

**ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE  
MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS DISPONIBLES EN EL  
MERCADO COLOMBIANO**

**Andrea Yineth Romero González**

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Pregrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2020



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE  
MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS DISPONIBLES EN EL  
MERCADO COLOMBIANO**

**Andrea Yineth Romero González**

Trabajo Dirigido presentado como requisito para énfasis en estructuras

Director (a):

Ing. Joaquín Abellán García

Co-Director (a):

Ph.D. Nancy Torres Castellanos

Línea de Investigación:

Materiales

Grupo de Investigación:

Centro de Estudios de Materiales y Estructuras

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Facultad en Ingeniería Civil

Ciudad, Colombia

2020



## Resumen

Los materiales cementantes suplementarios (MCS) son aquellos que por sus propiedades pueden ser utilizados en la industria del concreto como sustitución parcial del cemento. Dentro de éstos, podemos encontrar dos grupos: los materiales cementantes, que son aquellos con la capacidad de reaccionar directamente con el agua para formar productos hidratados estables, y las puzolanas. Las puzolanas son materiales inorgánicos o artificiales, silíceos o silico-aluminosos con porcentajes bajos de calcio, magnesio, hierro, potasio y sodio, que por sí solo no tienen valor cementante, pero que son capaces de reaccionar con el agua y el CH liberado del cemento Portland hidratado para formar productos de hidratación secundarios tipo CSH o CASH (Restrepo J. C., 2006)

Los materiales cementantes suplementarios hoy en día son una solución frente a los requerimientos de la industria de la construcción, debido a que, se busca una mejora en el desempeño y en la calidad del concreto con la sustitución parcial del cemento. Dependiendo del tipo de MCS se mejoran propiedades como la resistencia, durabilidad, manejabilidad, relación de vacíos, porosidad, resistencia de ataque a los sulfatos e impermeabilidad. Además, algunos de los materiales puzolánicos artificiales son residuos de procesos termoquímicos de producción, como la ceniza volante y las escorias siderúrgicas, presentando así, ventajas a nivel ambiental y económico adicionales.

El presente trabajo consistió en la determinación del índice de actividad puzolánica según norma ASTM C311, de 11 MCS disponibles en el mercado colombiano: metacaolín, humo de sílice, carbonato cálcico, micro-carbonato cálcico, harina de vidrio reciclado, polvo de vidrio reciclado, ceniza volante, ceniza de cascarilla de arroz, FC3R, escoria de alto horno y escoria de arco eléctrico.

Entre los resultados obtenidos se destaca que las escorias de alto horno y de arco eléctrico, debido a sus propiedades hidráulicas, fueron las que obtuvieron mayor índice de actividad puzolánica, siendo este valor de 1,43 y 1,36 respectivamente. Solamente el carbonato cálcico no cumplió con la norma ASTM C618, ya que, obtuvo un índice de actividad puzolánica de 0,62, siendo el límite inferior marcado de 0,75.

**Palabras clave:** adiciones, materiales cementantes suplementarios, índice de actividad puzolánica, resistencia a compresión.

# Contenido

	Pág.
Contenido	
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
2.1    Objetivo Principal .....	2
2.2    Objetivos Especificos .....	2
<b>3. Marco teórico .....</b>	<b>3</b>
3.1    Puzolanas .....	3
3.2    Reactividad puzolánica.....	5
3.3    Ventajas de las adiciones .....	6
<b>4. Estado del arte .....</b>	<b>6</b>
4.1    Humo de sílice .....	7
4.2    Metacaolín.....	7
4.3    Ceniza volante.....	8
4.4    Polvo de vidrio .....	8
4.5    Ceniza de cascarilla de arroz .....	9
4.6    Escoria de alto horno.....	10
4.7    Escoria de arco eléctrico .....	12
4.8    Carbonato cálcico .....	13
4.9    Residuo craqueo catalítico usado .....	14
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
5.1    Selección y caracterización de los materiales.....	15
5.2    Diseño de mezcla.....	19
5.3    Preparación mezcla de mortero.....	21
5.4    Ensayo de muestras.....	24
<b>6. Resultados experimentales y discusión .....</b>	<b>24</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>28</b>
<b>8. Referencias .....</b>	<b>30</b>
<b>9. Anexos.....</b>	<b>32</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Resistencia a la compresión de MCS micro-silice y vidrio molido a diferentes edades (Trezza, 2018) .....	9
Figura 2. Resistencia a la compresión a diferentes edades sustituyendo por escoria de alto horno (EHE) (Vinasco, 2012) .....	11
Figura 3. Resistencia a la compresión a diferentes edades sustituyendo por escoria de alto horno (ERF) (Vinasco, 2012) .....	11
Figura 4. Resistencia a la compresión a diferentes edades sustituyendo por escoria de alto horno (ERE) (Vinasco, 2012) .....	12
Figura 5. Resistencia a compresión de los morteros sustituyendo por escoria de acería en 20% .....	13
Figura 6. Índice de actividad puzolánica de la caliza en función de la edad .....	13
Figura 7. Índice de actividad puzolánica para distintos porcentajes de sustitución del catalizador gastado que pasa por 0.075mm en función del tiempo de curado.....	14
Figura 8. Índice de actividad puzolánica para distintos porcentajes de sustitución del catalizador gastado sin moler y calcinado en función del tiempo .....	15
Figura 9. Granulometría del cemento y MCS (Abellán, 2020).....	16
Figura 10. Diagrama de los materiales cementantes (Xie, 2019) .....	18
Figura 11. Proceso de mezcla de morteros .....	21
Figura 12. Cubos de morteros en moldes.....	23
Figura 13. Montaje para la ruptura de cubos de mortero .....	24
Figura 14. Difracción de rayos x de la escoria de alto horno. (Abellan, 2019) .....	25

---

## Lista de tablas

Tabla 1. Composición promedio en porcentaje de una puzolana natural (Ramirez, 2018) ..	3
Tabla 2 Resistencia a compresión de probetas con sustitución de ceniza de cascarilla de arroz en porcentajes de 15 y 30% a diferentes edades (Hidalgo, 2018) .....	9
Tabla 3. Resistencia a los 28 días con diferentes porcentajes de sustitucion utilizando ceniza de cascarilla de arroz (Hidalgo, 2018) .....	10
Tabla 4. Resistencia a compresión a diferentes edades con porcentajes de sustitución por escoria de alto horno en el proceso de producción del concreto.....	10
Tabla 5. Análisis químico del cemento y MCS (Abellán, 2020) .....	17
Tabla 6. Granulometría de Arena Ottawa .....	18
Tabla 7. propiedades físicas y químicas de la arena Ottawa.....	19
Tabla 8. Cantidades para mezcla de mortero para un volumen de 125 cm <sup>3</sup> cada una .....	21
Tabla 9. Precios de cemento y MCS por kilogramo .....	23
Tabla 10. Resistencia a compresión de los morteros con sustitución del 20% de cemento por MCS y correspondiente IAP .....	25
Tabla 11. Carga final obtenida de los 36 cubos de mortero.....	33



# 1. Introducción

El concreto es el material más utilizado por el hombre después del agua. Sin embargo, es el responsable del 8% de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del mundo, debido a su principal componente: el cemento (Rodgers, 2018). Esto se debe a que la producción de una tonelada métrica de cemento genera una tonelada métrica de dióxido de carbono. Así mismo para producir una tonelada de Clinker (componente principal del cemento) se puede llegar a requerir hasta tres toneladas de recursos no renovables (Matallana, 2019). Debido a estas estadísticas, los investigadores se han enfocado en buscar soluciones para la reducción de esta huella de carbono y el impacto que se causa en los recursos naturales no renovables. Una de las propuestas mejor estudiadas es el empleo de materiales cementantes suplementarios en la sustitución parcial del cemento en morteros y concretos. Estos materiales, debido a sus propiedades cementantes y/o puzolánicas, proporcionan una respuesta al problema desde los puntos de vista ambiental, económico y técnico. Los MCS se pueden adicionar bien en el proceso de producción del cemento o en el proceso de producción del concreto (Worrell., 1999).

Las puzolanas son materiales que por sí solos no poseen ninguna propiedad cementante; están conformadas por partículas divididas y amorfas; que al entrar en contacto con un medio húmedo y a una temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio libre (CH) del proceso de hidratación del cemento, formando silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos cálcicos hidratados (CASH), principales responsables de las propiedades físicas, químicas y mecánicas en el proceso de hidratación del concreto. En los concretos adicionados se le atribuye el desarrollo de dichas propiedades al proceso de hidratación, etapa de fraguado y endurecimiento. (Restrepo J. C., 2006)

Para evaluar la capacidad cementante de las diferentes adiciones, se hace necesario realizar investigaciones en los materiales cementantes suplementarios (MCS) disponibles en el mercado colombiano debido a las ventajas anteriormente mencionadas en cuanto a temas ambientales, técnicos y de costos.

El presente proyecto dirigido busca la determinación del índice de actividad puzolánica conforme a la normativa ASTM C311, mediante evaluación de la resistencia a compresión a la edad de 28 días, de diferentes MCS accesibles en el mercado colombiano: humo de sílice, metacaolín, carbonato cálcico, micro-carbonato cálcico, harina de vidrio reciclado, polvo de vidrio reciclado, ceniza volante, ceniza de cascarilla de arroz, escoria de alto horno, escoria de arco eléctrico y residuo craqueo catalítico usado. Evaluando su composición química según la norma ASTM C618. Además del análisis técnico con el índice de actividad puzolánica se realizará el análisis económico de cada MCS.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo Principal**

Determinar el índice de actividad puzolánica según ASTM C311 de diferentes materiales cementantes suplementarios disponibles en el mercado colombiano.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar un análisis técnico económico de los diferentes MCS considerados.
- Analizar las ventajas e inconvenientes del uso de MCS en la industria del concreto.
- Evaluar la composición química de los MCS según la norma ASTM C618
- Evaluar los requerimientos físicos especificados en la norma ASTM C618

## 3. Marco teórico

### 3.1 Puzolanas

Las adiciones en el mortero y concreto son una práctica muy conocida hoy en día. El origen de las puzolanas remonta cuando los romanos le dieron uso por primera vez al confundir ceniza volcánica y añadirla junto con arena, cal y agua en la mezcla, material cementante usado en la época. Su nombre es debido a que, el hecho sucedió en la ciudad de Puzzoli, tomando como nombre genérico “Puzolana”. (Matallana, 2019) Las puzolanas se pueden clasificar como puzolanas de origen natural, mixto o artificial

#### **Puzolanas de origen natural:**

Las puzolanas naturales pueden ser de origen volcánico, surgiendo de erupciones volcánicas explosivas y depositándose en los alrededores del volcán en estado sólido. Dependiendo de la viscosidad, velocidad de enfriamiento y contenido en gases del magma fundido, pueden formarse diferentes materiales como las pumitas, pizarras, pedernales opalinos, cenizas de aspecto pulverulento (Santamaria, 1983). Los materiales de origen clástico son minerales arcillosos que tienen la capacidad de fijar cal, por ello se descartan como adición puzolánica, pues afecta en gran importancia las resistencias de las mezclas. En esta clasificación se encuentran las diatomeas que están compuestas por esqueletos silíceos de microorganismos ricas en sílice hidratadas y alta superficie específica. Debido a su contaminación por arcilla y arena, sus propiedades pueden mejorarse mediante calcinación, aunque suelen consumir mayor cantidad de agua en la mezcla por su estructura porosa y angular. (Matallana, 2019) (Santamaria, 1983)

En la tabla 1 se presenta la composición media de una puzolana natural. Siendo M la suma de los óxidos  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  y  $SiO_2$  (Ramirez, 2018):

<i>Óxidos</i>	<i>Composición media</i>
$Al_2O_3$	13.71%
$CaO$	5.23%
$Fe_2O_3$	4.72%
$K_2O$	2.22%
$MgO$	0.82%
$NaO$	2.98%
$SO_3$	0.14%
$SiO_2$	61.74%
<i>M</i>	80.17%

Tabla 1. Composición promedio en porcentaje de una puzolana natural (Ramirez, 2018)



### **Puzolanas de origen artificial:**

Son materiales que adquieren propiedades puzolánicas por un adecuado tratamiento térmico, por el cual transforman su naturaleza.

Es importante resaltar que, no todas las puzolanas tienen propiedades hidráulicas, es decir, que sean potencialmente materiales cementantes, sino que reaccionan con los productos de hidratación del cemento para formar productos hidratados secundarios. Para ello, es necesario que la sílice sea amorfa y no cristalina, para que reaccione con la portlandita (CH) en presencia de humedad formando productos tipo CSH.

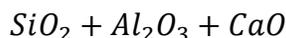
Las arcillas y esquistos calcinados son materiales naturales silicatados, compuestos principalmente por sílice y alúmina. Los minerales de las arcillas presentan actividad puzolánica cuando se calcinan a temperaturas entre 600 y 900°C y se muelen hasta alcanzar la finura del cemento. (Santamaria, 1983)

La ceniza volante es la puzolana artificial más común. Son productos industriales o residuos producidos por la combustión de carbón pulverizado y recogidos en colectores mecánicos. Las cenizas volantes utilizadas en la industria del cemento están compuestas de partículas vítreas esféricas o redondeadas y suelen ser ligeras. (Neville M., 1988) Se han utilizado otros muchos tipos de residuos que contienen sílice reactiva, tales como cenizas volantes, cenizas de cascarilla de arroz, humo de sílice, escorias de alto horno entre otros (Nurchasanah, 2013)

Hoy en día la proporción de materiales puzolánicos adicionados está en el promedio de 30% en la industria del cemento. Sin embargo, se han realizado estudios en los últimos años con el objetivo de evaluar el comportamiento al aumentar el porcentaje de estos materiales en cementos adicionados o como sustitución parcial del cemento en las mezclas. (Ramirez, 2018)

## **3.2 Reactividad puzolánica**

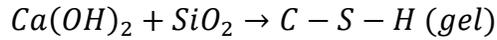
Las adiciones puzolánicas pueden tener propiedades diferentes entre sí, pero se conforman esencialmente de los mismos elementos químicos que el de clinker portland, es decir de, óxidos de sílice, de alúmina y de calcio:



Las diferencias que se presentan entre las adiciones puzolánicas radican en las proporciones de los elementos mencionados anteriormente. (Salamanca, 2000)

La puzolana es un material compuesto principalmente por sílice o sílice-alumina y alúmina reactiva, que no tienen reacción con el cemento. Sin embargo, en presencia de agua y a temperatura ambiente reacciona con los productos de hidratación del cemento, especialmente con la portlandita (CH) para formar nuevos compuestos de propiedades ligantes (Yanguatin, 2017)

Cuando se agrega la puzolana al cemento en la mezcla reacciona con la cal liberada debido a la hidratación del cemento. La reacción puzolánica consiste en la reacción entre el hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$  (portlandita) y el óxido de silicio  $SiO_2$  (sílice amorfa)



La reacción química entre la portlandita y el óxido de silicio produce silicato cálcico hidratado (C S H), que tiene propiedades cementantes que mejoran la resistencia u otras propiedades en el mortero. La presencia de sílice en el material cementante suplementario es uno de los factores necesarios para que se produzca esta reacción. Además, es necesario también que el óxido de sílice se encuentre en estado amorfo no en fase cristalina. (Hidalgo, 2018)

### 3.3 Ventajas de las adiciones

Ventajas en la fabricación de cementos o morteros:

Algunas de estas adiciones permiten desarrollar mayor resistencia en edades tardías, 28 días o más desde que se realice el curado adecuado. Se pueden llegar a altas o muy altas resistencias finales, lo cual podría compensar la eventual desventaja del desarrollo lento de resistencias en edades iniciales. Dentro de este grupo se encuentra ceniza volante tipo F y la ceniza de cascarilla de arroz. Sin embargo, otras adiciones pueden provocar todo lo contrario y desarrollar rápidamente resistencias en edades tempranas en las pastas, morteros y concretos. Entre estas se encuentra el humo de sílice, el metacaolín y las escorias de alto horno (Xie, 2019)

En general, el uso de MCS genera una matriz más densa debido al efecto de relleno y la sustitución paulatina de CH por CSH. Como consecuencia se obtiene mayor durabilidad y una menor permeabilidad. Esta menor permeabilidad, disminuye la posibilidad de penetración de cualquier agente agresor al concreto, debido a que, las partículas de las adiciones taponan los poros obteniendo menores vacíos (Salamanca, 2000).

## 4. Estado del arte

En este apartado se presentan diferentes estudios relacionados con las propiedades de morteros con sustitución parcial del cemento por materiales cementantes suplementarios en la mezcla. Se van a presentar estudios previos sobre los materiales utilizados en la presente investigación, como son el humo de sílice, metacaolín, carbonato cálcico, micro-carbonato cálcico, harina de vidrio reciclado, polvo de vidrio reciclado, ceniza volante, ceniza de cascarilla de arroz, escoria de alto horno, escoria de arco eléctrico y residuo craqueo catalítico usado.

## 4.1 Humo de sílice

En un estudio realizado por (Torres C. , 2019) se hizo una sustitución de 2.5 y 5% del peso del cemento por humo de sílice con relación agua/cementantes de 0.64. Se realizó ruptura a la edad de 3 días y se encontró un aumento de 88.7 y 62.5% en la resistencia a compresión con respecto a la muestra patrón en las mezclas adicionadas de 2.5 y 5% respectivamente. Para la edad de 7 días la muestra adicionada de 2.5% presentó un aumento de 98.4% y la muestra adicionada de 5% presentó aumento de 54.5%. Para la edad de 28 días no se presentó un aumento tan significativo con respecto a las edades tempranas, los porcentajes fueron de 22.0 y 11.6% para las muestras adicionadas de 2.5 y 5% respectivamente. Los autores concluyen que el porcentaje óptimo de adición de humo de sílice está entre 2.8 y 2.9%.

En otra investigación realizada por (Mendoza, 2018) se realizó la sustitución de cemento en porcentajes de 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 y 10% por humo de sílice, se hizo especímenes con relaciones agua/cementantes de 0.65 y 0.7. Para la relación 0.65 la mezcla con mayor resistencia fue la mezcla adicionada con 8% y para la relación 0.7 la que presentó mayor resistencia a la compresión fue de 6%. Se obtuvo un aumento de resistencia del 48.6% y 31.8% con respecto a la muestra sin ninguna adición para la relación agua/cementante de 0.65 y 0.7 respectivamente. Con respecto a la resistencia inicial ambas muestras presentaron aumento de 61% mostrando un desarrollo de resistencia a edades tardías.

## 4.2 Metacaolín

En la investigación realizada por (Escalante, 2011) se reemplazó cemento por metacaolín en niveles de sustitución de 0, 10, 20, 30, 40 y 50% y se realizó seguimiento a la resistencia a compresión a la edad de 1, 3, 7, 14, 28 y 90 días. Se encontró que, el uso de 10% a 30% de metacaolín fue favorable, pues los autores explican que hubo un aumento aproximadamente del 25% a edades tempranas y un 37% a la edad de 90 días. Por otro lado, en la sustitución de 40 y 50% se obtuvo bajas resistencias a edades tempranas, con una disminución del 87.5%. Sin embargo, la resistencia creció rápidamente a tal punto que en edad de 90 días se presentó un aumento de resistencia de 5 y 29% para 40 y 50% de sustitución por metacaolín, respectivamente.

En otra investigación realizada por (Restrepo J. C., 2006) los resultados arrojaron que, al realizar sustituciones de cemento por metacaolín en porcentajes del 10% se lograron los valores máximos de resistencias a compresión. Valores superiores a este porcentaje de sustitución no muestran aumentos significativos en la resistencia. Las máximas resistencias relativas se encontraron a la edad de 14 días, donde explican que la actividad puzolánica llegó a su punto máximo de reacción en este periodo de tiempo.

En un estudio realizado por (Torres J. , 2007) determina el índice de actividad puzolánico para dos tipos de metacaolín enmarcado en la norma ASTM C311 y C618. El metacaolín A tiene un 49% de pureza y el metacaolín B tiene 97% de pureza. A los 28 días de edad supera el índice de 75% pedido por la norma para ambos casos, Se obtiene un 50% adicional a lo especificado. Los autores indican que el metacaolín con 97% de pureza presenta un desempeño mecánico superior a edades tempranas. Aunque el metacaolín A es de baja pureza cumple con las especificaciones para material puzolánico obteniendo un índice de 112%.

### **4.3 Ceniza volante**

En un estudio realizado en la Universidad del Valle, Se realizó una sustitución del cemento en porcentajes de 10, 20 y 30% por ceniza volante. Para el caso del mortero con sustitución del 10% presentó un incremento en la resistencia a compresión del 35% a la edad de 28 días con respecto a la muestra sin ninguna adición. Para las mezclas adicionadas con ceniza volante en porcentajes de 20 y 30% sucede totalmente lo contrario, se presenta una disminución importante en la resistencia a compresión a los 28 días de edad. Según los autores es posible que este comportamiento se invierta a mayor edad del mortero cuando las reacciones puzolánicas avancen en mayor grado. También es importante resaltar que la resistencia a los 28 días depende directamente del tamaño de la partícula, parámetro que pudo afectar, ya que la ceniza volante utilizada en esta investigación fue de elevado tamaño (5 veces la del cemento). Los autores llegaron a la conclusión que el porcentaje óptimo de esta sería de 10% (Burgos, 2012)

### **4.4 Polvo de vidrio**

En un estudio realizado por (Trezza, 2018) comparó la resistencia compresión de especímenes en las cuales se hizo la sustitución de cemento por micro-sílice en 8% del peso, en otros se hizo la sustitución por el polvo de vidrio en porcentajes de 8 y 24%. En todos los especímenes se mantuvo la relación agua/cementante de 0.5. Se encontró que en la muestra con 8% de vidrio molido el efecto de actividad puzolánica compensó el reemplazo a los 2 días y lo supera los 7 y 28 días. Para el porcentaje de sustitución de 24% no se logra la resistencia respecto a la dosificación patrón (probetas sin ningún tipo de sustitución de material suplementario) hasta a la edad de 28 días que lo supera levemente.

Con respecto al MS presenta mejor comportamiento en las tres edades. Una de las causas es la hidratación temprana, pues la incorporación de vidrio molido al cemento portland, ejerce un principio una actividad de dilución retrasando las reacciones de hidratación, alargando el periodo durmiente y disminuyendo el calor de hidratación en edades tempranas (Trezza, 2018). A continuación, se presentan los resultados obtenidos en una gráfica (figura 1) donde CP es la mezcla sin sustitución, 8MS 8% de sustitución del cemento por micro-sílice, 8BG 8% de sustitución del cemento por vidrio molido y 24BG 24% de sustitución de cemento por vidrio molido (Trezza, 2018).

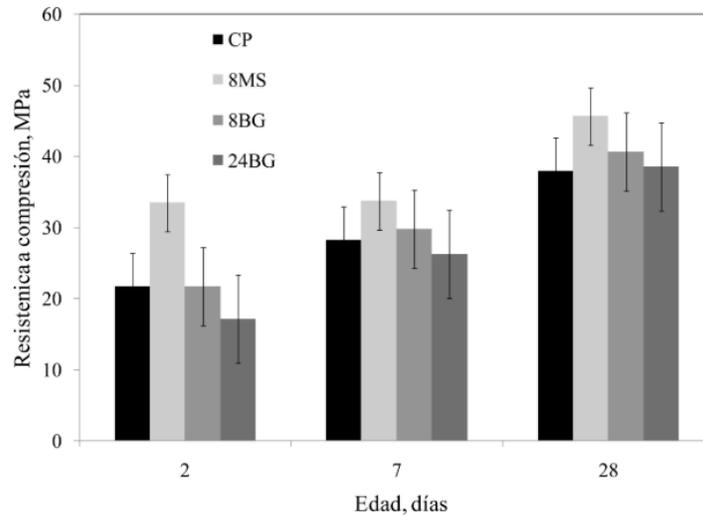


Figura 1. Resistencia a la compresión de MCS micro-silice y vidrio molido a diferentes edades (Trezza, 2018)

## 4.5 Ceniza de cascarilla de arroz

En un estudio realizado por. (Hidalgo, 2018) se analizó la sustitución del 15 y 30% de cemento por cascarilla de arroz en probetas sometidas a diferentes pruebas para su caracterización. Entre ellas, la resistencia a la compresión se evaluó a la edad de 3, 7, 28 y 98 días. Los morteros con sustitución de 15% presentaron valores similares al mortero de control (mortero sin ninguna sustitución) y solo a partir de los 28 días lo superaron levemente. Con el porcentaje de sustitución de 30% se presenta resistencia superior a la muestra de control a los 98 días y siendo solo un cambio de 7.5%. En la siguiente tabla se presentan los resultados, en donde CA es ceniza de cascarilla de arroz

<i>Edad</i>	<i>Control</i>	<i>CA 15%</i>	<i>CA 30%</i>
3 días	41.98 MPa	40.91 MPa	33.92 MPa
7 días	48.46 MPa	47.57 MPa	40.43 MPa
28 días	50.99 MPa	54.03 MPa	47.49 MPa
98 días	56.17 MPa	61.2 MPa	60.41 MPa

Tabla 2 Resistencia a compresión de probetas con sustitución de ceniza de cascarilla de arroz en porcentajes de 15 y 30% a diferentes edades (Hidalgo, 2018)

A continuación, se presenta una tabla resumen de diferentes investigadores con la resistencia a compresión a los 28 días y con diferentes porcentajes de sustitución:

Investigadores	Ceniza de cáscara de arroz	Resistencia a los 28 días (control) [MPa]	Resistencia a los 28 días (CA) [MPa]
<b>Rashid</b>	10%	33.02	28.9
	15%		30.84
	20%		29.96
	30%		21.93
<b>Baeza</b>	10%	38	37.5
<b>Antiohos</b>	10%	54.6	50.7
	20%		49.5
	30%		47.3
	10%		53.8
	20%		51.4
	30%		48.8
<b>Xu</b>	10%	49.83	47.3
	20%		46.49
<b>Chindaprasirt and Rukzon</b>	10%	57	58.2
	20%		56.5

Tabla 3. Resistencia a los 28 días con diferentes porcentajes de sustitución utilizando ceniza de cascarilla de arroz (Hidalgo, 2018)

En el estudio realizado por Rashid, se encontró que, la resistencia a partir de los 28 días supera levemente a la de control, pero a largo plazo la resistencia se ve superada por el mortero de 15% y 20% de sustitución, llegando a la conclusión que el rango óptimo de sustitución del cemento por la ceniza de cascarilla de arroz estaría entre 15 a 20%

## 4.6 Escoria de alto horno

En la investigación realizada por (Vinasco, 2012) se utilizaron diferentes tipos de escoria de alto horno denominadas como EHE, ERF, y ERE. Se elaboraron muestras con diferentes porcentajes de sustitución 10, 20 y 30% y se evaluó para diferentes días de edad 1, 3, 7, 28, 56, 90, 120. El resumen se encuentra en la siguiente tabla:

<i>Edad</i>	<i>Control</i>	<i>10% EHE</i>	<i>20% EHE</i>	<i>30% EHE</i>	<i>10% ERF</i>	<i>20% ERF</i>	<i>30% ERF</i>	<i>10% ERE</i>	<i>20% ERE</i>	<i>30% ERE</i>
1	15.4	16.57	14.4	10.98	16.38	7.75	6.77	17.06	11.18	9.51
3	33.73	32.75	26.97	20.50	32.66	30.4	29.32	30.89	24.81	22.26
7	41.68	40.40	32.75	32.26	36.58	33.15	30.69	36.19	34.03	29.52
28	47.37	48.44	43.25	36.57	54.23	49.92	36.77	47.76	41.48	33.54
56	52.07	50.50	50.21	39.81	56.78	52.37	37.76	51.29	47.17	42.86
90	53.05	54.82	48.15	41.38	57.96	52.37	41.48	51.29	47.66	43.35
120	58.06	56.58	53.35	47.17	49.33	49.92	34.91	50.90	49.82	47.86

Tabla 4. Resistencia a compresión a diferentes edades con porcentajes de sustitución por escoria de alto horno en el proceso de producción del concreto

Las figuras 2-4 muestran los resultados de la resistencia a compresión obtenidos de los especímenes con los diferentes porcentajes de sustitución de los tres tipos de escorias de alto horno en función del tiempo:

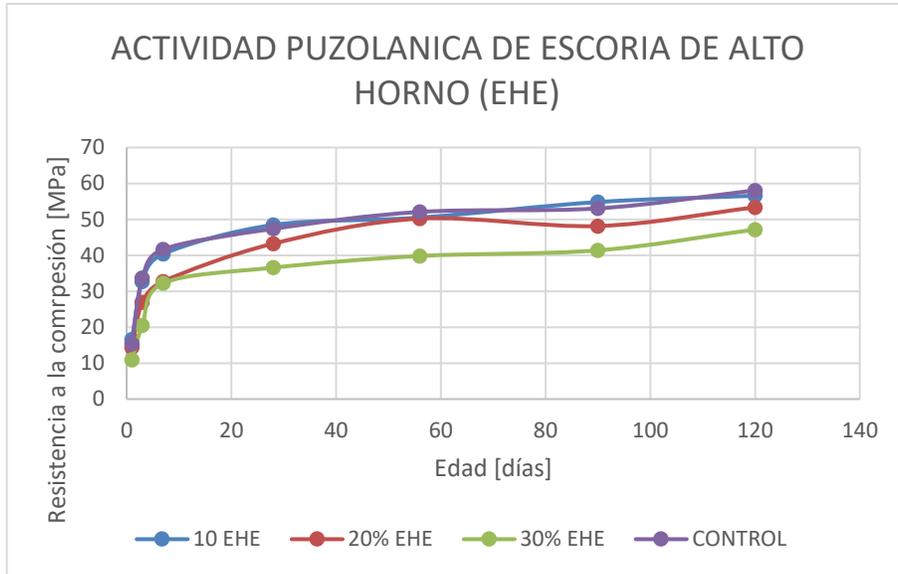


Figura 2. Resistencia a la compresión a diferentes edades sustituyendo por escoria de alto horno (EHE) (Vinasco, 2012)

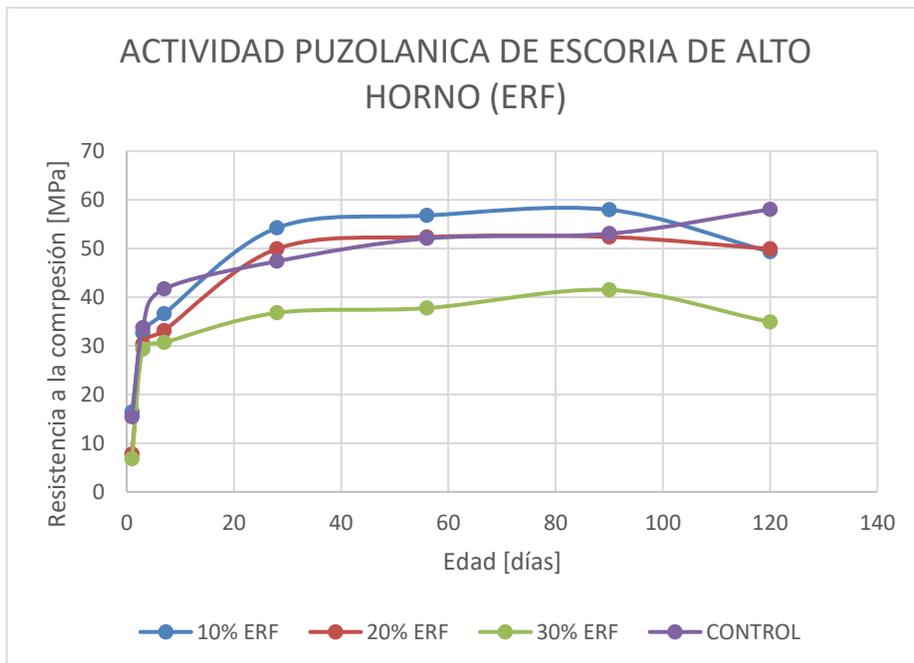


Figura 3. Resistencia a la compresión a diferentes edades sustituyendo por escoria de alto horno (ERF) (Vinasco, 2012)

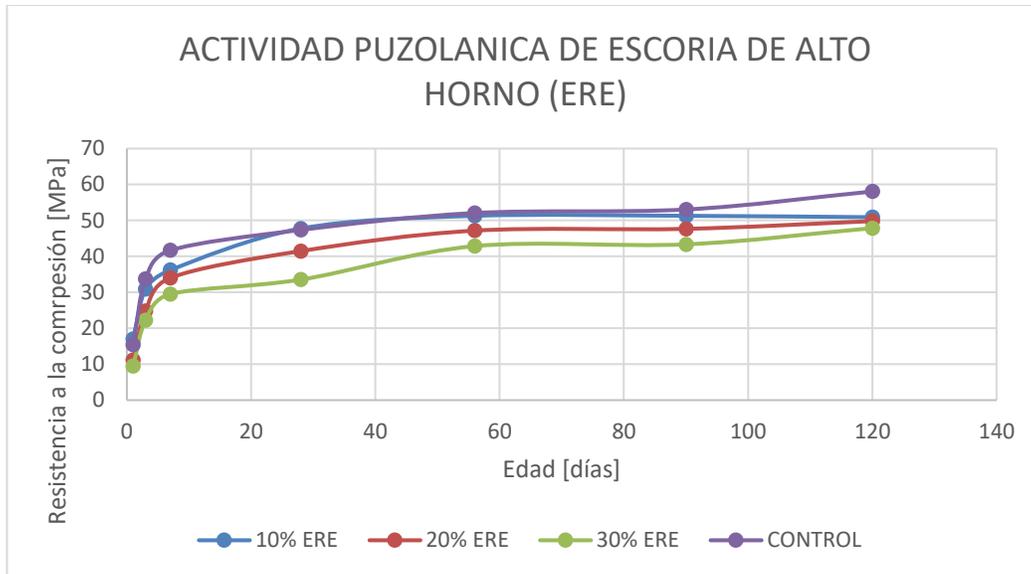


Figura 4. Resistencia a la compresión a diferentes edades sustituyendo por escoria de alto horno (ERE) (Vinasco, 2012)

Se puede observar según las gráficas que, las escorias de alto horno ERF, ERE y EHE tiene un comportamiento similar e incluso superior en algunos casos a la muestra de control en todas las edades, cuando el porcentaje de sustitución parcial fue del 10%. Para mayores porcentajes de sustitución, las resistencias caen en todos los casos. (Vinasco, 2012)

## 4.7 Escoria de arco eléctrico

En un estudio realizado por (Soto, 2010) se realizó la evaluación de la escoria de arco eléctrico como MCS. La fuente de obtención de este residuo es proveniente de una metalurgia con horno de arco eléctrico. En la metodología desarrollada se sustituyó el 20% del peso del cemento por este material puzolánico, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la figura 5 donde el patrón representa la muestra sin ningún tipo de sustitución.

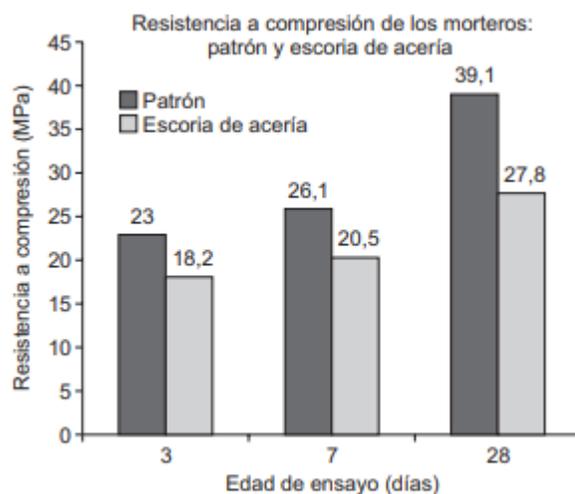


Figura 5. Resistencia a compresión de los morteros sustituyendo por escoria de acería en 20%

Como se puede observar en el gráfico de barras, la muestra con escoria de arco eléctrico a las edades de 3, 7 y 28 días no superó a la muestra patrón. Los autores explican que, la escoria de arco eléctrico utilizada no ha desarrollado actividad puzolánica a esa edad. Por lo tanto, dejan como recomendación evaluar dicha resistencia a edades como 60 y 90 días para observar mejor el comportamiento (Soto, 2010).

## 4.8 Carbonato cálcico

En un estudio realizado por (Tobon, 2008) se sustituyó el cemento en porcentajes de 15, 20 y 25% de calizas con fracciones de carbonato cálcico (% de  $\text{CaCO}_3$ ) <70%, 70-80% y >80%. Se evaluó la resistencia mecánica a la edad de 3, 7 y 28 días con el fin de hallar el índice de actividad puzolánico. En la siguiente figura se encuentran los resultados del índice de actividad puzolánica en porcentaje:

MUESTRAS	INDICE (IP)		
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
RK 1 (15>80)	60,15	58,10	60,15
RK 2 (20>80)	<b>70,93</b>	<b>73,14</b>	<b>70,93</b>
RK 3 (25>80)	79,45	88,03	79,45
RK 4(15% 70 - 80)	70,18	90,13	70,18
RK 5 (20% 70 - 80)	<b>81,95</b>	<b>95,15</b>	<b>81,95</b>
RK 6 (25% 70 - 80)	81,20	89,97	81,20
RK 7 (15% < 70)	72,43	75,73	72,43
RK 8 (20% < 70)	<b>86,97</b>	<b>95,47</b>	<b>86,97</b>
RK 9 (25% < 70)	85,46	89,97	85,46
TIPO III	100,00	100,00	100,00

Figura 6. Índice de actividad puzolánica de la caliza en función de la edad

Las calizas con porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  menor al 70% fueron las que presentaron mejores resultados en cuanto al índice de actividad puzolánico, aun en cantidades superiores a 20%. Además, en otros ensayos se verificó que no modifica otras propiedades como tiempo de fraguado, expansión y la demanda de agua. Sin embargo, los autores recalcan que no se puede considerar como puzolana según la definición tradicional al no cumplir con el valor mínimo de suma de óxidos establecido en la ASTM C618. Como tal no producen ni la disminución del porcentaje de portlandita ni el aumento de CSH que se espera de un material puzolánico. (Tobon, 2008)

#### 4.9 Residuo craqueo catalítico usado

En un análisis realizado por (Strubinger, 2014) se realizó la evaluación del índice de actividad puzolánica en morteros. Se reemplazó el cemento por dos tipos de residuo craqueo catalítico. El primer catalizador gastado molido hasta pasar por 0.075mm y el segundo catalizador gastado sin moler. A continuación, se presentan los índices de actividad puzolánica de ambos tipos de catalizador con diferentes porcentajes y a edades distintas (Figuras 7 y 8):

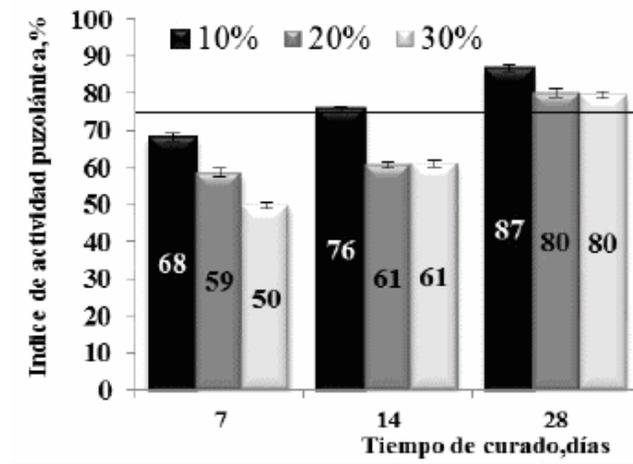


Figura 7. Índice de actividad puzolánica para distintos porcentajes de sustitución del catalizador gastado que pasa por 0.075mm en función del tiempo de curado

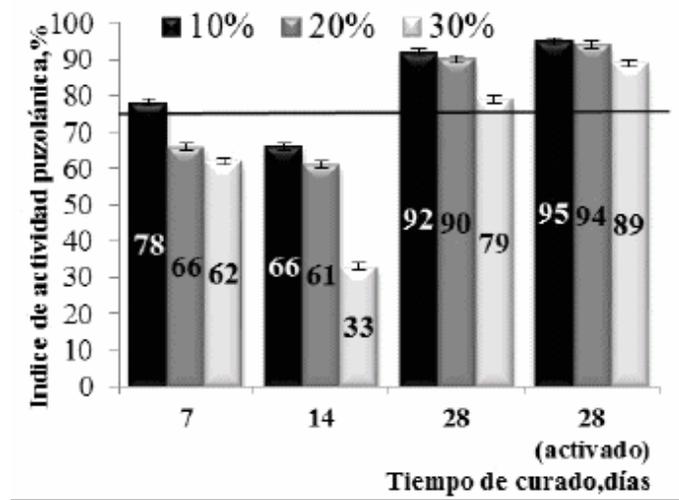


Figura 8. Índice de actividad puzolánica para distintos porcentajes de sustitución del catalizador gastado sin moler y calcinado en función del tiempo

Ambos tipos de catalizador superan el índice de actividad puzolánico exigido por la normativa ASTM C618 siendo mayores de 0.75 a los 28 días. Aunque los autores resaltan, y se puede observar en las gráficas, que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución baja el índice de actividad puzolánica. Por lo tanto, recomiendan que, para un mayor aprovechamiento de este material, se reemplace en porcentajes de 10 y 20%. También sustentan el hecho con el porcentaje de cal fijada en los morteros con 30% de sustitución, ya que, refleja el límite de adición puzolánica. Además, se observa un comportamiento mejor en el segundo tipo de catalizador, pues con el 10% de sustitución y a edad de 7 días, ya supera el índice de actividad puzolánico exigido por la norma.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Selección y caracterización de los materiales

#### Materiales cementantes

Los materiales utilizados en el proyecto son de procedencia colombiana. El cemento es procedente de la empresa Argos, de la planta de Rio claro, y clasifica como cemento tipo ASTM III. La cascarilla de arroz, con la que se obtiene la ceniza, es procedente del departamento de Tolima de producción agraria. El vidrio reciclado proviene de la empresa Cristalería Peldar en Zipaquirá, Cundinamarca. La escoria de arco eléctrico es procedente de la empresa DIACO en Tuta, Boyacá. Por otra parte, la escoria de alto horno es procedente de Acerías Paz del Rio. El FC3R es un subproducto del refinado de petróleo de la refinería de Ecopetrol en Barrancabermeja. El carbonato cálcico y micro-carbonato cálcico son suministrados por la distribuidora comercial de Omya

Andina. El humo de sílice es procedente de la empresa Toxement. Por último, la ceniza volante procede de la central eléctrica de Termotasajero y el metacaolín procede de la empresa Corona. En la Figura 9 se encuentra la granulometría del cemento y de los materiales cementantes suplementarios utilizados en el proyecto:

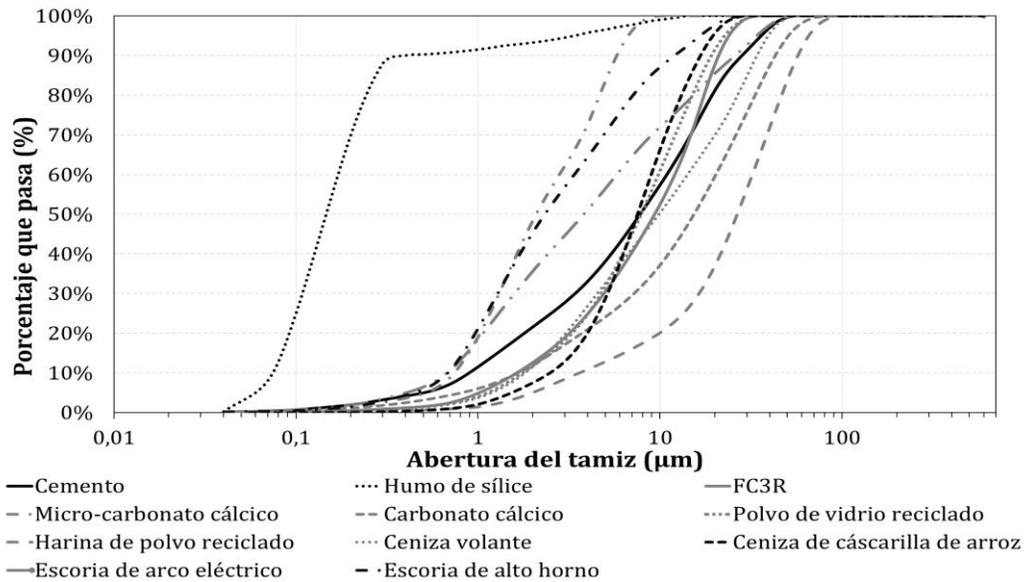


Figura 9. Granulometría del cemento y MCS (Abellán, 2020)

Debido a su importancia en el presente proyecto, en la siguiente tabla se muestra la composición química del cemento y los materiales cementantes:

Análisis	C	HM	FC3R	MK	CC	MCC	HV	PV	CV	CCA	EAH	EAE
<b>químico</b>												
<b>Gravedad</b>												
<b>específica</b>	3.16	2.20	2.76	2.66	2.73	2.73	2.55	2.55	2.32	2.16	2.95	3.15
<b>(gr/cm<sup>3</sup>)</b>												
<b>Pérdida por</b>	2.58	0.60	10.61	2.21	42.41	42.21	1.00	0.80	11.54	4.82	0.00	4.67
<b>ignición (%)</b>												
<b>SiO<sub>2</sub>%</b>	19.42	92.29	39.61	52.17	0.90	0.90	72.89	75.47	50.09	88.59	36.93	21.70
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%</b>	4.00	0.59	42.47	39.11	0.10	0.10	1.67	1.09	22.26	0.31	16.45	6.20
<b>CaO%</b>	64.42	3.89	2.85	0.78	55.51	55.51	9.73	9.02	2.19	0.74	33.78	33.13
<b>MgO%</b>	1.52	0.26	0.07	0.19	0.70	0.70	2.08	1.97	0.53	0.66	3.91	10.60
<b>SO<sub>3</sub>%</b>	1.93	0.07	0.62	0.22	0.10	0.10	0.01	0.00	0.03	0.26	2.51	1.14
<b>Na<sub>2</sub>O%</b>	0.19	0.31	0.61	0.24	0.03	0.03	12.54	11.65	0.31	0.26	0.39	0.15
<b>K<sub>2</sub>O%</b>	0.39	0.54	0.06	0.20	0.01	0.00	0.76	0.75	0.99	2.46	0.40	0.03
<b>TiO<sub>2</sub>%</b>	0.38	0.01	0.67	1.48	0.00	0.00	0.04	0.04	1.05	0.02	0.57	0.42
<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>%</b>	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21	3.41	1.98
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%</b>	3.61	0.24	0.69	1.07	0.05	0.05	0.81	0.79	9.33	0.29	1.24	18.92

**Tabla 5. Análisis químico del cemento y MCS (Abellán, 2020)**

En donde C representa el cemento, HM humo de sílice, FC3R residuo craqueo catalítico, MK metacaolín, CC carbonato cálcico, MLP micro-carbonato cálcico, HV harina de vidrio reciclado, PV polvo de vidrio reciclado, CV ceniza volante, CCA ceniza de cascarilla de arroz, EAH escoria de alto horno y EAE escoria de arco eléctrico

Según lo enmarcado la norma ASTM C618, para que un material cumpla como material puzolánico debe cumplir que, el trióxido de azufre esté presente como máximo en un 4%, es decir, todos los materiales seleccionados cumplen con esta condición. Además, la suma de los componentes en porcentaje, óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y el óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) debe ser como mínimo del 70%, condición que no cumplen los materiales carbonato cálcico, micro carbonato cálcico, escoria de arco eléctrico y escoria de alto horno. Sin embargo, se utilizaron para evaluar su actividad puzolánica, aunque no cumplan los criterios de norma. Hay que recalcar que las escorias son susceptibles de poseer propiedades hidráulicas (Xie, 2019). Como se puede observar en el siguiente diagrama las escorias no se encuentran en el grupo de las reacciones puzolánicas. Las escorias se encuentran en el grupo de reacciones hidráulicas, junto con el cemento portland, es decir las

escorias no necesitan de la portlandita del cemento, son capaces de producirlas por si solas para poder reaccionar y generar C-S-H

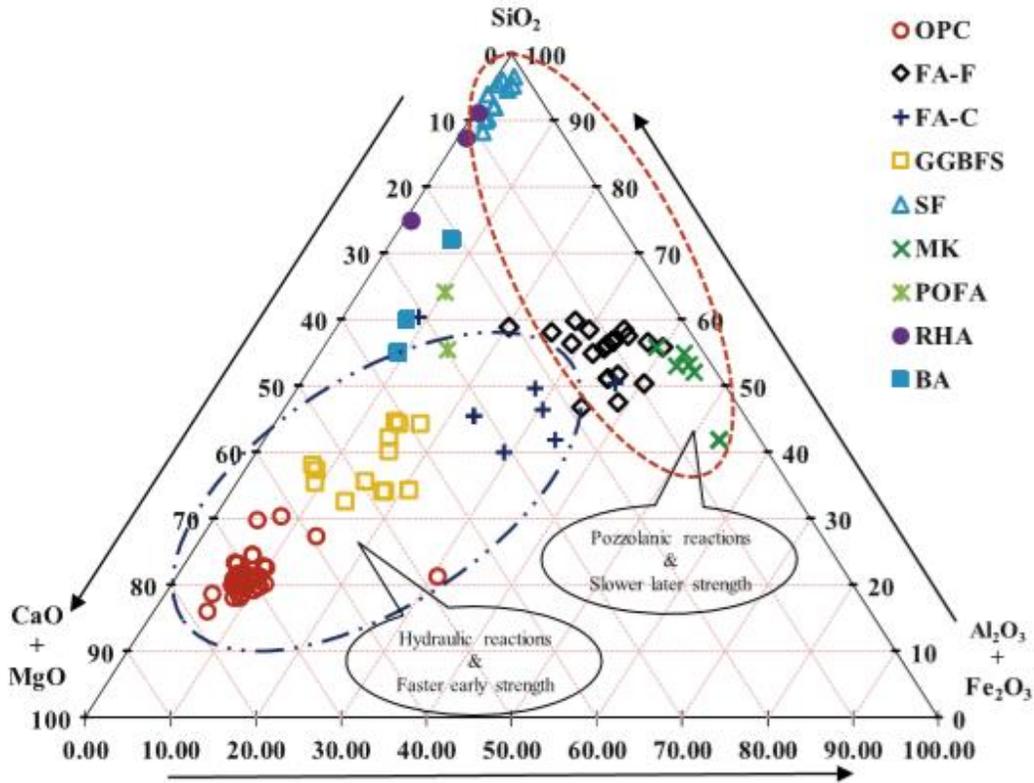


Figura 10. Diagrama de los materiales cementantes (Xie, 2019)

### Arena

La arena utilizada fue arena Ottawa. A continuación, se presenta su granulometría, tamaño mínimo de 300  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$

No. Malla	Retenido individual
US	[%]
20	0,01
30	0,56
35	15,42
40	33,62
45	36,87
50	9,42
70	3,89
Fondo	0,21

Tabla 6. Granulometría de Arena Ottawa

Propiedades físicas y químicas de la arena Ottawa:

<b>Esfericidad</b>	<b>0,7-0,8</b>
<b>Redondez</b>	0,7-0,8
<b>Turbidez</b>	$\leq 250$
<b>Densidad aparente [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,52
<b>Gravedad específica</b>	2,65
<b>Solubilidad ácida [%]</b>	$\leq 2$
<b>Clasificación de resistencia al crush [K]</b>	7

Tabla 7. propiedades físicas y químicas de la arena Ottawa

**Agua:**

El agua utilizada fue agua ordinaria disponible del grifo.

## 5.2 Diseño de mezcla

El diseño de mezcla fue desarrollado mediante los parámetros de la norma ASTM C311/C311M en donde especifica una sustitución del material suplementario cementante del 20% del peso del cemento. Se mantuvo una relación agua/cementante constantes en todas las mezclas, aunque no se mantenga constante el flujo debido a las diferentes características de los SCMs. Esto con la finalidad de no afectar a la resistencia, pues es conocido la relación entre el contenido de agua y la resistencia de los morteros, siguiendo las recomendaciones de (Pourkhorshidi, 2010)

Se prepararon en total 12 mezclas, uno sin sustitución de MCS y las otras once reemplazando el cemento por los materiales cementantes suplementarios. En la siguiente tabla se tienen las cantidades de materiales para cada mezcla, preparadas para un volumen de 3 cubos de aristas 5cm, un total de 125 cm<sup>3</sup>:



Mezcla	Cemento [g]	Tipo de SCM	SCM [g]	Arena [g]	Agua [g]
1	271,86	C	0	747,61	144,58
2	217,49	Humo de Sílice	54,37	747,61	144,58
3	217,49	FC3R	54,37	747,61	144,58
4	217,49	Metacaolin	54,37	747,61	144,58
5	217,49	Micro Carbonato cálcico	54,37	747,61	144,58
6	217,49	Carbonato cálcico	54,37	747,61	144,58
7	217,49	Polvo de vidrio reciclado	54,37	747,61	144,58
8	217,49	Harina de vidrio reciclado	54,37	747,61	144,58
9	217,49	Ceniza volante	54,37	747,61	144,58
10	217,49	Ceniza de cascarilla de arroz	54,37	747,61	144,58
11	217,49	Escoria alto horno	54,37	747,61	144,58
12	217,49	Escoria arco eléctrico	54,37	747,61	144,58

Tabla 8. Cantidades para mezcla de mortero para un volumen de 125 cm<sup>3</sup> cada una

### 5.3 Preparación mezcla de mortero

El procedimiento para la preparación de mezcla estuvo acorde a lo enmarcado en la norma técnica colombiana 112 (NTC 112), siguiendo los tiempos y velocidades de mezcla. Las mezclas que tienen MCS se adicionaron al mismo tiempo que se adicionó el cemento, se realizó una mezcla de control sin ninguna adición y 11 mezclas con reemplazo del 20% del peso del cemento por diferentes materiales cementantes suplementarios. Las cantidades de mezcla están expresadas en la tabla 8



Figura 11. Proceso de mezcla de morteros



La figura 12 presenta los cubos de mortero luego de 1 día de edad, se marcaron correspondientemente a la tabla 8, además para identificar su cara expuesta



**Figura 12. Cubos de morteros en moldes.**

El proceso de curado en los cubos de mortero se desarrolló con respecto a la norma ASTM C311.

A continuación, se presentan los precios del cemento y los MCS, para posterior análisis de costos:

<b>Material</b>	<b>Precio [\$/kg]</b>
<b>Cemento</b>	350
<b>Humo de silice</b>	1950
<b>Ceniza volante</b>	150
<b>Residuo craqueo catalítico usado</b>	100
<b>Polvo de vidrio reciclado</b>	120
<b>Harina de vidrio reciclado</b>	80
<b>Escoria de arco eléctrico</b>	115
<b>Escoria de alto horno</b>	175
<b>Metacaolín</b>	800
<b>Carbonato cálcico</b>	210
<b>Micro-carbonato cálcico</b>	265
<b>Ceniza de cascarilla de arroz</b>	550

**Tabla 9. Precios de cemento y MCS por kilogramo**

## 5.4 Ensayo de muestras

En estado endurecido se realizó el ensayo de resistencia a compresión a la edad de 28 días en una máquina de compresión con capacidad de 1000 kN, siguiendo la norma ASTM C109. La velocidad de aplicación de carga fue de 1 mm/min. El montaje se presenta en la siguiente figura:



Figura 13. Montaje para la ruptura de cubos de mortero

## 6. Resultados experimentales y discusión

A partir de los resultados obtenidos, se halló el valor representativo, es decir, el valor promedio de la resistencia de las tres muestras hechas para cada dosificación, en donde se evaluó en el rango de aceptación de 10.5% según la norma ASTM C311. Los valores se presentan en la siguiente tabla incluyendo el índice de actividad puzolánica:

MUESTRA	SCM	F' <sub>c</sub> [MPa]	IAP
1	C	19,7	1
2	HS	24,1	1,22
3	FC3R	19,3	0,98
4	MK	22,1	1,12
5	MCC	12,3	1,14
6	CC	22,5	0,62
7	HV	17,7	0,90
8	PV	22,4	1,14
9	CV	18,3	0,93
10	CCA	20,4	1,03
11	EAH	28,2	1,43
12	EAE	26,8	1,36

Tabla 10. Resistencia a compresión de los morteros con sustitución del 20% de cemento por MCS y correspondiente IAP

A partir de la tabla 10 en donde se muestra el índice de actividad puzolánica, se puede observar que las escorias de alto horno y la escoria de arco eléctrico fueron los materiales cementantes suplementarios que desarrollaron mayores resistencias a los 28 días presentando un índice de actividad puzolánica de 1,43 y 1,36 respectivamente.

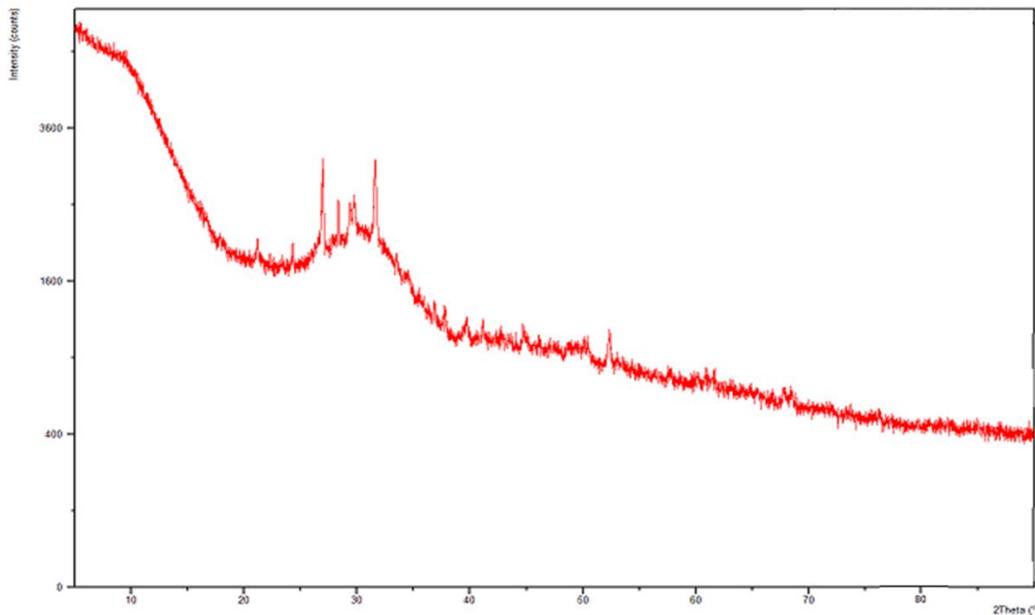


Figura 14. Difracción de rayos x de la escoria de alto horno. (Abellan, 2019)

En la figura 14 se aprecia el análisis DRX de la escoria de alto horno. A partir de eso, se evidencia fácilmente la presencia de material amorfo, condición principal para el desarrollo



de la actividad hidráulica, así como el poco porcentaje de material cristalino. Condiciones que favorecieron claramente la resistencia a compresión a los 28 días. También se le puede atribuir al alto valor de relación agua/cementantes, pues la cantidad de agua necesaria influyó bastante en poder desarrollar el proceso de hidratación. Otro factor que sustenta los resultados obtenidos es el tamaño de partícula medio de esta escoria ( $d_{50}=2$  micras), ver figura 9 lo que permite por un lado subir la densidad de empaquetamiento del mortero, a la vez que aumenta su reactividad por el incremento de la superficie específica de la partícula. También se le puede atribuir a las propiedades hidráulicas que tiene las escorias pues estos MCS no son puzolanas (Xie, 2019), no necesitan del proceso de hidratación del cemento y pueden adquirir resistencia mecánica por sí solas.

En la norma ASTM C618 como requerimiento principal en las propiedades físicas específica que, la resistencia a compresión del mortero con MCS desarrolle como mínimo el 75% de la resistencia del mortero patrón, es decir, el índice de actividad puzolánica que se halló enmarcado en la norma ASTM C311. Como se observa en la tabla, el único material que no cumplió estas condiciones es el carbonato cálcico. Resultado esperado ya que, este MCS apenas tiene un 1.05% en la suma de los óxidos de sílice, aluminio y hierro. Sin embargo, para un menor tamaño de partícula del carbonato cálcico ( $d_{50}=2$  micras caso del MCC ver figura 9), la resistencia a compresión supera a la de la mezcla de referencia. Esto podría explicarse por el incremento en el empaquetamiento de partículas del concreto debido al tamaño del micro carbonato.

El índice de actividad puzolánico del humo de sílice fue de 1.22, cumpliendo con el requerimiento exigido por la norma ASTM C618. La efectividad que presenta el humo de sílice se le puede atribuir a su notable efectividad química. Su elevado contenido de compuestos químicos activos, principalmente sílice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) es del 92.29% de su composición total (Ver Tabla 5). Además, el humo de sílice es el MCS más fino de los trabajados, característica que aporta a su resistencia a compresión y durabilidad. Aunque debería de evaluarse su uso, ya que, tiene un costo más elevado que el del cemento.

El residuo de craqueo catalítico usado, la harina de vidrio reciclado y ceniza volante, aunque cumplieron con el requisito de la norma ASTM C618 al obtener un índice de actividad puzolánica mayor a 0.75, no alcanzaron la resistencia de la muestra patrón. Sin embargo, tal y como puede observarse en la tabla 9, en donde se tienen los precios de los MCS, estos materiales tienen menor precio que el cemento, por lo tanto, podrían ser una solución viable desde el punto de vista ambiental y económico.

El metacaolín presentó un índice de actividad puzolánico de 1,12. Siendo uno de los MCS con los mejores resultados. Se le atribuye a la presencia de aluminosilicato reactivo, que representa el 91,28% del compuesto total (ver Tabla 5).

El buen índice de actividad puzolánica obtenido en el polvo de vidrio reciclado se le puede atribuir a su tamaño de partícula, siendo de  $7\mu\text{m}$ . Pues al compararlo con la harina de vidrio reciclado, comparación justificada debido a que tienen su misma procedencia, la única diferencia encontrada es su tamaño de partícula, siendo más fino el polvo de vidrio (Ver figura 9). Su composición química presenta un elevado contenido en sílice amorfa (Ver tabla 5). Cabe resaltar que el índice de actividad puzolánica de la harina de vidrio de bastante menor.

El MCS ceniza de cascarilla de arroz, cumplió con lo establecido en la norma ASTM C618. Además, superó levemente la resistencia del mortero patrón. En la tabla 5, se puede observar en su composición química, la gran presencia de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) amorfa, como se explicó anteriormente es uno de los responsables de la buena actividad puzolánica. Sin embargo, es uno de los MCS más caros, incluso más que el cemento, debido a su transporte y quemado a temperatura controlada.

## 7. Conclusiones

A excepción de un material utilizado en el proyecto todos los materiales cumplieron con la normativa ASTM C618 al tener un índice de actividad puzolánica superior al 75%. Los mejores índices de actividad puzolánica fueron de los MCS escoria de alto horno y escoria de arco eléctrico, debido a sus posibles propiedades hidráulicas. Además, presentando costos más bajos entre los MCS y el mismo cemento, estos dos materiales presentarían la mejor alternativa de sustitución de 20% en peso del cemento con una relación agua/cementantes de 0,53 para la producción de concreto.

El humo de sílice y la ceniza de cascarilla de arroz tienen composiciones químicas parecidas y presentan alta actividad puzolánica debido a su elevado contenido en sílice amorfa. El humo de sílice obtuvo mejores resultados debido a su reducido tamaño y gran superficie específica, pero se podría dejar en segundo plano como una alternativa debido a su alto costo.

El micro carbonato cálcico, aunque no cumplió con los parámetros de la norma ASTM C311, tuvo un buen índice de actividad puzolánica. Se le atribuye a su tamaño de grano, es un material muy fino, que claramente, contribuyó a la resistencia a compresión a edad de 28 días.

Materiales como el residuo craqueo catalítico y ceniza volante, cumplieron con la norma obteniendo un índice de actividad puzolánica superior a 0.75. Aunque es importante resaltar que no lograron sobrepasar la resistencia del mortero patrón y que sus precios son más bajos que el cemento. Debido a sus propiedades y a su bajo costo pueden presentar una alternativa en la industria, pero es importante evaluar otras propiedades.

El vidrio reciclado obtuvo buenos resultados. Ambos tipos de vidrio, harina y polvo de vidrio reciclado presentan pocas diferencias en su composición química. Se le atribuye la mejoría en

el índice de actividad puzolánico en el polvo de vidrio reciclado a su tamaño medio de partícula ( $d_{50}=2$  micras), pues es mucho más fino que la harina de vidrio reciclado. Aunque presenta mayor precio que la harina de vidrio reciclado, éste sigue siendo menor que el cemento y su relación beneficio costo lo hace interesante para la industria del concreto.

El carbonato cálcico fue el único material descartado como MCS pues no cumplió con la norma ASTM C311 y aun así se le aplicó el ensayo con las mismas condiciones que los otros materiales. El carbonato cálcico tampoco cumplió la norma ASTM C618, pues su índice de actividad puzolánica fue de 0,62, además presenta un precio elevado con respecto a los MCS utilizados.

Como se mencionó anteriormente solo uno se descartó por resistencia, los otros diez MCS cumplieron con las normas estudiadas. El humo de sílice, metacaolín y ceniza de cascarilla de arroz presentan valores superiores al precio del cemento, por lo tanto, no sería beneficiosos en el ámbito económico, por lo que su uso se debería limitar a aplicaciones en las que fuesen imprescindibles (concretos de altas prestaciones, por ejemplo). Como futuras líneas de investigación, podríamos citar la evaluación de los materiales cementantes utilizados en el presente trabajo frente a otras propiedades importantes en el concreto como la absorción inicial, la resistencia a cloruros y sulfatos, o la retracción autógena, para así poder escoger la mejor alternativa con respecto a la aplicación final del concreto.

## 8. Referencias

Abellan, J. (2019).

Burgos, D. (2012). *Durabilidad de morteros adicionales con cenizas volantes de alto contenido de carbón*. Cali.

Cáceres, S. H. (2018). *Use of the flying ash in the dosing of the concrete as a substitute for the cement*. Puno.

Escalante, I. (2011). *Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja*. Mérida: Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción.

GUTIÉRREZ, R. (s.f.). EFECTOS DE LA ADICIÓN DE METACAOLÍN.

Hidalgo, S. E. (2018). *EVALUACIÓN DE LA REACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA CENIZA DE PAJA DE ARROZ*. Valencia.

Matallana, R. (2019). *El concreto, fundamentos y nuevas tecnologías*. Bogotá.

Mendoza, J. (2018). *INFLUENCIA DEL PORCENTAJE, TIPO Y DOSIFICACIÓN DE MICROSÍLICE EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y CAPILARIDAD EN MORTEROS ELABORADOS CON CEMENTO TIPO V*. Trujillo.

Pourkhorshidi, A. (2010). *Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans*. Berlin.

Ramirez, D. A. (2018). *DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA DEFINIR EL POTENCIAL PUZOLÁNICO DE UN DEPÓSITO MINERAL CONTEMPLANDO ASPECTOS GEOLÓGICOS*. Medellín.

Restrepo, J. C. (2006). *EFECTOS DE LA ADICIÓN DE METACAOLÍN EN EL CEMENTO PÓRTLAND*. Medellín.

Restrepo, R. T. (s.f.).

Rodgers, L. (2018). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. BBC News.

Rubio, M. D. (2011). *RESISTENCIA MECÁNICA DE HORMIGONES CON SUSTITUCIÓN DE UN PORCENTAJE DE CEMENTO POR POLVOS DE HUMO Y ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO*. Andalucía.

Salamanca, R. (2000). *Los cementos adicionados*. Bogotá.

- Santamaria, F. S. (1983). *Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción*.
- Soto, O. (2010). *EVALUACIÓN DE ESCORIA DE ACERÍA DE HORNO ELÉCTRICO PARA SU EMPLEO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN*. São Paulo.
- Strubinger, A. (2014). *Riesgo ambiental y uso de catalizador gastado de fcc en mezclas de morteros*. Caracas.
- Tobon, J. (2008). *BEHAVIOR OF PORTLAND CEMENT BLENDED WITH LIMESTONES OF DIFFERENT PURITY DEGREES*. Medellin .
- Torres, C. (2019). *MEJORAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL MORTERO DE RECUBRIMIENTO CONVENCIONAL ADICIONANDO HUMO DE SÍLICE*. Bogotá.
- Torres, J. (2007). *INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS CAOLINES SOBRE EL DESEMPEÑO DE MORTEROS ADICIONADOS CON MK*. Bogotá: Revista DYNA.
- Torres, J. (2010). *Effects of Metakaolin Percentages in the Final Properties of Blended Concrete*. Cali.
- Torres, N. (2014). *ESTUDIO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE CONCRETOS ADICIONADOS CON CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALÍTICO USADO (FCC)*. Bogotá.
- Trezza, M. A. (2018). *Behavior of the ground glass waste in blending cements: Comparative study with microsilice*. Olavarría.
- Vinasco, J. C. (2012). *EVALUACIÓN DE ESCORIAS DE CÓRDOBA PARA SU UTILIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO PÓRTLAND*. Medellin.
- Xie, T. (2019). *A unidied model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials*. Victoria.
- Yanguatin, H. (2017). *Reactividad puzolánica de arcillas caoliníticas*. Bogotá.

## 9. Anexos

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión a 28 días están presentados en la siguiente tabla, en donde las columnas (3) y (4) son las medidas de la cara del cubo a fallar.

<i>Cubo</i>	<i>Tipo de SCM</i>	<i>Lado [cm]</i>	<i>Lado [cm]</i>	<i>Carga final [kgf]</i>	<i>Resistencia [Mpa]</i>
1-a	C	5,04	5,11	5186,892	19,74
1-b	C	5,14	5,02	5313,552	20,19
1-c	C	5,13	5,05	5059,712	19,14
2-a	HS	5,01	5,14	6597,742	25,12
2-b	HS	5,02	5,16	6425,772	24,32
2-c	HS	5,09	5,12	6057,882	22,79
3-a	FC3R	5,11	4,91	5118,812	20,00
3-b	FC3R	5,01	5,03	4785,212	18,61
3-c	FC3R	4,96	5,07	4938,272	19,25
4-a	MK	5,12	4,97	5115,422	19,70
4-b	MK	5,13	4,905	5944,362	23,16
4-c	MK	5,15	4,96	6090,572	23,37
5-a	MCC	5,04	5,02	5831,152	22,59
5-b	MCC	5,11	4,99	5735,312	22,05
5-c	MCC	5,05	4,96	5822,672	22,79
6-a	CC	4,97	5,075	2805,882	10,90
6-b	CC	5,04	5,05	3244,162	12,49
6-c	CC	5,11	5,035	3533,592	13,46
7-a	HV	5,09	4,97	4595,932	17,81
7-b	HV	5,06	5,045	4537,492	17,42
7-c	HV	5,16	5,075	4773,502	17,87
8-a	PV	4,995	5,08	5442,612	21,03
8-b	PV	4,98	5,04	6118,012	23,90
8-c	PV	5,03	5,02	5732,752	22,26
9-a	CV	5,12	5,1	4679,702	17,57
9-b	CV	5,15	4,98	4850,392	18,54
9-c	CV	5,13	5,03	4916,762	18,68
10-a	CCA	5,02	5,1	5013,752	19,20
10-b	CCA	5,06	5,05	6517,722	25,01
10-c	CCA	5,01	5,05	4379,222	16,96
11-a	EAH	5,085	4,86	7824,872	31,04

<b>Cubo</b>	<b>Tipo de SCM</b>	<b>Lado [cm]</b>	<b>Lado [cm]</b>	<b>Carga final [kgf]</b>	<b>Resistencia [Mpa]</b>
<i>11-b</i>	EAH	5,07	4,96	7512,122	29,29
<i>11-c</i>	EAH	5,05	5,08	6375,722	24,36
<i>12-a</i>	EAE	5,05	4,95	6641,412	26,05
<i>12-b</i>	EAE	5,2	4,965	6649,132	25,25
<i>12-c</i>	EAE	5,125	4,99	7559,242	28,98

**Tabla 11. Carga final obtenida de los 36 cubos de mortero**