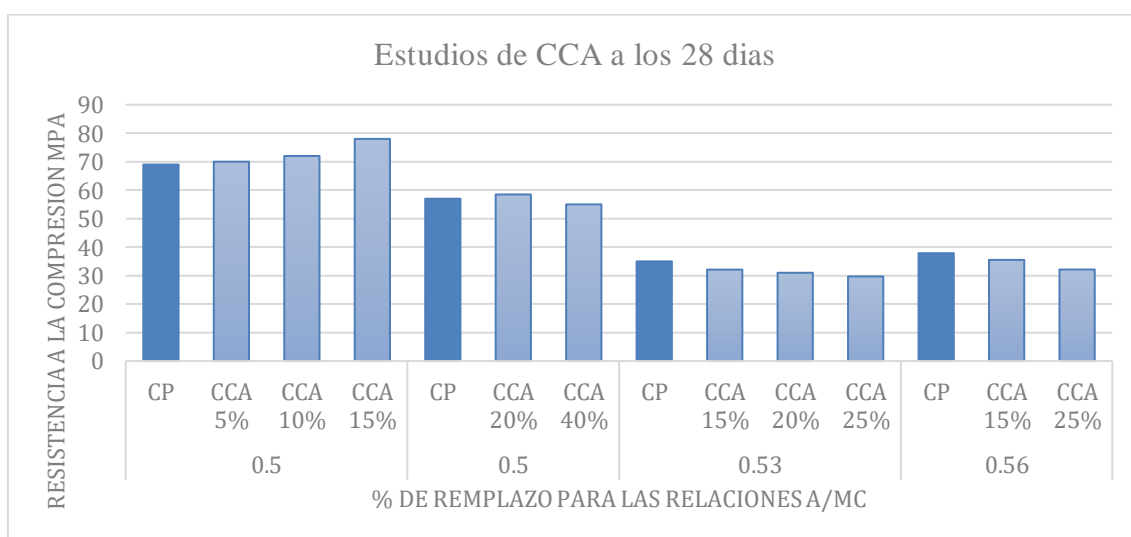


Ilustración 32. Resistencia a la compresión a los 28 días de los estudios analizados para ceniza de cascara de arroz

Fuente: (Autores, 2022).

Tabla 52. Recopilación de estudios sobre ceniza de cascara de arroz.

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Resistencia a la Compresión					Durabilidad			
				Edad	3	7	28	56	90	% Aumento a los 28 días	28	90
				Slump (cm)								
Chindaprasirt et al., 2007	Concreto Patrón	CaO 65.4 SiO ₂ 20.9 Al ₂ O ₃ 4.8 Fe ₂ O ₃ 3.4	0.5			43.5	57		60		7450	Alta
	CCA 20%	SiO ₂ 93.2 Al ₂ O ₃ 0.4 Fe ₂ O ₃ 0.1				44.5	58.5		62.5	2.6	750	Muy Baja
	CCA 40%					33.5	55		62	-3.5	200	Muy Baja
Hu et al., 2020	Concreto Patrón	CaO 63.53 SiO ₂ 19.25 Al ₂ O ₃ 3.82	0.5		38	56	69					
	CCA 5%	SiO ₂ 87.4			45	56	70		1.4			
	CCA 10%	CaO 2.07			39	59	72		4.3			
	CCA 15%	K ₂ O 5.44			45	68	78		13.0			
Madandoust et al., 2011	Concreto Patrón	SiO ₂ 20 Al ₂ O ₃ 6 Fe ₂ O ₃ 4.2 CaO 64.5 MgO 1.2	0.53	6.5			35		43.5			
	CCA 15%	SiO ₂ 90.9		5.5			32.1		42.5	-8.3		
	CCA 20%	Al ₂ O ₃ 0.83		5.6			31		41.7	-11.4		
	CCA 25%	CaO 8		5			29.7		38.5	-15.1		
Sequeira, 2021	Concreto Patrón	SiO 19.21 Al ₂ O ₃ 4.57 Fe ₂ O ₃ 2.11 CaO 62.56	0.56	18.415	28	30	38	46	45		1840	Bajo
	CCA 15%	SiO ₂ 84.98 Fe ₂ O ₃ 2.21		12.7	27	23	36	40	46	-6.2	1305	Bajo
	CCA 25%	Al ₂ O ₃ 0.43		8.89	18	20	32	38	40	-15.1	979	Muy Bajo

Fuente: (Autores, 2022).

Escoria

Los estudios donde se usó la escoria como material reactivo suplementaria se usaron relaciones a/mc de 0.5. La composición química entre los diferentes ensayos es variable. En el ensayo de Cruz. E. (2021) se ensayaron concretos con contenidos de 10, 20 y 30% de reemplazo. Los resultados para la resistencia a la compresión mostraron que no se superó el concreto patrón (24.98 MPa). El ensayo de Duan et al. (2013) también uso la relación a/mc de 0.5, realizó un ensayo con suplemento cementicio de EG 10%. Los resultados de la resistencia a los 28 días muestran valores superiores al concreto patrón de 36 MPa, superándolo en un 8% con 39 MPa para EG 10%. A pesar de ser homólogo con el ensayo de Cruz. E. (2021) en la relación a/mc, las composiciones químicas muestran gran diferencia, especialmente con la cantidad de SiO₂ que cambia de 3.17% a 34.26 % en el segundo ensayo. La escoria de Cruz. E. (2021) se compone principalmente de Fe₂O₃ (53.35%), mientras que la escoria usada en el ensayo de Duan et al. (2013) tiene solamente un 1.23% de este componente, siendo principalmente compuesto por CaO (35.17 %) y SiO₂ (34.26%).

El estudio de Seleem et al. (2010) uso la relación de 0.32 con un reemplazo de EG 20% con lo que logro obtener una resistencia a la compresión de 41 MPa siendo mayor en una 20% al concreto patrón de 34 MPa. Sin embargo, para el estudio de Tan & Pu (1998) usando una relación un poco mas baja (0.3) se logra un mejor desarrollo de resistencia de hasta 80 MPa, es decir, casi duplica el valor.

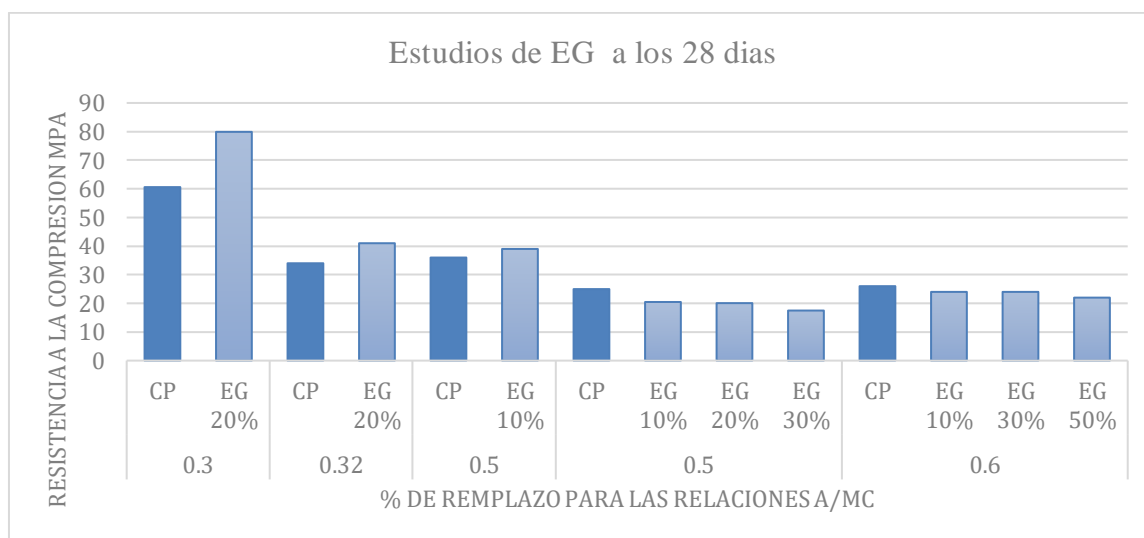


Ilustración 33. Resistencia a la compresión a los 28 días de los estudios analizados para escoria granulada

Fuente: (Autores, 2022).

Tabla 53. Recopilación de estudios sobre escoria granulada.

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Resistencia a la Compresión					% Aumento a los 28 días
				Edad	3*	7	14	28	
				Slump (cm)					
Tan & Pu, 1998	Concreto patrón	CaO 64.38% SiO ₂ 20.71% Al ₂ O ₃ 4.93%	0.3	18	53.8			60.6	
	EG 20%	CaO 35.32% SiO ₂ 36.88% Al ₂ O ₃ 14.18%		16	57.4			79.9	31.8
Seleem et al. 2010	Concreto patrón	SiO ₂ 20.39 Al ₂ O ₃ 5.60 Fe ₂ O ₃ 3.43 CaO 63.07	0.32					34	
	EG 20%	SiO ₂ 30.38 Al ₂ O ₃ 9.05 Fe ₂ O ₃ 3.82 CaO 45.88 MgO 5.39						41	20.6
Cruz. E., 2021	Concreto patrón		0.5					24.98	
	EG 10%	Fe ₂ O ₃ (53.35%) CaO (5.25)						20.48	-18.0
	EG 20%	SiO ₂ (3.17)						20.07	-19.6
	EG 30%	SO ₃ (3.17)						17.49	-30.0
Duan et al., 2013	Concreto patrón	CaO 62.60 SiO ₂ 21.34 Fe ₂ O ₃ 3.31 Al ₂ O ₃ 4.67 MgO 3.08	0.5					36	

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Resistencia a la Compresión					% Aumento a los 28 días
				Edad	3*	7	14	28	
				Slump (cm)					
Duan et al., 2013	EG 10%	CaO 35.17 SiO ₂ 34.26 Al ₂ O ₃ 17.11 MgO 6.41 Fe ₂ O ₃ 1.23	0.5					39	8.3
Yang et al, 2020	Concreto patron	CaO 62.4 SiO ₂ 21.07 Al ₂ O ₃ 5 MgO 2.07 SO ₃ 2.34	0.6		16	21	24	26	
	EG 10%	CaO 41.91			13	18	21	24	-7.7
	EG 30%	SiO ₂ 35.35 Al ₂ O ₃ 14			8	15	20	24	-7.7
	EG 50%	MgO 7.74			6	11	16	22	-15.4

Fuente: (Autores, 2022).

Tabla 54. Resumen de los mejores reemplazos cementicios para cada material.

Autor	Material	Composición Química	a/mc	Resistencia a la Compresión MPa		Durabilidad		
				Edad	28	% Aumento a los 28 días	28	
				Slump (cm)			Carga (C)	P I (cl)
Güneyisi et al., 2012	Concreto patrón	CaO 63.6 SiO ₂ 19.9 Al ₂ O ₃ 4.54 Fe ₂ O ₃ 3.38 MgO 6.63	0.25		75			
	MS 15%	CaO 0.45 SiO ₂ 90.36 Fe ₂ O ₃ 1.38			86	14.7		
Güneyisi et al., 2012	Concreto patrón	CaO 63.6 SiO ₂ 19.9 Al ₂ O ₃ 4.54 Fe ₂ O ₃ 3.38 MgO 6.63	0.25		75			
	Mk 15%	SiO ₂ 52.68 Al ₂ O ₃ 36.34 Fe ₂ O ₃ 2.14 Fe ₂ O ₃ 1.31			84	12.0		
Poon et al., 2006	Concreto patrón	CaO 64.7 SiO ₂ 21	0.3		96.5		1035	Baja
	MK 10%	SiO ₂ 53.2 Al ₂ O ₃ 43.9 TiO ₂ 1.68			116.8	21.0	199	Muy baja
	MK 20%				99.6	3.2	240	Muy baja
Poon et al., (2006)	Concreto patrón	CaO 64.7 SiO ₂ 21	0.3		97		1035	Baja
	MS 10%	SiO 85-96			108	11.8	360	Muy baja
Tan & Pu, 1998	Concreto patron	CaO 64.38% SiO ₂ 20.71% Al ₂ O ₃ 4.93%	0.3		18	60.6		
	EG 20%	CaO 35.32% SiO ₂ 36.88% Al ₂ O ₃ 14.18%			16	79.9	31.8	
Hu et al., 2020	Concreto Patrón	CaO 63.53 SiO ₂ 19.25 Al ₂ O ₃ 3.82	0.5		69			
	CCA 15%	SiO ₂ 87.4 CaO 2.07 K ₂ O 5.44			78	13.0		

Fuente: (Autores, 2022).

De acuerdo con los resultados obtenidos para cada material se puede identificar el material más viable. Teniendo como base la sostenibilidad se considerará el mejor, como aquel material que permite un buen desarrollo de resistencia y durabilidad, usando una menor cantidad de agua al tiempo que permita una mayor cantidad de reemplazo de cemento. El objetivo es disminuir las cantidades usadas de cemento para fabricar concretos con un menor impacto ambiental. Es importante destacar que factores como la

disponibilidad del material en la zona de ejecución de una obra será necesario para mantener la sostenibilidad, por lo que según sea la ubicación geográfica se debe evaluar la disponibilidad de suplementos cementicios en la industria, ya que la selección de un material a otro variará. Respecto a lo anterior se ubica este trabajo de investigación como un análisis general sin tener en cuenta una ubicación geográfica delimitada.

La primera evaluación se realiza respecto a la relación de agua-material cementante, siendo este el primer reflejo de la cantidad de materiales utilizados. Una mayor relación a/mc implica una mayor demanda de agua. Según la selección por material, el remplazo óptimo para la ceniza de cascara de arroz es la CCA 15%, la cual usa una relación de 0.5 por lo que requerirá de mayor cantidad de agua en su diseño. En comparación con los otros materiales, este es el que requiere mayor demanda de agua, puesto que los otros se mantienen con relaciones a/mc entre 0.25 y 0.3.

La segunda evaluación tiene en cuenta los porcentajes de remplazo de cemento, un binder con mayor cantidad de remplazo de material cementante será más sostenible al incluir menor cantidad de cemento. Los materiales con menor contenido de remplazo que fueron seleccionados son: MS 15%, MK 15%, MK 10%, MS 10% que a pesar de tener un buen desempeño, un diseño con mayor remplazo sería más viable.

La tercera evaluación implica el desarrollo de resistencia y durabilidad, cabe resaltar que todos los materiales seleccionados aplican como concretos de alto desempeño, superando la resistencia mínima de 48 MPa o 7000 PSI, por lo que cualquier material elegido ya beneficia el diseño. El material de selección que presenta una mayor resistencia es el MK 20% logrando un valor de hasta 99.6 MPa superando en un 3.2% su concreto patrón. Este material también muestra un grado muy bajo de penetrabilidad a cloruros permitiendo pasar solamente una carga de 240 Columbios. La EG también usa un remplazo de 20%, sin embargo, su desempeño es menor, con resistencias de 80 MPa, sin embargo, es el material que muestra un mayor desarrollo de resistencia superando al concreto patrón en un 30%. De acuerdo con lo anterior, aplicaría MK 20% como el material con mejor desempeño que permitiría una mayor cantidad de remplazo. Este material usa una relación a/mc de 0.3. Gracias al remplazo cementicio permite concretos durables y resistentes.

3 CONCLUSIONES

Esta monografía buscaba determinar la incidencia del uso de micromateriales reactivos en la composición de concretos hidráulicos como suplemento cementicio, mediante la revisión y análisis de las propiedades y efectos de los micromateriales en diferentes estudios en artículos científicos, tesis y libros, abordados a lo largo de la monografía. Del estudio y análisis realizado se obtienen las siguientes conclusiones, las cuales se espera sirvan como puente para el desarrollo de futuras investigaciones en la temática de materiales de construcción con enfoque a la sostenibilidad.

1. La industria de la construcción está enfocándose en la sostenibilidad.

La industria de la construcción en los últimos años ha optado por la investigación de los materiales de construcción con el objetivo de inclinarse a un mercado más sostenible, puesto que la fabricación del material de mayor uso, el cemento, produce gran contaminación. Los suplementos cementicios reactivos se muestran como respuesta permitiendo la disminución de la cantidad de cemento usado para la fabricación de concreto. Los micromateriales tienen orígenes industriales y naturales, los industriales normalmente son resultado del procesamiento de residuos obtenidos en los procesos de producción de otros productos, este es el caso de la CV, MS y la EG. Mediante esta práctica se logra reducir la contaminación al reutilizar residuos que de otra forma acabarían siendo tirados en rellenos sanitarios o vertederos, residuos cuyo uso y comercialización aumentaría significativamente los la relación costo beneficio en los procesos industriales. El manejo de residuos industriales es una problemática ambiental por sus altas consecuencias ecológicas, por lo que el uso de SCMs permite una reducción de costos energéticos y disminuye la generación de CO₂ producida por la fabricación del cemento. Los SCM naturales como el MK y CCA resultan del procesamiento de materiales con composiciones químicas ideales como altos niveles de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, estos son calcinados y sometidos a moliendas para alcanzar propiedades físicas ideales para su uso como micromateriales reactivos.

2. Los micromateriales cementicios suplementarios modifican la estructura de la matriz del concreto.

Las investigaciones sobre los materiales cementicios suplementarios han demostrado mejoras en las propiedades de los concretos causando efectos a nivel micro, modificando la microestructura del concreto, incidiendo en las propiedades macroscópicas como desarrollo de resistencia a la compresión y el incremento de la durabilidad. A nivel microestructural se producen dos efectos paralelos: efecto puzolánico y efecto filler. El efecto puzolánico permite la creación de geles de C-S-H, a partir de la reacción entre la sílice y el CH. Por otro lado, el efecto filler produce una densificación de la microestructura, permitiendo llenar los espacios vacíos y formar enlaces en la zona interfacial, uniendo la pasta de cemento hidratado con los agregados. Como consecuencia de los cambios microestructurales en la matriz, los concretos pasan de ser ordinarios para convertirse en concretos de alto desempeño, esto se ve reflejado en el desarrollo de la resistencia a la compresión y a los cloruros. Sin embargo, para

alcanzar tal desempeño se requiere de una selección óptima de la relación agua-material cementante y el porcentaje ideal de remplazo, en donde la portlandita reacciona en su mayoría o la totalidad de geles.

3. Los micromateriales mejoran las propiedades del concreto causando efectos como mejoras en el desarrollo de resistencia y durabilidad.

Mediante los ensayos estudiados a lo largo del trabajo de investigación, se comprobó que el uso de micromaterial genera un aumento en la resistencia y durabilidad de los diseños de concreto mostrando marcadas diferencias de un material a otro. La CV, presentaba un área superficial menor y un gran tamaño de partícula variable. Lo cual finalmente se tradujo en una necesidad de reemplazo mayor para igualar las resistencias de los otros SCM, y mayor tiempo para llegar a los niveles de resistencia alto desempeño esperada, sin embargo, esto no fue alcanzado. La CV se ubicó como el material con menor desempeño, resultado de la variabilidad de su origen, influyendo también el tipo de carbón y la temperatura de combustión. Los estudios muestran que en edades tempranas el micromaterial no reacciona, aportando solamente el cemento en la resistencia. Sin embargo, a edades tardías, a partir de los 90 días reacciona, aportando al desarrollo de resistencia alcanzando al concreto patrón, por lo que a pesar de no mostrar un desempeño diferencial su uso influiría en un menor consumo de cemento. Por otro lado, teniendo en cuenta las necesidades de la industria de la construcción, es necesario alcanzar la resistencia mínima para el desencofrado en tiempos corto, por lo que se debe evaluar la necesidad de tiempo en el proyecto. Se recomienda evaluar experimentalmente en laboratorio los efectos de la CV con menores porcentajes de remplazo CV 5-10% para relaciones a/mc de 0.2 a 0.3 en futuros trabajos de investigación.

Similar a CV, los resultados de la EG son influenciados por su origen ya que varían según la composición del metal que la produjo. Los ensayos muestran valores ligeramente superiores, esto en concordancia con la pequeña diferencia de mejora en propiedades físicas en comparación con la CV. Sin embargo, aun presenta retardo en el desarrollo de la resistencia siendo estas alcanzadas en edades tardías. La EG presenta un buen desempeño incluso para resistencias tempranas en relaciones a/mc de 0.3 y 0.32 con remplazos de EG 20%. Los efectos positivos de la inclusión del material se reducen drásticamente con el aumento de la relación a/mc 0.5, afectando la resistencia temprana, pero permitiendo obtener los resultados deseados a los 90 días. Se recomienda tener en cuenta el origen de la escoria, con el fin de que el contenido de Fe_2O_3 sea máximo posible, supliendo la carencia de Al_2O_3 y SiO_2 , por lo que se sugieren trabajos experimentales en donde se comprueben como las diferencias en la producción de ceniza volante modifican su microestructura variando los efectos que producen al ser usados como micromaterial.

En los casos del MS y CCA ambos presentan excelentes propiedades físicas y sus resultados son acorde a esto, logrando concretos de alto desempeño. Tanto el MS como la CCA se caracteriza por su alto

contenido de sílice amorfo que reacciona con la portlandita formando más gel (CSH), lo que le permite obtener mejores resistencia y mayor durabilidad. Los ensayos realizados muestran que la MS tiene un buen desarrollo para diferentes relaciones a/mc (hasta 0.5), sin embargo, las relaciones entre 0.25 y 0.3 con contenidos de 5 a 10% representan el rango óptimo que maximiza la resistencia y la durabilidad, manteniendo el alto desempeño y el rango muy bajo de penetrabilidad. Por otro lado, los ensayos de la CCA manejan un rango más limitado, sin embargo, dio indicios sobre el límite de relación a/mc, el cual corresponde a 0.5, para relaciones mayores no se logra superar la resistencia patrón a los 28 días. El rango de remplazo óptimo varía de 5 a 15%, siendo este último el óptimo para maximizar la resistencia y la durabilidad con una penetrabilidad baja. El MS y la CCA, aplican como un buen material de remplazo. Teniendo en cuenta el filtro ecológico un material con mayor remplazo sería más viable, gracias a la disminución del uso de cemento en el diseño. Se recomienda encaminar futuras investigaciones experimentales sobre CCA en donde se estudie en laboratorio los efectos de diseños de concretos con este micromaterial. Este tipo de investigación en laboratorio deberá usar como parámetro el uso de relaciones a/mc menores, con el fin de evaluar su desempeño y disminuir la cantidad de agua utilizada en el diseño.

4. El Metacaolín es el micromaterial reactivo con mejor desempeño.

Finalmente, el MK actúa acorde a las hipótesis realizadas en torno a su alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 (96.5%) y sus propiedades físicas, como una gran área superficial (15,000 – 18,000 m^2/kg) y tamaño de partícula diminuto (0.5 – 5 μm) logrando altas resistencias con un contenido de remplazo superior a los materiales evaluados anteriormente. Los ensayos de MK muestran que para todas las relaciones a/mc (0.5 a 0.32) con remplazos de hasta MK 30% permiten un buen desempeño con altas resistencias a la compresión y durabilidad, reflejada en la penetrabilidad a cloruros con un rango muy bajo. El rango de mejor desempeño ronda entre los 10 y 20% para a/mc 0.3, ubicándose MK 20% como el remplazo óptimo que maximiza sus efectos. En consecuencia, de que la evaluación realizada no tuvo en cuenta una obra, o zona delimitada, se recomienda considerar la ubicación geográfica y la disponibilidad de material cementicio suplementario. No resulta viable ni sostenible utilizar micromateriales en el diseño si el material no es de fácil obtención o su transporte descompensa la sostenibilidad del material.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Abd El-Hakim, R. T., Elgendy, G. M., El-Badawy, S. M., & Amin, M. (2021). Performance evaluation of steel slag high performance concrete for sustainable pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 0(0), 1–19.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1922908>
- Alcaraz Marín, J. (2012). Microestructura del hormigón. In *Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación* (Issue Proyecto final de carrera). <http://repositorio.upct.es/handle/10317/2863>
- Allen, E. & Iano, J. (2019) *Fundamentals of building construction: Materials and Methods*. Wiley. Séptima edición.
- American Concrete Institute. (2000). 234R-96: *Guide for the Use of Silica Fum*.
http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/234r_96.pdf
- American Concrete Institute. (2002). *Use of fly ash in concrete*. http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2322r_96.pdf
- American Concrete Institute Committee E-701. (2013). Cementitious Materials for Concrete- Bulletin E3-01. In *Concrete*. <http://www.concrete.org/general/FE3-01.pdf>
- Arredondo Rea, S. P. (2011). *Estudio Microestructural de Concretos Sustentables Aplicando Técnicas Avanzadas*. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/774>
- ASTM. (2003). Standard specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. In *ASTM Designation C: 618-03*. ASTM.
<https://civiledu.co/wp-content/uploads/2021/09/C-618.pdf>
- Bapat, J. D. (2013). Mineral Admixtures in Cement and Concrete. In *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12673>
- Bhanja, S., & Sengupta, B. (2005). Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 743–747.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.024>
- Bhargav, M., & Kumar, S. (2017). Strength and Durability Study of Geopolymer Concrete Incorporating Metakaolin and GGBS with 10M Alkali Activator Solution. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(1), 473–487.
https://www.researchgate.net/publication/316648642_Strength_and_durability_study_of_geopolymer_concrete_incorporating_metakaolin_and_GGBS_with_10M_alkali_activator_solution
- Cabrera, J., Escalante, J., & Castro, P. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *ALCONPAT*, 6(1), 64–83.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100064

- Canul Polanco, J. A. (2017). *Uso de Aditivos Químicos Para Mejorar la Durabilidad de Concretos de Alto Desempeño con Humo de Sílice*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil.
- Castellano, C. (2011). *Activación Física y Térmica de la Escoria Granulada de Alto Horno* [Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires].
<https://www.fio.unicen.edu.ar/images/stories/carreras/posgrado/hormigon/tesis/tesiscastellano.pdf>
- Chavez, C., & Guerra, Y. (2015). *Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero* [Universidad Santo Tomas].
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9685/ChavezCamilo2015.pdf?sequence=1#:~:text=En Colombia%2C para generar energía,por la contaminación que generan.>
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(5), 932–938.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.001>
- Claude. (2000) Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*,30 (9), 1349-1359. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- Czarnecki, L., & Van Gemert, D. (2017). Innovation in construction materials engineering versus sustainable development. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 65(6), 765–771. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0083>
- Cedex. (2011). *Ficha tecnica: Cenizas volantes de carbon y cenizas de hogar o escorias*.
<http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/B01FDCCB-AC8E-4089-9699-FA6413FBEE7C/119905/CENIZASVOLANTESDECARBONYCENIZASDEHOGAR.pdf>
- Colombia productiva. (2019). *Plan De Negocios: Sector de materiales de construcción*
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. de M. R., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 529–534.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>
- Cruz Edith. (2018). *Caracterización físico química de la puzolana de la localidad de tacna para determinar su poder cementante*. Universidad Nacional Jorge Baasadre Grohmann-Tacna.
- DANE. (2022). *Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM)*.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-arroz-mecanizado#:~:text=El área cosechada de arroz,el mismo periodo de 2021.>
- DANE. (2022). *Boletín técnico: Estadísticas de cemento gris*.

- Dedeloudis, C., Zervaki, M., Sideris, K., Juenger, M., Alderete, N., Kamali-Bernard, S., Villagrán, Y., & Snellings, R. (2018). Natural pozzolans. In *RILEM State-of-the-Art Reports* (Vol. 25). https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_6
- Dhinakaran, G., Thilgavathi, S., & Venkataramana, J. (2012). Compressive strength and chloride resistance of metakaolin concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(7), 1209–1217. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1235-z>
- Druta, C. (2019). Concrete Microstructure Characterization and Performance. In *Compressive Strength of Concrete* (p. 13). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90500>
- Druta, C. (2019). Concrete Microstructure Characterization and Performance. In *Compressive Strength of Concrete* (p. 13). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90500>
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013). Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.075>
- El-Chabib, H. (2020). Properties of SCC with supplementary cementing materials. In *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications* (pp. 283–308). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817369-5.00011-8>
- Falikman, V., Realfonzo, R., Coppola, L., Hájek, P., & Riva, P. (2018). Durability and Sustainability of Concrete. In *American Concrete Institute, Symposium* (Vol. 326). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51573-7>
- Fast Markets IM. (2017). *A hard sell? Metakaolin in high-performance concrete*. <https://www.indmin.com/Article/3724367/A-hard-sell-Metakaolin-in-high-performance-concrete.html#:~:text=The US%2C China and India,%2C silica fume and GGBFS>
- FAO. (2022). *Revisión a la baja del comercio mundial de cereales y su utilización en 2021/22*. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>
- Giraldo, M., & Tobón, I. (2005). Evolucion mineralogica del cemento portland durante el proceso de hidratacion. *DYNA*, 73(148). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000100007
- Gómez, A. (2009). *Caracterizacion y utilizacion de puzolanas como aditivos minerales activos*. Universidad Politecnica de Valencia.
- Gomez-Zamorano, L. Y., & Iñiguez-Sanchez, C. A. (2015). Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas. *Alconpat*, 2, 186–199.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100003&lng=es&tlng=es.

- Guerrero, V. H., Dávila, J. L., Galeas, S., Pontón, P., Rosas, N. M., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S., & Mermerdaş, K. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, 34, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017>
- Gutiérrez De López, L. (2003). El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción. In 2003.
- Habeeb, G. A., & Mahmud, H. Bin. (2010). Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. *Materials Research*, 13(2), 185–190. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000200011>
- Hu, L., He, Z., & Zhang, S. (2020). Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. *Journal of Cleaner Production*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121744>
- IndustryARC. (2021). *Silica Fume Market - Forecast(2022 - 2027)*. <https://www.industryarc.com/Report/15138/silica-fume-market.html#>
- Jamdade, S. (2021). *Metakaolin Market Forecast to 2028 - COVID-19 Impact and Global Analysis*. <https://www.theinsightpartners.com/reports/metakaolin-market>
- John, N. (2013). Strength Properties of Metakaolin Admixed Concrete. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(6), 1–7. www.ijsrp.org
- Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122(February), 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z., & Bradic, V. (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1), 35–42. <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.064>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de Concreto. In *Journal of Experimental Botany: Vol. Primera Ed.*
- LaTorre, A. (2008). La industria del cemento en Colombia. Determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005). In *Universidad Javeriana*. <https://javeriana.edu.co/biblos/tesis/economia/tesis16.pdf>

- Llanos, O., Ríos, A., Jaramillo, C. A., & Rodríguez, L. F. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. *Producción + Limpia*, 11(2), 150–160. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12>
- López, J. (2015). *Universidad Autónoma de Nuevo León*. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Madandoust, R., Ranjbar, M. M., Moghadam, H. A., & Mousavi, S. Y. (2011). Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. *Biosystems Engineering*, 110(2), 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.009>
- Mehta, K. P. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*, 23(10), 61–66. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/10735>
- Mehta, K. P; Monteiro, P. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071462899>
- Mejia, M. (2011). *Componentes alternativos para la produccion de concreto en la construccion de vivienda ambientalmente sostenible* [Universidad EAFIT]. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/7243>
- Min-Hong, Z., & Mohan, M. (1996). High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material. *ACI Materials Journal*, 93, 629–636. https://www.researchgate.net/publication/250613575_High_Performance_Concrete_Incorporating_Rice_Husk_Ash_as_a_Supplementary_Cementing_Material
- Mondal P., Shah S. P., Marks L.D., Gaitero J. J. (2010). Comparative study of the effects of the microsilica and nanosilica in concrete. *Transportation Research Journal of the Transportation Research Board*. 2141, 6-9
- Nagrockiene, D., Rutkauskas, A., Pundiene, I., & Girniene, I. (2019). The Effect of Silica Fume Addition on the Resistance of Concrete to Alkali Silica Reaction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012031>
- Narmatha, M., & Felixkala, D. T. (2016). Meta kaolin –The Best Material for Replacement of Cement in Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(04), 66–71. <https://doi.org/10.9790/1684-1304016671>
- Nath, P., & Sarker, P. (2011). Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. *Procedia Engineering*, 14, 1149–1156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>

- Nistal Cordero, Á. F., Retana Maqueda, M. J., & Ruiz Abrio, T. (2012). El Hormigón: Historia, Antecedentes En Obras Y Factores Indicativos De Su Resistencia. *Tecnología y Desarrollo*, 1–18.
- Olalekan, O., & Mangat, P. S. (2018). Characterization and pore structure of rice husk ash cementitious materials. *American Concrete Institute, ACI Special Publication, 2018-June*(SP 326). <https://doi.org/10.14359/51710978>
- Perles P. (2009). Hormigon Armado. In *Nobuko* (Vol. 1).
- Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20(10), 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001>
- Restrepo, J. C., Restrepo, O., & Tobon, J. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento portland. *DYNA*, 115, 131–141. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v73n150/a12v73n150.pdf>
- Romea, C. (2014). El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario. In *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación* (pp. 1–18). <https://doi.org/10.3926/oms.199>
- Roy, D. M., & Idorn, G. M. (1993). Concrete Microstructure. In *Strategic Highway Research Program*.
- Rukzon, S., Chindaprasirt, P., & Mahachai, R. (2009). Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(2), 242–247. [https://doi.org/10.1016/S1674-4799\(09\)60041-8](https://doi.org/10.1016/S1674-4799(09)60041-8)
- Sanchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (5th ed.). Bhandar Editores.
- Sanjuan, M., & Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf
- Sanjuan, M., & Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf
- Sathawane, S. H., Vairagade, V. S., & Kene, K. S. (2013). Combine effect of rice husk ash and fly ash on concrete by 30% cement replacement. *Procedia Engineering*, 51, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.009>
- Seleem, H. E. D. H., Rashad, A. M., & El-Sabbagh, B. A. (2010). Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures. *Construction and Building Materials*, 24(6), 878–884. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.013>

- Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, 124(June), 105799. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>
- Shiferaw, N., Habte, L., Thenepalli, T., & Ahn, J. W. (2019). Effect of Eggshell Powder on the Hydration of Cement Paste. *Materials*, 12(15), 2483. <https://doi.org/10.3390/ma12152483>
- Siddique, R., Kunal, & Mehta, A. (2016). Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete development of sustainable construction materials. In *Nonconventional and Vernacular Construction Materials* (pp. 247–303). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00011-1>
- SpendEdge. (2021). *Pig Iron Sourcing and Procurement Report by Top Spending Regions and Market Price Trends - Forecast and Analysis 2021-2025*. <https://procurement.spendedge.com/report/pig-iron-sourcing-and-procurement-intelligence-report>
- Srinivasreddy, A., Lume, E., & McCarthy, T. J. (2013). Effect of rice husk ash on workability and strength of concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. <https://doi.org/10.18178/ijscer.8.3.223-226>
- Statista Research Department. (2020). *Production of pig iron worldwide from 2009 to 2019*. <https://www.statista.com/statistics/1168624/pig-iron-production-worldwide/>
- Tan, K., & Pu, X. (1998). Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination. *Cement and Concrete Research*, 28(12), 1819–1825. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00158-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00158-6)
- Tangarife, O., & Silva, C. (2019). *Determinacion de la resistencia a compresión del concreto (3000 psi) modificado con material de cambio de fase organico*. Universidad catolica de colombia.
- The Silica Fume Association. (2014). *What is Silica Fume?* SFA. <https://www.silicafume.org/general-silicafume.html>
- Torres, J., Mejía, R., & Delvasto, S. (2011). Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado. *Ingeniería y Universidad: Engineering for Development*, 15(1), 77–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu15-1.epam>
- Vaishali, G., & Sudarsana, H. (2011). Chloride Ion Permeability Studies of Metakaolin Based High Performance Concrete. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(2), 7. https://www.researchgate.net/publication/50406933_CHLORIDE_ION_PERMEABILITY_STUDIES_OF_METAKAOLIN_BASED_HIGH_PERFORMANCE_CONCRETE
- Valderrama, C. P., Torres Agredo, J., & Mejía de Gutierrez, R. (2011). A high unburned carbon fly ash concrete's performance characteristics. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 39–46.

- Varón, J. (2005). Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz. *El Hombre y La Maquina*, 25, 128–135. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47802513>
- Wang, X. Y., & Park, K. B. (2015). Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 98, 810–819. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.099>
- Yang, H.-M., Kwon, S.-J., Myung, N. V., Kumar Singh, J., Lee, H.-S., & Mandal, S. (2020). Evaluation of Strength Development in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag Using Apparent Activation Energy. *Materials*, 13(2), 442.
- Zamudio, P., & Quiroga, J. S. (2018). *Evaluacion de material cementante basado en giraldometacaolín con activación alcanina* [Universidad Católica de Colombia]. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22857/1/TRABAJO DE GRADO.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22857/1/TRABAJO_DE_GRADO.pdf)
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>
- Zerbino, R., Giaccio, G., Batic, O. R., & Isaia, G. C. (2012). Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 36, 796–806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.049>