

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN DE  
MORTEROS DE ESCORIA DE ALTO HORNO ACTIVADOS  
ALCALINAMENTE**

ANDRÉS IVÁN VÁSQUEZ MELO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.

2015

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN DE  
MORTEROS DE ESCORIA DE ALTO HORNO ACTIVADOS  
ALCALINAMENTE**

Trabajo de grado presentado para optar al título  
de Ingeniero Civil

**Asesor Disciplinar:**

Ing. Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres

**Asesor Metodológico:**

Lic. Laura Milena Cala Cristancho

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.

2015

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de experiencias y de felicidad.

A mis padres por ser mis guías y ejemplo en todos los momentos de la vida, por los valores que me han inculcado y por apoyarme durante el desarrollo de mi vida. A demás por darme la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mis hermanas por su compañía y colaboración en todos los momentos que lo necesite y por su ejemplo de desarrollo profesional.

Al Ing. Arnold Gutiérrez por haberme brindado la oportunidad de trabajar de su mano en el desarrollo de este trabajo de tesis. Por todo el apoyo, colaboración y enseñanzas que obtuve de parte de él en todo mi proceso como profesional.

A la Lic. Laura Cala y el Lic. Roy Morales por sus recomendaciones y asesorías metodológicas. A demás por su paciencia, colaboración y apoyo recibido desde el momento que empecé a desarrollar este trabajo de tesis.

A Anyela Acero por su gran amistad que me brindo desde el momento que nos conocimos, por su compañía y colaboración en todo el tiempo que compartimos juntos en la Universidad.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2. ANTECEDENTES.....	13
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. HIPÓTESIS.....	18
5. JUSTIFICACIÓN.....	19
6. MARCO REFERENCIAL .....	20
6.1. MARCO CONCEPTUAL .....	20
6.1.1. Geopolímeros .....	20
6.1.2. Escoria de alto horno .....	20
6.1.3. Origen de la activación Alcalina .....	22
6.1.4. Activador Alcalino.....	23
6.1.5. Productos de hidratación .....	25
6.1.6. Reacción de la activación alcalina de escoria de alto horno .....	26
6.1.7. Resistencia mecánica del gel CSH .....	27
6.1.8. Arena de Rio .....	27
6.2. MARCO LEGAL .....	28
7. METODOLOGÍA.....	29
7.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN .....	29
7.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	29
7.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN .....	29
7.3.1. FASE I Caracterización de Materias Primas .....	29
7.3.2. FASE II Determinación de resistencia.....	30
7.3.3. FASE III Comparación de resultados.....	30
7.3.4. FASE IV Análisis de finura de la Escoria de Alto Horno.....	30
7.3.5. FASE V Cambio Volumétrico y eflorescencia .....	30
8. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	31
8.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS .....	31
8.1.1. ARENA DE RIO .....	31
8.1.2. ESCORIA DE ALTO HORNO .....	32
8.1.3. CEMENTO PORTLAND TIPO I .....	35
8.1.4. ACTIVADORES ALCALINOS .....	35
8.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CSH.....	36
8.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTERO A BASE DE ESCORIA .....	39
8.4. EQUIPOS DE LABORATORIO.....	40
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
9.1. MORTEROS DE ESCORIA DE ALTO HORNO, ANÁLISIS POR MOLARIDAD DEL NaOH.....	43
9.2. MORTEROS DE ESCORIA DE ALTO HORNO, ANÁLISIS POR RELACIONES WATERGLASS/NaOH.....	45

9.3.	COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ESCORIA DE ALTO HORNO Y CEMENTO PORTLAND TIPO I .....	47
9.4.	FINURA DE LA ESCORIA .....	50
9.5.	EFLORESCENCIA DE LOS MORTEROS .....	51
9.6.	CAMBIO VOLUMÉTRICO .....	52
10.	CONCLUSIONES .....	54
11.	RECOMENDACIONES .....	56
12.	BIBLIOGRAFÍA .....	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Bolas de molienda .....	22
Tabla 2 Solubilidad de los Productos de Hidratación, EAH y CP .....	25
Tabla 3Etapas de la Activación Alcalina .....	26
Tabla 4Marco legal .....	28
Tabla 5Matriz de Producción .....	29
Tabla 6Granulometría de la arena .....	31
Tabla 7Composición Química Escoria .....	33
Tabla 8pH Activadores Alcalinos .....	36
Tabla 9 Gel CSH Características .....	38
Tabla 10Retracción lineal .....	52

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Cantidad de Sílice Soluble .....	36
Gráfica 2 Morteros de EAH con NaOH 2M .....	43
Gráfica 3 Morteros de EAH con NaOH 3M .....	43
Gráfica 4 Morteros de EAH con NaOH 4M .....	44
Gráfica 5 Morteros de EAH relación 0,5 .....	45
Gráfica 6 Morteros de EAH relación 1,0 .....	45
Gráfica 7 Morteros de EAH relación 1,5 .....	46
Gráfica 8 Morteros de EAH relación 2,0 .....	46
Gráfica 9 Comparación EAH y CP1 .....	49
Gráfica 10 Finura de la EAH .....	50
Gráfica 11 Eflorescencia .....	51
Gráfica 12 % Eflorescencia por Molaridad .....	52
Gráfica 13 Cambio volumétrico .....	53

## LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Molino de Bola .....	21
Imagen 2 Clasificación de los Cementos alcalinos .....	23
Imagen 3 Diagrama Ternario de Fases .....	24
Imagen 4 EAH Pasa 100 .....	32
Imagen 5 EAH Pasa 200 .....	32
Imagen 6 Ensayo de Densidad EAH.....	34
Imagen 7 Gel CSH.....	37
Imagen 8 Relación 1:1 .....	39
Imagen 9 Relación 1:1,5 .....	39
Imagen 10 Mezcladora de morteros .....	40
Imagen 11 Balanza digital.....	41
Imagen 12 Calibrador .....	41
Imagen 13 Equipo Electro-Hidráulico digital. ....	42



## INTRODUCCIÓN

El cemento Portland es el material de construcción más utilizado en el mundo gracias a todas las características físico-mecánicas favorables que presenta; sin embargo, su producción requiere procesos energéticos costosos y los daños ambientales son muy altos debido a la gran cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera.

A partir de las políticas medio ambientales tomadas en cuenta en los últimos años se ha generado la necesidad de un nuevo material constructivo (como uso alternativo) capaz de garantizar o mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad que ofrece hoy en día el cemento Portland y a su vez que requieran menor costo de fabricación y su afectación al medio ambiente sea menor.

Dentro de estos nuevos materiales se encuentra la escoria de alto horno producto de la fusión del hierro y de las cuales en Colombia es poco conocido hasta el momento y su uso en la elaboración de elementos estructurales es nula. Estas escorias se caracterizan por presentar mayores ventajas frente al cemento Portland cuando son activadas alcalinamente, tales como: mayores resistencias mecánicas, menor costo económico y ambiental, mejor respuesta ante el ataque químico de sulfatos, agua marina y ácidos.

El uso de la escoria de alto horno como material constructivo no es nuevo para otros países como la antigua Unión Soviética, pero para el nuestro que se encuentra en vía de desarrollo traería grandes beneficios ya que el costo de su producción es muy bajo, se solucionaría el problema que se tiene para su almacenamiento y se evitaría la destrucción de canteras naturales. Según FICEM<sup>1</sup> en el año 2012 la producción de cemento Portland en América Latina fue liderada por Brasil seguido por México, Colombia y Argentina, en nuestro país fue aproximadamente 10.925.000 Toneladas la producción de Cemento y de acuerdo a Sánchez<sup>2</sup> para este mismo año la producción de escoria granulada de alto horno fue cerca de 253.200 toneladas, lo que indica que apenas se produce un 2,3% de cantidad de escoria comparada con la producción de cemento en Colombia, lo cual se podría considerar como alternativa, aunque está lejos de ser la solución real al problema medio ambiental.

Por las razones anteriormente mencionadas la comunidad científica sigue adelantando diferentes investigaciones con el fin de resolver las permanentes incógnitas que genera dicho material y su uso apropiado en la industria de la construcción.

---

<sup>1</sup> FICEM. Informe Estadístico 2013. pp. 1-51

<sup>2</sup> SANCHEZ, H. Estado de Arte Sobre Las Escorias Negras de Horno de Arco Eléctrico y Sus Aplicaciones En Pavimentos. V Cong. Inter. de Ing. Civil. Universidad Santo Tomas. 2014. pp. 1-14.

A continuación se presenta un análisis frente a la resistencia a la compresión que pueden desarrollar las escorias de alto horno cuando son activadas alcalinamente con Hidroxido de Sodio (NaOH) con diferentes molaridades y a su vez al ser mezclado en distintas proporciones con Waterglass. Del mismo modo se estudia la influencia que tiene la finura de la escoria en la resistencia a la compresión, la eflorescencia producto de la reacción química y su percepción de cambio volumétrico todo esto comparado con cemento Portland Tipo I bajo las mismas condiciones de curado de la escoria.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los materiales utilizados en la industria dejan residuos luego de ser utilizados para elaborar sus productos, pero estos aún tienen propiedades físicas y químicas que se pueden aprovechar en el campo de la construcción, constituyéndose en una solución económica y que va en pro de la conservación del medio ambiente.

En la última década se han desarrollado diversas investigaciones encaminadas al aprovechamiento de estos materiales mezclándolos en ciertas proporciones con los elementos comúnmente utilizados en la construcción, lo que hace que en algunos casos el consumo o uso del cemento disminuya.

Partiendo de que “un horno promedio puede alcanzar a producir 10.000 toneladas de escoria al día”<sup>3</sup> se han desarrollado diversos proyectos con el fin de aprovechar este material que al bajar su temperatura rápidamente al salir del horno conserva su estado amorfo y le permite dar origen a propiedades que lo hacen ser aditivo en concretos hidráulicos y mejorando así su respuesta ante el ataque de sulfatos. Sabiendo que ésta tiene propiedades cementantes que al entrar en contacto con un activador alcalino como el Hidróxido de Sodio (NaOH) y el Waterglass se puede obtener un gel similar a la pasta de cemento, al igual que ésta tiene propiedades cohesivas y adherentes que explican su comportamiento mecánico que la convierte en un nuevo material de construcción capaz de igualar o superar a los existentes en cuanto a costos, disminución en el impacto ambiental y eficiencia en su uso.

Las propiedades mecánicas del gel realizado con escoria de alto horno e hidróxido de sodio (NaOH) han sido estudiadas y puestas a prueba en diferentes países obteniendo muy buenos resultados. Sin embargo, las investigaciones realizadas a este material se han enfocado únicamente en el gel producto de esta mezcla desde el punto físico y químico, por lo cual se dispone de pocos estudios en Colombia de la reacción que podría tener este material al ser combinado con arena para formar morteros. Por tal motivo, es necesario el estudio de aquellas propiedades mecánicas que pueden tener los morteros que cuenta con este tipo de material (Escoria de alto horno) localizado y bajo las condiciones de Colombia.

Por las anteriores razones se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la resistencia mecánica a la compresión de morteros que se obtienen a partir de escoria granulada de alto horno activados alcalinamente?

---

<sup>3</sup>Guía del Usuario de Altos Hornos. Steeluniversity (Online). Versión 1.10. 2013. pp. 1–21.

## 2. ANTECEDENTES

La creación de nuevos materiales con la capacidad de disminuir las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el mundo es un tema novedoso y por consiguiente poco desarrollado. A pesar de esto se han llevado a cabo diferentes investigaciones con escoria de alto horno alto granulada o en estado amorfo con el fin de determinar las propiedades de dicho material al entrar en contacto con diferentes tipos de activadores como lo demuestra la investigación realizada por Puertas<sup>4</sup>, en la cual, observó que la actividad hidráulica de las escorias depende fundamentalmente de su estructura amorfa, ésta a su vez, está íntimamente relacionada con la composición química e historia térmica de las mismas, por lo tanto, las escorias de naturaleza básica, es decir con relación  $\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2 > 1,0$  tienen mayor potencial hidráulico, pero si sus superficies específicas están por encima de  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  no incrementan la resistencia a la compresión a edades superiores de los 28 días. La superficie específica óptima debe encontrarse entre  $4500-6500 \text{ cm}^2/\text{g}$  para escorias ácidas y para escorias básicas debe estar entre  $4000-5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

El efecto positivo a la resistencia desde el punto de vista de la temperatura de curado se manifiesta más marcada en escorias ácidas o neutras. Dicha investigación también indica que la mezcla de activadores tiene un carácter positivo sobre el desarrollo de resistencias, pero en todos los casos el mejor activador alcalino es el Waterglass.

Cuando las sustancias activadoras tienen un pH superior a 12, forma compuestos hidratados estables, por el contrario los pH menores forman hidratos no estables y la estructura no es coherente. También observó que los morteros de escorias activadas alcalinamente tienen mayor tendencia a la formación de eflorescencias (por los poros se expulsan sales solubles de las reacciones que se cristalizan con el medio ambiente) que dependen principalmente del activador alcalino y de las condiciones de curado. El problema aparte de lo estético es la posible reducción en la impermeabilidad y durabilidad de los morteros.

La producción de hormigones a base de escorias activadas alcalinamente es mucho más económica que la elaboración de hormigones de altas resistencias con cemento Portland, el ahorro se debe a la disminución en el consumo de un 70% en combustibles y alrededor de un 60-70% en energía eléctrica.

Otros estudios llevados a cabo por Puertas, Palacios y Gutiérrez<sup>5</sup> demuestran que la preparación de morteros y hormigones de los cementos alcalinamente activados se realiza de manera análoga a la de los cementos Portland. Los

---

<sup>4</sup>PUERTAS, Francisca. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas del futuro. En: Materiales de Construcción. España. 1995, Vol. 45, pp. 1-11.

<sup>5</sup>PUERTAS, Francisca, PALACIOS, Marta, GUTIÉRREZ, RUBY. Morteros de Escorias Activada Alcalinamente. Propiedades y Durabilidad. España. Pp. 1-12

morteros de escoria activada con Waterglass experimentan una retracción seis veces superior a los correspondientes con cemento Portland, las causas de la retracción por secado se deben a la estructura y composición del principal producto (gel C-S-H) y a la elevada microporosidad de estos morteros. Cuando el activador es una disolución de NaOH los valores son sensiblemente inferiores, los mejores resultados para la resistencia a la compresión se obtiene cuando el activador alcalino es el Waterglass.

Los valores más resistentes se obtienen con escorias básicas y con una superficie específica entre 400-550 m<sup>2</sup>/Kg y si se aumenta la temperatura, se incrementa la resistencia a primeras edades pero a edades más avanzadas las resistencias disminuyen. La evolución más resistente se consigue a temperatura ambiente.

En el artículo escrito por Monzo y Col<sup>6</sup>, se trata la activación alcalina del metacaolín, que es un material pulverulento proveniente de las fábricas de porcelana. El objetivo de este trabajo es determinar el efecto que la cantidad de sílice soluble presenta en la disolución activadora y la temperatura de curado ejercen sobre las propiedades físico-mecánicas y las características mineralógicas y microestructurales de los productos formados por activación alcalina de metacaolín.

Para el trabajo mencionado en el párrafo anterior se utilizaron tres disoluciones distintas todas ellas con un porcentaje molar de Na<sub>2</sub>O próximo al 8% y porcentajes molares de SiO<sub>2</sub> y se obtuvieron como conclusiones que la incorporación de una mayor cantidad de sílice soluble al medio retarda la formación de zeolitas y da lugar a geles más ricos en Si. Ambos factores tienen un efecto beneficioso sobre la evolución de la resistencia mecánica del material. Por otro lado, la temperatura de curado acelera los procesos de reacción, lo que afecta de forma negativa la resistencia mecánica, es decir que entre mayor temperatura menor resistencia a la compresión.

En Latinoamérica también se han llevado a cabo diferentes investigaciones, específicamente en México por ESCALANTE y Col<sup>7</sup>, la cual indica que las escorias activadas con Waterglass obtuvieron los mejores resultados en cuanto a la resistencia a la compresión y los más pobres fueron para los activados con NaOH. Además que las muestras con mayor porosidad fueron las activadas con NaOH, aunque es la disolución que ataca más fuerte a la escoria, puede ocasionar la limitación de la saturación de los espacios inicialmente ocupados por agua con productos de reacción dejando una alta porosidad.

---

<sup>6</sup>MONZO, M, FERNANDEZ-JIMENEZ, A, VICENT, M, PALOMO, A Y BARBA, A Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado. Sociedad española de cerámica y vidrio. 2008, Vol. 47, n.1, pp. 35-43.

<sup>7</sup>ESCALANTE, J y Col. Reactividad y propiedades mecánicas de escoria de alto horno activada por álcalis. En: Bol. Soc. Ceram. V. México. 2002. Vol. 41, pp. 451-458.

El aumento en la temperatura fue favorable para los morteros activados con Waterglass, con ganancias entre 24-28% para los tiempos indicados, para los demás sistemas fue desfavorable y aunque el Waterglass ataca en menor grado a la escoria, éste contribuye a que productos saturen la porosidad y así dar origen a matrices más densas y compactas con excelentes propiedades mecánicas.

En Nicaragua, Espinosa y Escalante<sup>8</sup> afirman que los mejores resultados de resistencia a la compresión se han obtenido al utilizar bajas concentraciones de Waterglass como agente activador y temperatura de curado de 20°C ya que permiten un desarrollo gradual de las reacciones favoreciendo la consolidación microestructural. La activación con NaOH da como resultado microestructuras porosas y menores propiedades mecánicas.

Las variables de mayor influencia en la resistencia a la compresión son %Na<sub>2</sub>O ya que al aumentar disminuye la resistencia de las probetas.

Dicen que el activador más efectivo es el Waterglass en escorias de alto horno pero su costo es el más elevado.

En Colombia unas de las pocas investigaciones que se han realizado en cuanto a la activación alcalina fue la realizada por Bernal y Col<sup>9</sup>, en donde utilizaron una escoria de alto horno de la Fábrica Acerías Paz del Río activada con Hidróxido de Sodio y Silicato de sodio; hallaron que el incremento de la concentración de la activación reduce el tiempo de fraguado, siendo más importante en aglutinantes producidos con NaOH.

También encontraron que los tiempos de fraguado para este ligante (Escoria de Alto Horno) son muy bajos en comparación con lo que se especifica para el cemento Portland. En cuanto a las reacciones químicas producidas, no observaron fases cristalinas de tipo hidrocalcita en las muestras estudiadas, debido al bajo contenido de Mg de la escoria utilizada. Observaron que ésta es una de las principales diferencias entre las escorias colombianas y las producidas y evaluadas en Europa y Australia, donde las escorias contienen altos niveles de Mg y esas fases suelen identificarse.

Además revelaron que la naturaleza del activador alcalino, el contenido de aglutinante y el tiempo de curado influyen fuertemente en la permeabilidad de estos hormigones a base de escoria de alto horno. Y concluyeron que la Escoria de alto horno granulada de Colombia es precursor adecuado para la producción de materiales alcalinos que pueden ser utilizados como único aglutinante en la producción de morteros y hormigones, ya que estos

---

<sup>8</sup>ESPINOZA PÉREZ L. J. y ESCALANTE GARCIA J. I. Morteros a Base de Vidrio de Desecho/escoria de Alto Horno; Activación Mecanoquímica Del Vidrio En Soluciones Alcalinas. En: Nexo. Nicaragua. 2011, Vol. 24, n. 2, pp 92-103

<sup>9</sup>BERNAL, S, MEJIA, R y RODRIGUEZ, E. Alkali-Activated Materials: Cementing a Sustainable Future. En: Ingeniería y Competitividad. 2013, Vol. 15, n. 2, pp. 211-223.

materiales pueden mostrar una alta resistencia a la compresión, tensión y ataque de ácidos, baja permeabilidad, entre otros.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar la resistencia mecánica a la compresión de morteros de escoria granulada de alto horno activados alcalinamente.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**3.2.1** Determinar la mayor resistencia a compresión de morteros activados alcalinamente a partir de la matriz de producción variando la molaridad del activador Hidróxido de sodio (NaOH) y la relación Waterglass/NaOH.

**3.2.2** Establecer la variación de la resistencia a la compresión en el tiempo de morteros de escoria de alto horno activados alcalinamente basados en la matriz de producción.

**3.2.3** Comparar los resultados obtenidos en la prueba a compresión de las probetas de escoria de alto horno con finura pasa tamiz 100, pasa tamiz 200 y cemento Portland Tipo I.



#### **4. HIPÓTESIS**

Los morteros elaborados con escoria de alto horno y activados alcalinamente ofrecen mayores resistencias a compresión que los elaborados con cemento Portland Tipo I.

Los morteros de escoria de alto horno activados alcalinamente presentan mayor resistencia a la compresión en cuanto mayor sea la participación del Waterglass como liquido activador.

La finura es una de las variables que inciden notablemente en la resistencia a la compresión de los morteros elaborados con escoria granular activada alcalina mente, ya que para morteros con finura pasa 200 se presenta mayor resistencia a la compresión comparada con probetas de finura pasa 100.

## 5. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el cemento Portland es el material de construcción más utilizado a nivel mundial debido a su bajo costo, versatilidad, trabajabilidad y capacidad de endurecer bajo la acción del agua. Pero todas estas cualidades que benefician la construcción, a la vez perjudican en gran manera el medio ambiente pues se estima que alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera son generadas por esta industria<sup>10</sup>. Dichas emisiones se derivan principalmente de reacciones químicas de descarbonatación que ocurren en el horno para obtener Clinker, y del uso de combustible fósil como fuente de energía para el horno.

Con el acuerdo del Protocolo de Kyoto firmado en 1997 con validez hasta el 2012 y el protocolo de Copenhague con validez hasta el 2020, se crearon políticas medioambientales que comprometen a los países industrializados a estabilizar o restringir las emisiones de gases efecto invernadero, como el metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso(N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y el “Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cuyas emisiones se han incrementado de una forma tan significativa que ha superado el acumulado de los últimos 20 millones de años”<sup>11</sup>.

Teniendo en cuenta estos aspectos, y bajo el compromiso de las leyes medio ambientales y el evidente deterioro ambiental presente en el mundo hoy en día, se hace necesaria la implementación y desarrollo de nuevos materiales que cumplan con los requerimientos constructivos, y además brinden la seguridad necesaria tanto para los individuos, como para el medio ambiente.

El desarrollo de esta investigación lograría que la escoria de alto horno fuera una solución físico-mecánica y ambiental a los problemas que presenta hoy en día la producción del cemento Portland como materia prima en todo proyecto u obra de construcción.

---

<sup>10</sup>Domoterra. El cemento y la producción de CO<sub>2</sub>. España. 2013.

<sup>11</sup>COLQUE PINELO, Teresay SANCHEZ CAMPOS, Víctor. Los Gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?'. Asociación amigos de la tierra. Perú, 2007.

## 6. MARCO REFERENCIAL

### 6.1. MARCO CONCEPTUAL

#### 6.1.1. Geopolímeros

Es el término que se asignó a los polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización<sup>12</sup>, donde el silicio y el aluminio están enlazados tetraédricamente por el intercambio de átomos de oxígeno.

La principal función de los geopolímeros es sustituir el cemento Portland debido fundamentalmente a las propiedades mecánicas que presentan en estado endurecido.

Los aluminosilicatos son minerales constituidos esencialmente por óxidos de silicio y aluminio con cationes como calcio, magnesio, sodio, potasio, entre otros y son la materia prima de la síntesis de los geopolímeros.

Las principales fuentes de aluminosilicatos son subproductos industriales como: escoria granulada de alto horno (derivada de la industria de la fábrica de acero), ceniza volante (derivada de la combustión de carbón) y las arcillas naturales (metacaolín).

#### 6.1.2. Escoria de alto horno

Las escorias granulada de alto horno son obtenidas dentro del proceso de manufactura del hierro como residuo de la combustión del coque, cal y otros materiales. La formación de la escoria fundida se produce en la parte superior del alto horno, a temperaturas cercanas a los 1600°C. El enfriamiento de este material determina las propiedades físicas, químicas, naturaleza y sus propiedades cementicias de la siguiente manera:

- ⇒ **Enfriamiento lento:** Promueve estructuras cristalinas de silicatos de calcio, aluminio y magnesio (fundamentalmente melilita). Esta fase cristalina no presenta propiedades cementicias y exhibe propiedades similares al basalto<sup>13</sup>.
- ⇒ **Enfriamiento rápido:** Por medio de aspersion de agua a alta presión y traslado a un tambor rotatorio (peletización), genera fases vítreas de silicatos de calcio, aluminio y magnesio<sup>14</sup> de propiedades hidráulicas latentes.

---

<sup>12</sup> DAVIDOVITS, J. Properties of Geopolymer Cements. En: Alkaline Cements and Concretes. 1994, pp. 131–49.

<sup>13</sup> REGOURD, M. Slags and Slag Cements. En: Concrete Technology and Design. Inglaterra. Vol. 3, pp. 73-99.

<sup>14</sup> HOGAN, F. Study of Grinding Energy Required for Pelletized and Water Granulated Slag. En: Silic. Ind. 1983. Vol. 48, n. 3, pp. 71-80.

El principal mineral de la escoria de alto horno es la melilita. La capacidad hidráulica que tiene este tipo de escorias cuando están finamente molidas y en presencia de agua se da de una forma muy lenta y atenuada. Este comportamiento está definido por el contenido de fase vítrea, composición química, finura e historial térmico<sup>15</sup>. Es por ésta razón, que es necesario incorporar algunos activadores, como cal, cemento o soluciones alcalinas para incrementar la cinética de reacción.

Las mayores resistencias a la compresión se encuentran en escorias expuestas a altas temperaturas y que sufren un enfriamiento rápido.

Para la presente investigación se utilizó una escoria procedente de la empresa Paz del Rio, su molienda se realizó en molino de bola marca PINZUAR (Imagen 1) para obtener dos tipos de diámetro de partículas 0,15 mm (Pasa 100) y 0,075 mm (Pasa 200).

**Imagen 1** Molino de Bola



**Fuente** Autoría Propia

El molino utilizado tiene capacidad para 10 Kg de material a moler y la velocidad del tambor fue de 30 rpm. La carga fue retirada a los 30 minutos y posteriormente tamizada para obtener la finura deseada.

La escoria de alto horno se cargo en el molino con bolas de acero con las características descritas en la Tabla 1.

---

<sup>15</sup> RUNZHANG, Y., SHI-ZI, O y QIONG-YING, G. Structure and Hydraulic Activity of Slags in the System CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. En: Silic. Ind. 1983. Vol. 1, pp. 3-6.

**Tabla 1** Bolas de molienda

<b>Bolas</b>	<b>Peso (gr)</b>	<b>Diametro (mm)</b>	<b>Cantidad</b>
Medianas	420,0	46,5	12

Fuente Autoría Propia

### **6.1.3. Origen de la activación Alcalina**

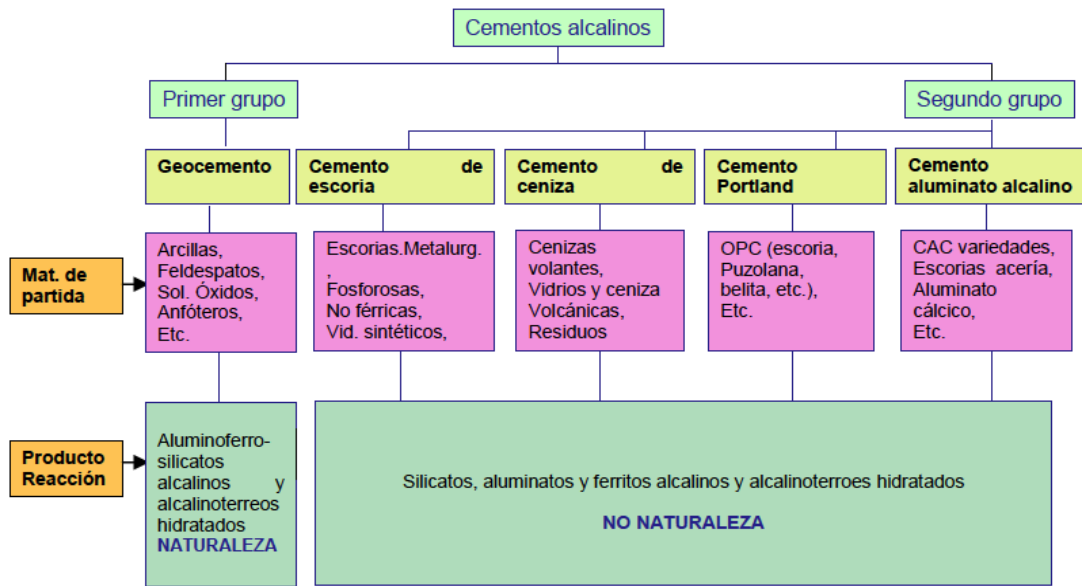
La activación alcalina fue descubierta inicialmente por Purdon, a través del estudio del efecto que tiene la incorporación de hidróxido de sodio (NaOH) sobre una variedad de minerales que estaban constituidos por Si y/o Al fundamentalmente . Purdon propuso que el mecanismo de endurecimiento de una escoria (basada en un 41% de CaO, 30% de SiO<sub>2</sub> y 20.5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) activada alcalinamente con NaOH (del 5.5.% al 7.5%) involucra la disolución de Si y Al y precipitación de silicato cálcico hidratado (CSH) o aluminatos hidratados, obteniendo una resistencia de 27 MPa a un día de curado y 72 MPa a 5 años.

Posteriormente en 1950 Glukhovsky investigó los aglutinantes utilizados en la antigua Roma y las estructuras egipcias; llamó a los aglutinantes “cementos de suelo” y los hormigones “silicatos del suelo”. Posteriormente, el Instituto de Investigación Glukhovsky en Ucrania desarrolló esta tecnología utilizándola en ferrocarriles, tramos de carreteras, losas prefabricadas y bloques usando como único aglutinante la escoria de alto horno.

Los cementos alcalinos producto de la activación alcalina se pueden describir como materiales sintetizados a partir de un proceso químico, donde se tiene una materia prima de alta concentración en SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (escoria de alto horno), la cual en un medio fuertemente básico “pH superior a 12” y en presencia de álcalis, reacciona químicamente para formar compuestos con propiedades similares a los productos de hidratación del cemento Portland.

Los cemento alcalinos se pueden clasificar en dos grupos de la siguiente manera:

**Imagen 2** Clasificación de los Cementos alcalinos



**Fuente** Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. Propiedades y Durabilidad

La activación alcalina es una tecnología en crecimiento que implica la reacción química entre un sólido precursor del aluminosilicato y un activador alcalino.

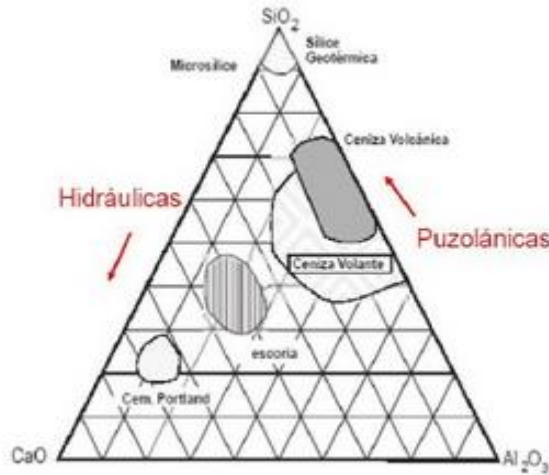
El principal producto de esta reacción es silicato cálcico hidratado (gel CSH). Estos materiales, a los que se les denomina polímeros inorgánicos alcalinos, o geopolímeros, los cuales pueden presentar elevadas resistencias mecánicas iniciales, resistencia al ataque de ácidos y resistencia al fuego dependiendo del proceso que se lleve a cabo para la creación del gel. En definitiva, los polímeros inorgánicos alcalinos constituyen una nueva familia de productos que poseen la capacidad de conjugar cualidades específicas de los cementos con aspectos específicos de la cerámica tradicional, así como atributos que pertenecen a la familia de las zeolitas.

#### 6.1.4. Activador Alcalino

Es el líquido que cumple la función de activar alcalinamente las escorias de alto horno, para producir el gel CSH, el cual cuenta con características cementantes.

En el diagrama ternario de fases se observan los materiales que cuentan con características cementantes. Se concluye que el cemento Portland reacciona químicamente con agua ya que se encuentra ubicado en la parte inferior izquierda del diagrama donde se encuentran las hidráulicas, mientras que la escoria de alto horno se encuentra casi en el centro lo que significa que debe ser puzolánica y debe ser activada alcalinamente con la característica que su activador alcalino no debe tener concentraciones altas.

**Imagen 3** Diagrama Ternario de Fases



En lo que respecta al efecto de la naturaleza del activador sobre el proceso químico de formación de polímeros inorgánicos alcalinos, hay que destacar el papel que juegan tanto los cationes alcalinos que se incorporan al sistema como los aniones que acompañan al álcali en la disolución activadora<sup>16</sup>. Los cationes actúan compensando y equilibrando el balance de carga eléctrica que descompensa la estructura por la sustitución de átomos de  $\text{Si}^{4+}$  por átomos de  $\text{Al}^{3+}$ . Esto ocurre en el proceso de disolución, es decir, cuando la elevada concentración de iones  $\text{OH}^-$  en el medio rompe los enlaces covalentes Si-O-Si, Si-O-Al y Al-O-Al presentes en el metacaolín y los iones silicio y aluminio pasan al medio formando grupos Si-OH y Al-OH. Posteriormente estas especies químicas condensan, forman enlaces Si-O-Al y Si-O-Si y dan lugar a la precipitación de un gel que se caracteriza por poseer estructura tridimensional.

La disolución activadora ejerce un efecto importante en el desarrollo de las reacciones de activación alcalina y, en consecuencia, en las características mineralógicas y microestructurales. En estudios previos sobre el efecto de la sílice soluble en la activación de escorias de alto horno, se ha demostrado que, en general, la presencia de sílice soluble en la disolución activadora incrementa la resistencia mecánica inicial del material.

La concentración del activador juega un papel importante a la hora de diseñar la dosificación de un mortero de cemento alcalino, ya que si tiene exceso de esta puede generar fenómenos similares a la eflorescencia por efectos de nueva cristalización de hidróxidos alcalinos<sup>17</sup>.

<sup>16</sup> MONZO, M, FERNANDEZ-JIMENEZ, A, VICENT, M, PALOMO, A Y BARBA, A Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado. Sociedad española de cerámica y vidrio. 2008, Vol. 47, n.1, pp. 35-43.

<sup>17</sup> ARIAS, Y. Incidencia de La Temperatura Ambiente En La Formación de Compuestos Cementantes Mediante La Activación Alcalina de Cenizas de Carbón. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2013. pp. 1-69

### 6.1.5. Productos de hidratación

Los productos formados como resultados de la activación alcalina de la escoria granulada de alto horno, son los más discutidos y controvertidos en las investigaciones que respectan al tema, pero en lo que coinciden la mayoría de los autores es que el principal producto de hidratación es el Silicato Cálcico Hidratado (CSH) y que la formación de otras fases va a depender del tipo y cantidad de activador utilizado, al igual que la estructura y composición de la escoria.

Glukhovsky y Otros<sup>18</sup> aparte de gel CSH encontraron en las escorias activadas alcalinamente: hidronefelinas, analcita, moscovita, paragonita, gismondita, hidrogranantes y una mezcla de hidroaluminosilicatos de potasio-calcio y sodio-calcio. Y por el contrario no hallaron presencia de aluminatos cálcicos hidratados ni sulfoaluminatos cálcicos hidratados típicos de un cemento Portland.

Según Puertas<sup>19</sup>, la solubilidad de los minerales producto de la hidratación de la escoria es menor a los de la pasta de cemento Portland, lo que indica mayor estabilidad química de las activadas alcalinamente. Dicho análisis fue de acuerdo a la tabla 2:

**Tabla 2** Solubilidad de los Productos de Hidratación, EAH y CP

MINERAL	FÓRMULA ESTEQUIOMÉTRICA	SOLUBILIDAD kg/m <sup>3</sup>
<b>Cemento de Escoria Activada</b>		
CSH(B)	5CaO.6SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	0,050
Xonotlita	6CaO.6SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	0,035
Riversidita	5CaO.6SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	0,050
Plombierita	5CaO.6SiO <sub>2</sub> .10.5H <sub>2</sub> O	0,050
Gyrolita	2CaO.3SiO <sub>2</sub> .2.5H <sub>2</sub> O	0,051
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	0,014
Hidrogranate	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .1.5SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	0,020
Hidosilicato de sodio y calcio	(Na,Ca)SiO <sub>4</sub> .nH <sub>2</sub> O	0,050
Thomsonita	(Na,Ca)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,050
Hidronephelina	Na <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,020
Natrolita	Na <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,020
Analcima	Na <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .4SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,020
<b>Cemento Portland</b>		
Hidróxido de calcio	Ca(OH) <sub>2</sub>	1,300
C <sub>2</sub> SH <sub>2</sub>	2CaO.SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	1,400
CSH(B)	5CaO.SiO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	0,050
Hidroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .13H <sub>2</sub> O	1,080
Hidroaluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,560
Ettringita	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3CaSO <sub>4</sub> .31H <sub>2</sub> O	1,754

**Fuente** Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectiva del fut.

<sup>18</sup> GLUKHHOVSKY, V, ROSTOVSKAJA, G y RUMYNA, G. High Strength Slag-Alkaline Cements, citado por Puertas. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situacion actual y perspectivas del futuro.

<sup>19</sup> PUERTAS., F. Op. Cit. 11



Kutti<sup>20</sup> en su investigación al estudiar las escorias activadas alcalinamente con NaOH, encontró que la pasta estaba constituida principalmente por dos compuestos: un gel CSH y un gel rico en sílice. éste gel rico en sílice es el encargado de controlar la retracción, permeabilidad y las resistencias de los morteros y hormigones.

### 6.1.6. Reacción de la activación alcalina de escoria de alto horno

Según PUERTAS, F<sup>21</sup> y FERNANDEZ, A y otros<sup>22</sup> en la Tabla 1 se observa cómo surge el proceso de activación de escoria de alto horno.

**Tabla 3** Etapas de la Activación Alcalina

ETAPA	NOMBRE DE LA ETAPA	CARACTERÍSTICAS
1	Inicial	Es un proceso muy rápido que corresponde a la disolución de los bordes de grano de la Escoria.  Corresponde a la reacción entre los iones del $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ y los iones $\text{Ca}^{2+}$ disueltos procedentes de la escoria.
2	Inducción	Se va produciendo la disolución de la escoria.  La duración de esta etapa depende del pH de la solución.  Cuanto mayor sea el pH menor será el periodo de inducción.
3	Aceleración	Los componentes estructurales de la escoria, principalmente los iones $(\text{SiO}_4)^{2-}$ y $\text{Ca}^{2+}$ alcanzan el grado de saturación, condensación y precipitación, dando lugar a la formación masiva de productos de reacción.
4	Deceleración y finalización	El proceso de hidratación continua pero gradualmente va disminuyendo la velocidad de reacción. Esto se atribuye a una precipitación masiva de productos de reacción alrededor de los granos de escoria y a una disminución del agua libre.

**Fuente** Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectiva del futuro. + Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno

<sup>20</sup> KUTTI, T. Hydration Products of Alkali Activated Slag, citado por Puertas. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas del futuro.

<sup>21</sup> PUERTAS, F. Op cit., pp. 11

<sup>22</sup> FERNANDEZ JIMENEZ A., PUERTAS, F y FERNANDEZ CARRASCO L. Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno. En: Materiales de Construcción. España. 1996, Vol. 46, n. 241, pp. 23-37.

Según Fernández y otros la duración de la etapa de inducción depende de la naturaleza de la disolución activadora, donde la disolución de NaOH se considera aceleradora de la Etapa 1.

#### **6.1.7. Resistencia mecánica del gel CSH**

La resistencia mecánica del material guarda una estrecha relación con la naturaleza, microestructura y composición química de los productos de reacción así como con las condiciones de curado. En todos los casos se genera, como principal producto de reacción, un polímero inorgánico alcalino con propiedades cementantes (gel C-S-H) responsable, en mayor medida, de las propiedades mecánicas del material. Como productos secundarios se forman algunas zeolitas cuya proporción y tipo dependen tanto de la naturaleza del activador como de las condiciones de curado. La presencia de sílice soluble en la disolución activadora conduce a la formación de geles con una mayor relación Si/Al lo que genera un efecto positivo sobre la resistencia mecánica. Con respecto a la temperatura de curado, un incremento en dicha temperatura deja de tener efectos positivos sobre la evolución de la resistencia mecánica.

#### **6.1.8. Arena de Rio**

La arena utilizada para la elaboración de morteros fue extraída del rio Saldaña en el departamento del Tolima. Dicho rio es catalogado como la fuente que genera los materiales de la más alta calidad en cuanto a composición mineralógica, aumentando la calidad de mezclas y resistencias como producto final en las diferentes etapas de la construcción.

Se considera Arena Natural (Sin Triturar) de excelente calidad para morteros de pega y empañetados, uso recomendado para prefabricados, excelentes terminados y concretos livianos.

## 6.2. MARCO LEGAL

Para el desarrollo de esta investigación se trabajaran las Normas Técnicas Colombianas (NTC), en donde se estipulan los tiempos, materiales y equipos que se deben utilizar en cada uno de los ensayos.

Tabla 4 Marco legal

DOCUMENTO	TEMA	PROPÓSITO
<b>NTC 30</b> Cemento Portland. Clasificación y Nomenclatura.	Establece la clasificación y nomenclatura de los cementos Portland de acuerdo con sus cualidades y uso.	Determinar el tipo de cemento con el cual se va a realizar la muestra patrón y posteriormente comparar con la escoria de alto Horno.
<b>NTC 111</b> Método para determinar fluidez de morteros de cemento Portland.	Establece el método para determinar la fluidez del cemento hidráulico. Debe ser 100+-5 mm.	Determinar el contenido de agua que la pasta necesita para producir una pasta adecuada, lo mismo para el gel CSH.
<b>NTC 112</b> Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros.	Establece el proceso a seguir para efectuar la mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros.	Conocer el procedimiento a llevar a cabo para realizar morteros de pasta de cemento y gel CSH.
<b>NTC 121</b> Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas.	Establece los requisitos físicos y mecánicos que deben cumplir los cementos Portland.	Comparar los resultados obtenidos con la norma e identificar que relación liquido/material cementante satisface los requisitos.
<b>NTC 174</b> Especificaciones de los agregados para Concreto	Establecer la granulometría de la arena que forma parte de los morteros	Comprobar que la arena de rio cumpla con los requisitos que tamaños de partícula establecidos en la Norma.
<b>NTC 220</b> Determinación de la resistencia de morteros.	Establece el método para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 5mm.	Conocer el procedimiento para realizar las pruebas a compresión de los morteros de Pasta de cemento y Gel CSH.
<b>NTC 321</b> Cemento Portland. Especificaciones Químicas	Establece los requisitos que deben cumplir los diferentes tipos de cemento.	Comparar la composición química del cemento TIPO I con la de la escoria de alto Horno

Fuente: Normas Técnicas Colombianas

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es cuantitativo, debido a que utiliza la recolección y análisis de datos para probar hipótesis establecidas que son analizadas a la luz de modelos matemáticos y verificados estadísticamente. Además, las variables que se evidencian en las pruebas de laboratorio son susceptibles a ser cuantificadas, es el caso de la prueba de compresión.

### 7.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se desarrolla en este trabajo es correlacional, ya que se encarga de registrar, analizar e interpretar propiedades mecánicas de morteros fabricados con escoria de alto horno usado como material cementante en la construcción, a través de ensayos experimentales.

### 7.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar el objetivo de esta investigación se va a analizar de forma comparativa la resistencia a la compresión de morteros de cemento Portland Tipo I y morteros de Escoria de Alto Horno, tomando como variables la relación Waterglass/NaOH y finura de la escoria. Las fases son las siguientes:

#### 7.3.1. FASE I Caracterización de Materias Primas

Identificar la composición y características propias de cada uno de los materiales que se van a utilizar en el desarrollo de la investigación. Del mismo modo evidenciar el comportamiento de dichos materiales cuando entran en contacto unos con otros.

Realizar las probetas a partir de la siguiente matriz de producción:

Tabla 5 Matriz de Producción

		MOLARIDAD		
		2M	3M	4M
RELACION WATERGLASS/ NaOH	0,5	9	9	9
	1,0	9	9	9
	1,5	9	9	9
	2,0	9	9	9

Fuente Autoría propia

Se realizarán 9 probetas de  $5\text{cm}^3$  como lo indica la norma NTC 112 con el fin de fallar 2 morteros para cada edad y posteriormente obtener los resultados a partir de promedios. Las relaciones líquido/material cementante de 0.75 cemento Portland y de escoria de alto horno pasa tamiz 200.

### **7.3.2. FASE II Determinación de resistencia**

Las probetas se fallarán los días 1, 3, 7 y 28 desde su producción, realizando dos tomas de datos para cada relación estipulada en la matriz de producción tanto de cemento Portland como de escoria de alto horno, como está estipulado en la norma NTC 220.

### **7.3.3. FASE III Comparación de resultados**

A partir de los resultados obtenidos en la Fase II se realizará un análisis comparativo en cuanto a la resistencia a la compresión para así determinar los pro y contras que tienen los materiales activados alcalinamente frente a los convencionales de cemento Portland.

### **7.3.4. FASE IV Análisis de finura de la Escoria de Alto Horno**

Para dicho análisis se realizarán probetas de escoria con las mismas características variando únicamente la finura de la escoria para observar su efecto dentro de los morteros activados alcalinamente.

### **7.3.5. FASE V Cambio Volumétrico y eflorescencia**

Las probetas de mortero de escoria de alto horno se compararán con las de cemento Portland Tipo I para evidenciar su disminución en la altura desde el momento de llenado del molde hasta su desencofrado a 24h.

El análisis de eflorescencia se hará de forma visual aproximando el efecto que éste tiene sobre los morteros.

## 8. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

### 8.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

#### 8.1.1. ARENA DE RIO

Se realizó el lavado de la arena para confirmar si la muestra contaba con un porcentaje importante de partículas pasa Tamiz 200, las cuales debían ser eliminadas ya que afectan de forma negativa los morteros.

El lavado de arena se realizó de forma manual, durante 60 min para evidenciar que la turbiedad del agua era mínima. Posteriormente se llevó la muestra al Horno durante 24 horas a una Temperatura entre 88 y 92° Centígrados hasta confirmar que esta se encontrara completamente seca. Los resultados fueron:

**Masa inicial de la muestra= 2500g**

**Masa de la muestra después de lavada y secada = 2446 g**

Se consideró que las partículas pasa Tamiz 200 tenían un porcentaje importante en la arena por lo que fue necesario dicho lavado en la totalidad de la arena.

Adicionalmente se realizó el ensayo de granulometría por tamizado NTC 174, y los resultados fueron:

**Tabla 6** Granulometría de la arena

ENSAYO DE GRANULOMETRIA							
RECIPIENTE+MUESTRA		2713	g				
RECIPIENTE		267	g				
MUESTRA		2446	g				
Nº TAMIZ	DIAMETRO (mm)	MASA RETENIDA (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	NORMA NTC 174	CUMPLE
4	4,75	136,90	5,60	5,60	94,40	100-95	NO
8	2,36	217,30	8,88	14,48	85,52	100-80	SI
16	1,18	352,20	14,40	28,88	71,12	85-50	SI
30	0,6	950,50	38,86	67,74	32,26	60-25	SI
50	0,3	563,20	23,03	90,76	9,24	30-10	NO
100	0,15	144,40	5,90	96,67	3,33	10-2	SI
200	0,075	55,90	2,29	98,95	1,05	7-0	SI
FONDO		20,30	0,83	99,78	0,22		
	MASA FINAL	2440,7					

Fuente Autoría propia

El error del ensayo fue:

$$ERROR = \frac{2446g - 2440,7g}{2446} * 100$$

$$ERROR = 0,21\%$$

A partir del anterior ensayo se confirmó que la arena de río utilizada para la elaboración de los morteros cumplía con la norma; pero con el fin de hacer cumplir a cabalidad la norma que exige los tamaños de partículas y evitar que las partículas de mayor tamaño dañaran el instrumento de mezclado de morteros se decidió trabajar con la arena contenida entre el Tamiz 8 y el Tamiz 200.

### 8.1.2. ESCORIA DE ALTO HORNO

La escoria de alto horno granulada presentaba dos colores diferentes de acuerdo a la finura que cada una tenía.

**Imagen 4** EAH Pasa 100



**Fuente** Autoría Propia

**Imagen 5** EAH Pasa 200



**Fuente** Autoría Propia

⇒ **Análisis químico**

El análisis químico que se realizó a las muestras de escoria de alto horno fue a través del ensayo de fluorescencia de rayos X, cuya composición química es:

**Tabla 7** Composición Química Escoria

<b>ELEMENTO Y/O COMPUESTO</b>	<b>ESCORIA PASA 200</b>	<b>CEMENTO PORTLAND TIPO I</b>
CaO	39,591	63,52
SiO <sub>2</sub>	33,7	21,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,081	4,44
MnO	4,518	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,581	4,93
MgO	1,602	0,78
S	1,16	
TiO <sub>2</sub>	0,482	
K <sub>2</sub> O	0,455	0,68
Na <sub>2</sub> O	0,273	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,256	
Ba	0,165	
Sr	0,084	
Zr	0,024	
Y	0,019	
Zn	0,009	

**Fuente** Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

**Nota:** El análisis de la escoria presentado en la anterior tabla fue realizado por el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia y cuenta con las certificaciones correspondientes.

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis químico de la escoria de alto horno, se concluye que es una escoria de naturaleza básica caracterizada por tener un alto potencial hidráulico. Por la siguiente razón:

$$\frac{CaO + MgO}{SiO_2} > 1,0$$

$$\frac{(39,591) + (1,602)}{(33,700)} = 1,22$$

A demás, puede desarrollar resistencias tres veces superiores si se activa alcalinamente con NaOH en comparación con otro tipo de activador alcalino, esto a razón de:



$$\frac{CaO}{SiO_2} \approx 1,38$$

$$\frac{(39,59)}{(33,700)} = 1,17$$

⇒ **Peso específico**

Es la relación entre el peso de la escoria y el volumen real que ocupan los granos. La densidad de la escoria de Alto Horno se realizó con el ensayo de Le Chatelier bajo los métodos y procedimientos establecidos en la norma NTC 221, en donde se mide el desplazamiento de un líquido. Se obtuvo los siguientes datos:

**Imagen 6** Ensayo de Densidad EAH



**Masa Escoria:** 64 g

**Lectura inicial:** 0,7 cm<sup>3</sup>

**Lectura Final:** 22,2 cm<sup>3</sup>

**Fuente** Autoría Propia

A partir de los anteriores datos la densidad de la escoria es:

$$\frac{640g}{222cm^3 - 0,7cm^3} = 2,977g/cm^3$$

Dicho resultado es muy similar a los cementos Portland tipo I ya que éstos se encuentran entre 3,4 y 3,10 g/cm<sup>3</sup>, puede estar indicando bajo contenido de hierro.

### 8.1.3. CEMENTO PORTLAND TIPO I

Con el fin de realizar un análisis comparativo de los resultados de resistencia a la compresión entre morteros de escoria de alto horno y cemento Portland Tipo I se hace necesario el análisis de la composición química del cemento con fin de conocer si éste cumple con los requisitos establecidos en la Norma NTC.

A partir de la clasificación que tienen los cemento Portland en Colombia ligada a las propiedades físico-mecánicas, se decidió trabajar con cemento Portland Tipo I utilizada principalmente para obras de hormigón y que no estén en contacto con sulfatos.

Para el cemento se analizaron los siguientes módulos:

- ⇒ **Módulo Hidráulico:** Debe estar comprendido entre 1,7 y 2,3. Los inferiores a 1,7 generan resistencias mecánicas débiles y los mayores a 2,3 presentan inestabilidad de volumen.

$$MH = \frac{63,52}{21,11 + 4,44 + 4,93} = 2,083$$

- ⇒ **Módulo de Silicato:** Debe estar comprendido entre 1,9 y 3,2. Los valores altos indican fraguado y endurecimiento lento.

$$MS = \frac{21,11}{4,44 + 4,93} = 2,253$$

- ⇒ **Módulo de Alumina:** Debe oscilar entre 1,5 y 2,5. Un módulo alto da lugar a un cemento de fraguado rápido.

$$MF = \frac{4,44}{4,93} = 0,901$$

Después del análisis que se realizó a la composición química del cemento Portland Tipo I se observa que es un cemento con resistencia mecánica buena y no presenta cambio en su volumen, además su fraguado es normal.

### 8.1.4. ACTIVADORES ALCALINOS

Basados en la investigación realizada por Puertas<sup>23</sup>, 4 en donde demuestra que las disoluciones con pH superiores a 12 consiguen no solo la solvatación de la escoria sino también la formación de compuestos hidratados estables, se tomó la decisión de hallar teóricamente el pH de los NaOH de acuerdo a su molaridad, y se obtuvo los siguientes resultados:

---

<sup>23</sup>PUERTAS.,F. Op cit., pp. 11

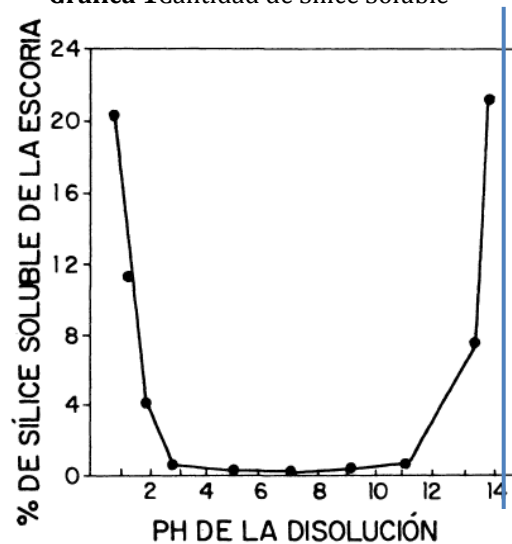
Tabla 8 pH Activadores Alcalinos

ACTIVADOR ALCALINO	pH (teórico)
NaOH 2M	14,30
NaOH 3M	14,48
NaOH 4M	14,60

Fuente Autoría Propia

De acuerdo a los resultados y a la siguiente gráfica, se concluyó que las disoluciones de NaOH producen una activación muy importante en la escoria y gracias a ser su pH tan alto el periodo de inducción va a ser muy corto, es decir que los morteros presentaron un resistencia a la compresión importante a edades tempranas (1 día y 3 días).

Gráfica 1 Cantidad de Sílice Soluble



Fuente Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas del futuro.

La mezcla entre activadores ha demostrado un carácter positivo en el desarrollo de las resistencias, por tal motivo se procede a realizar los ensayos a compresión de morteros de escoria de alto horno activados alcalinamente con el fin de encontrar la relación más eficiente entre Waterglass y NaOH.

## 8.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CSH

Con el fin de evidenciar el comportamiento de la escoria de alto horno al entrar en contacto con el activador alcalino (waterglass o NaOH 2M) se desarrollaron tres probetas y los resultados obtenidos fueron:

**Imagen 7 Gel CSH**



**Fuente Autoría Propia**

**Tabla 9** Gel CSH Características

	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
<b>COMPOSICIÓN</b>	EAH (Pasa 200) + Waterglass	EAH (Pasa 200) + Waterglass + NaOH 2M	EAH (Pasa 200) + NaOH 2M
<b>RELACIÓN L/MC</b>	0,75	0,75	0,75
<b>RELACIÓN W/NaOH</b>	NA	1	NA
<b>RESULTADOS INMEDIATOS</b>	Mezcla homogénea y resistencia baja	Mezcla heterogénea y líquida como consecuencia del NaOH	Mezcla heterogénea y líquida como consecuencia del NaOH
<b>A 24 HORAS</b>	No fraguo, mezcla insípida	Fraguo, presenta resistencia considerable	Fraguo, presenta resistencia considerable

**Fuente** Autoría propia

A partir de los resultados obtenidos se considera que los morteros deben ser activados alcalinamente como la probeta número 2 (Waterglass+ NaOH) ya que presentan una resistencia considerable a tempranas edades. A demás la mezcla aunque no es homogénea su separación entre ligantes es mínima, por lo que se puede ignorar.

### **8.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTERO A BASE DE ESCORIA**

Se elaboraron probetas de mortero de escoria de alto horno Pasa 100 utilizando como variables la relación material cementante: Arena.

**Imagen 8** Relación 1:1



**Fuente** Autoría Propia

**Imagen 9** Relación 1:1,5



**Fuente** Autoría Propia

Se observó que los morteros tenían varias desventajas cuando se aumentaba la cantidad de arena en las mezclas, entre ellas:

- ⇒ Desmoronamiento excesivo
- ⇒ Mucha porosidad
- ⇒ Resistencia baja a la compresión a tempranas edades (24 horas).

Por tal motivo se consideró que la escoria de alto horno pasa 100 no cumplía las mínimas características físicas para satisfacer las necesidades que hoy sule el cemento Portland.

Para disminuir la porosidad y con fin de llevar a buen término el desarrollo de ésta investigación se tomó la decisión de trabajar con una relación material cementante: arena de 1:1,5 y complementarlo con una relación liquido/material cementante igual a 0,75.

#### **8.4. EQUIPOS DE LABORATORIO**

A continuación se describen los equipos utilizados durante la experiencia:

##### ⇒ **Mezclador de morteros**

Para la mezcla se utilizó mezcladora marca HOBART con capacidad para 4 kilos y tres (3) velocidades.

**Imagen 10** Mezcladora de morteros



**Fuente** Autoría Propia

⇒ **Balanza de precisión**

La balanza tiene 1500g de capacidad y 0,1g de precisión.

**Imagen 11** Balanza digital



Fuente Autoría Propia

⇒ **Calibrador**

**Imagen 12** Calibrador



Fuente Autoría Propia



⇒ **Ensayo de resistencia Mecánica a Compresión**

Para obtener las resistencias a la compresión, se uso de un equipo electro-hidráulico digital con rango de medición de 1000 KN y exactitud del 1 al 10%.

**Imagen 13** Equipo Electro-Hidráulico digital.



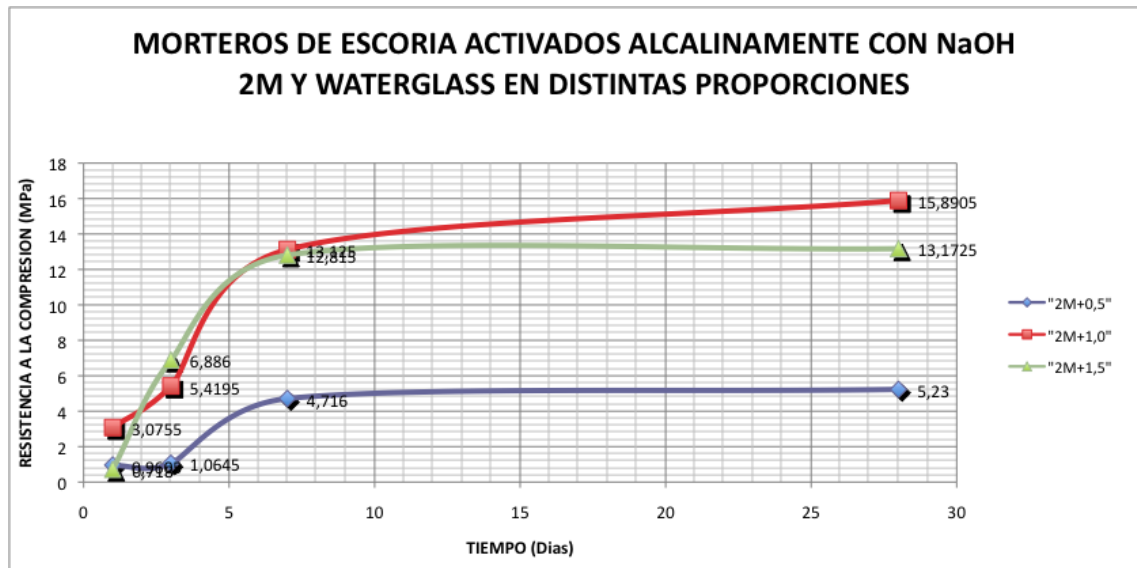
**Fuente** Autoría Propia

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 9.1. MORTEROS DE ESCORIA DE ALTO HORNO, ANÁLISIS POR MOLARIDAD DEL NaOH

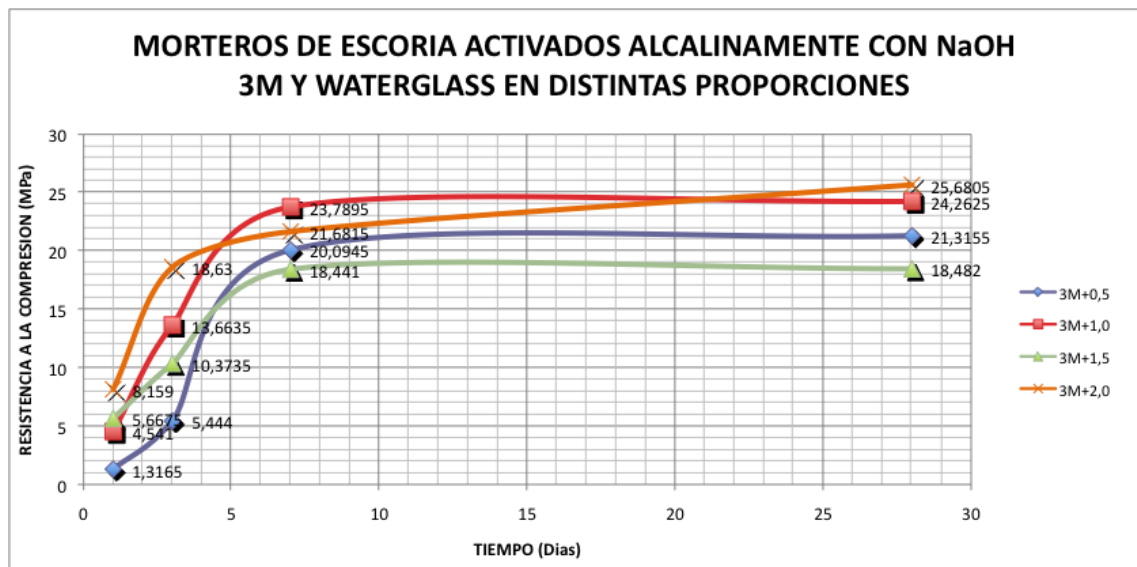
A continuación se muestran las gráficas en las cuales se analiza la resistencia a la compresión de los morteros activados alcalinamente dependiendo de la molaridad del NaOH y cuyos valores para cada edad corresponden a promedios entre dos probetas.

Gráfica 2 Morteros de EAH con NaOH 2M



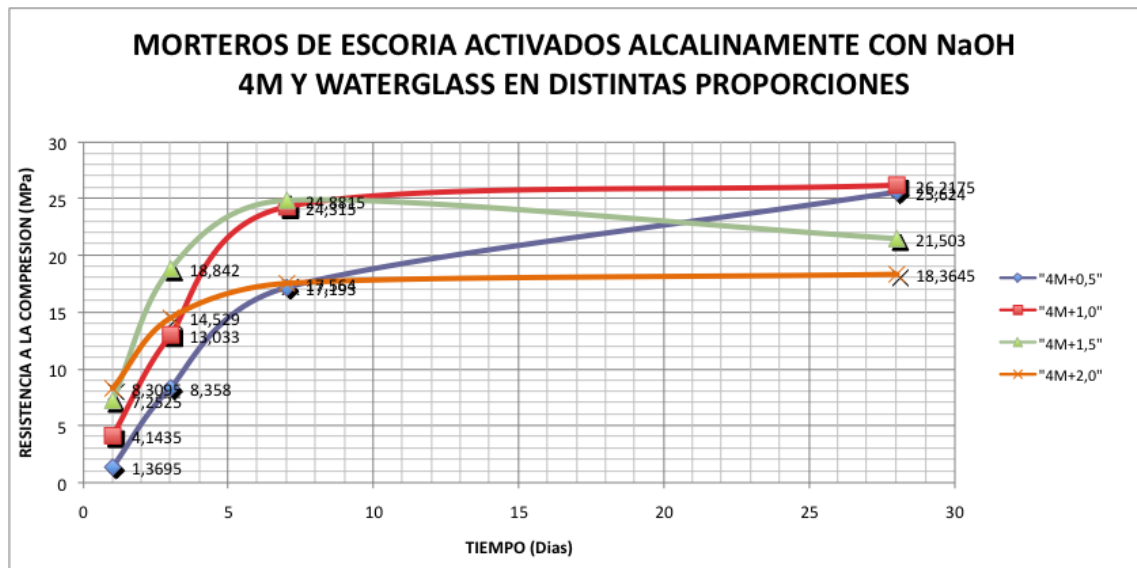
Fuente Autoría Propia

Gráfica 3 Morteros de EAH con NaOH 3M



Fuente Autoría Propia

Gráfica 4 Morteros de EAH con NaOH 4M



Fuente Autoría Propia

En la gráfica 2 la relación 2,0 para NaOH 2M no fraguó después de 5 días por lo que no se tuvo en cuenta en el análisis, debido a que no presentaba ningún tipo de resistencia a edades tempranas (1d, 3d)

Los morteros activados alcalinamente con NaOH 2M presentan la menor resistencia a la compresión en cualquiera de las relaciones utilizadas en el presente trabajo de grado (0.5, 1.0, 1.5, 2.0) por tal motivo se puede descartar como activador alcalino.

La mejor resistencia a la compresión a 24 horas se obtiene con relaciones Waterglass/NaOH iguales a 2,0 lo que indica que al aumentar la cantidad de Waterglass en la mezcla de morteros es mejor la resistencia, pero lo contrario ocurre en las muestras activadas con NaOH 2M ya que a las 24 horas no fue posible desencofrar las probetas.

Se puede deducir que la molaridad del NaOH si afecta en la resistencia a la compresión de morteros activados alcalinamente a tempranas edades, pero debe tener mayor participación el Waterglass en las mezclas para que aumente dicha resistencia.

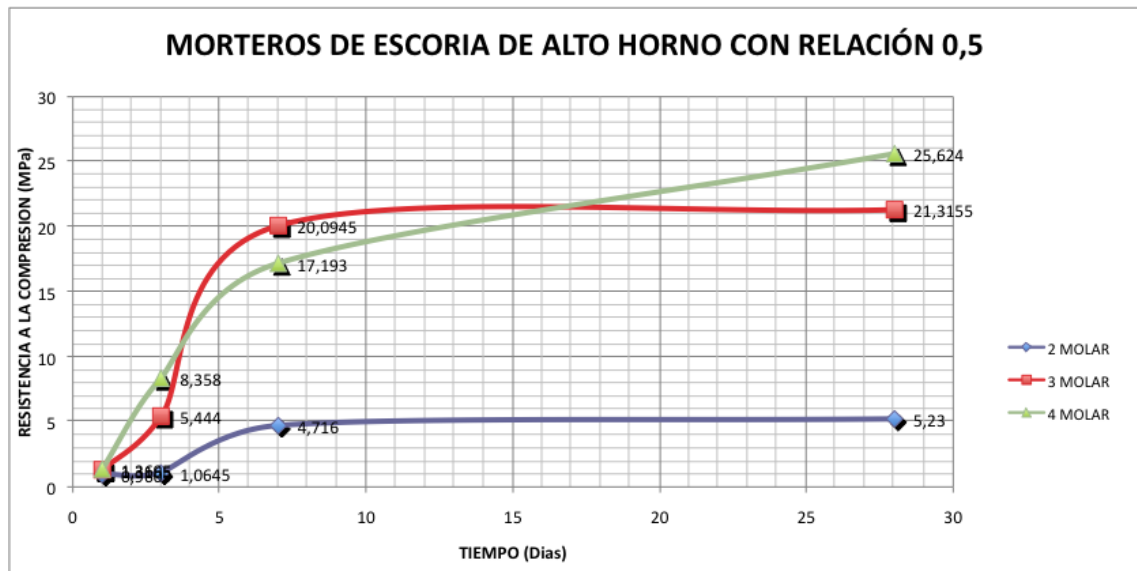
El aumento en la molaridad del NaOH tiene un efecto positivo en la resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días, ya que sin importar la relación Waterglass/NaOH los mejores resultados se obtienen para el NaOH 4M, en comparación con NaOH 2M y 3M.

A 28 días la resistencia a la compresión de las probetas activadas con NaOH 4M presentaron un aumento en las relaciones Waterglass/NaOH 0.5 y 1.0 y una disminución en las relaciones 1.5 y 2.0 lo que indica que el aumento de Waterglass en la mezclas con dichas características disminuyen la resistencia,

pero las probetas activadas con NaOH 3M y relación 2.0 presentan una alta resistencia, se podría explicar dichos resultados con un análisis químico de las reacciones ocurridas.

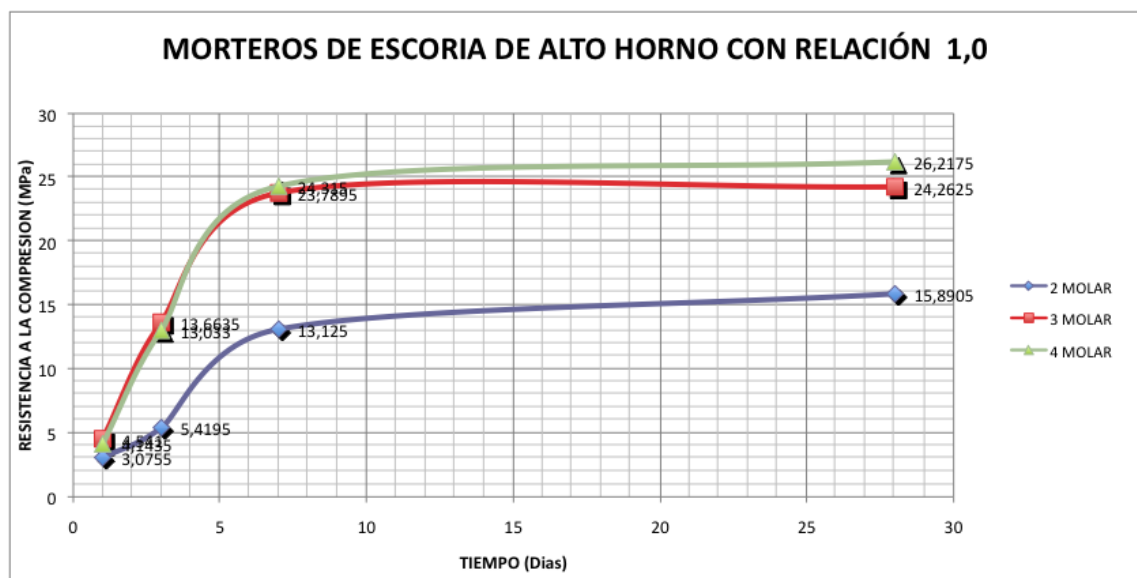
## 9.2. MORTEROS DE ESCORIA DE ALTO HORNO, ANÁLISIS POR RELACIONES WATERGLASS/NAOH

Gráfica 5 Morteros de EAH relación 0,5



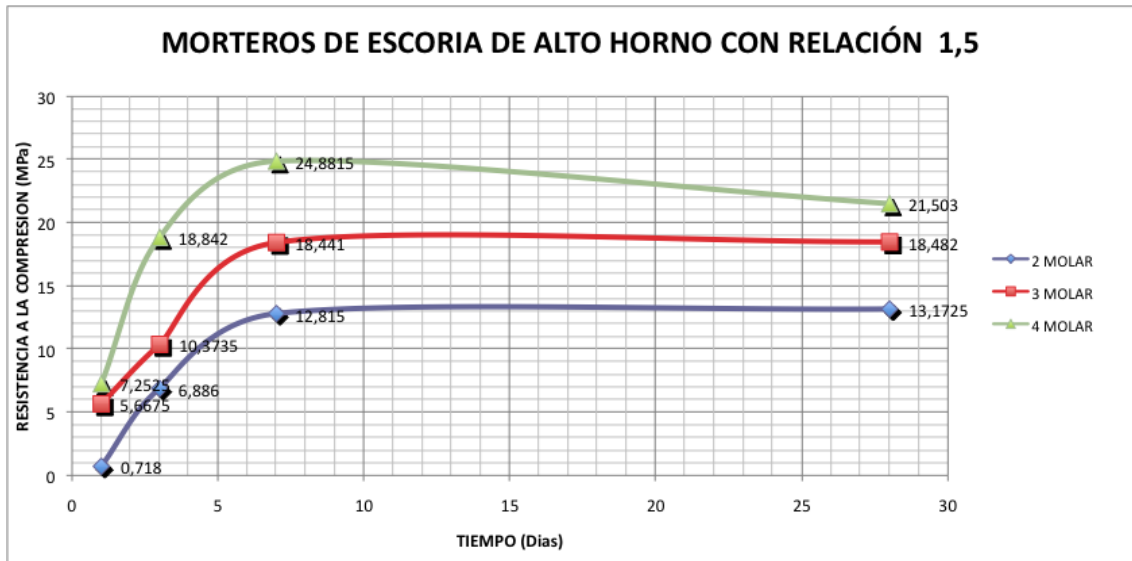
Fuente Autoría Propia

Gráfica 6 Morteros de EAH relación 1,0



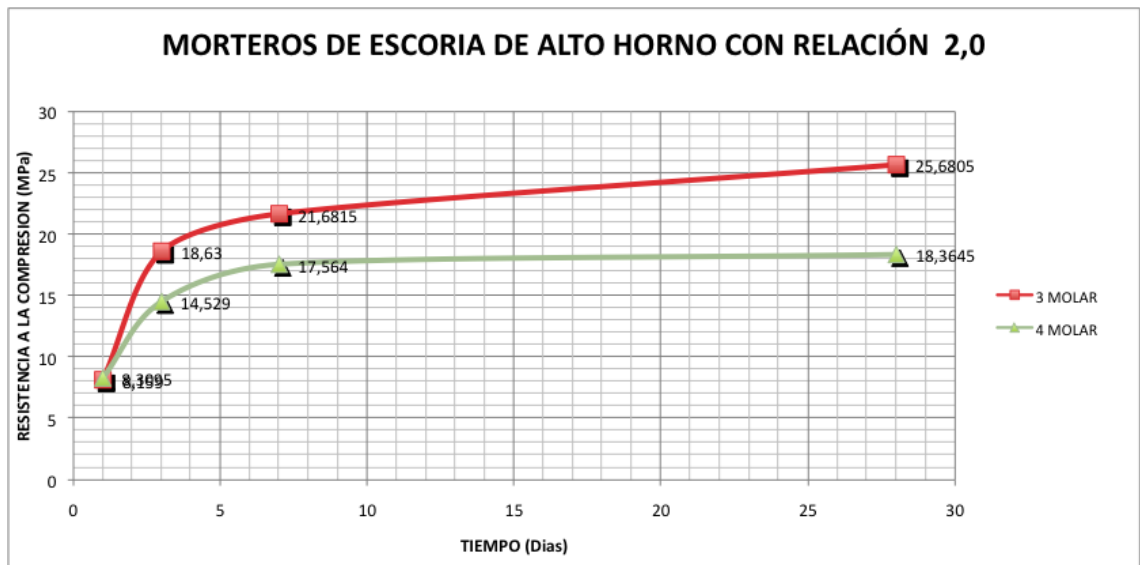
Fuente Autoría Propia

**Gráfica 7** Morteros de EAH relación 1,5



**Fuente** Autoría Propia

**Gráfica 8** Morteros de EAH relación 2,0



**Fuente** Autoría Propia

Los mejores resultados de resistencia a la compresión de morteros de escoria de alto horno activadas alcalinamente a cortas edades se obtienen con relación Waterglass/NaOH entre 1,0 y 1,5 utilizando NaOH 3M y 4M.

Los menores valores de resistencia a la compresión a edades tempranas (1d y 3d) en morteros de escoria de alto horno activadas alcalinamente se obtienen con relación Waterglass/NaOH=0,5 sin importar la molaridad del NaOH (2M,3M o 4M).

Al disminuir la participación del NaOH, es decir aumentando la relación Waterglass/NaOH sin importar su molaridad (2M, 3M Y 4M) en la activación alcalina de la escoria, la resistencia a la compresión de las probetas aumenta a edades tempranas (1d y 3d).

La mejor resistencia a la compresión de morteros activados alcalinamente a 28 días se obtiene con una relación Waterglass/NaOH igual a 1,0 y en comparación con las probetas con relación 1,5 presentan un pequeño aumento en la resistencia del día 7 al día 28.

A pesar que las probetas con relación 2,0 presentan un aumento constante en su resistencia sus valores se encuentran por debajo de la relación 1,0.

Las probetas de escoria activadas con NaOH 2M y relación Waterglass/NaOH igual a 2,0 se pueden considerar como probetas activadas únicamente con Waterglass ya que el porcentaje de participación del NaOH era poco y además su molaridad era muy baja y como se puede observar en las gráficas su afectación en los morteros es mínima. De este supuesto se puede pensar que las probetas no presentan ningún tipo de resistencia a 24 horas ya que no fue posible su desencofrado, lo que conlleva a confirmar que el Waterglass utilizado como único activador alcalino tarda más tiempo en reaccionar con la escoria de alto horno.

### **9.3. COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ESCORIA DE ALTO HORNO Y CEMENTO PORTLAND TIPO I**

Con el fin de evidenciar el comportamiento mecánico a la compresión de los morteros activados alcalinamente, se hace un análisis comparativo con morteros de cemento portland Tipo I.

	TIEMPO	Resistencia (Mpa)
<b>CP1</b>	1	2,255
	3	7,318
	7	15,121
	28	16,9195
<b>EAH</b>	1	4,1435
	3	13,033
	7	24,315
	28	26,2175
<b>CPA</b>	1	
	3	12,481
	7	20,601
	28	28,566
<b>CPB</b>	1	
	3	6,342
	7	11,86
	28	19,107
<b>CPC</b>	1	
	3	15,099
	7	20,365
	28	25,636
<b>CPT</b>	1	
	3	12,042
	7	19,192
	28	25,393
<b>EAH+W</b>	2	38
	7	52
	28	68
<b>EAH+NaOH</b>	2	4
	7	9
	28	13

**CP1:** Probetas de Cemento Portland Tipo I elaboradas en laboratorio por el autor con las mismas relaciones utilizadas en los morteros de escoria de alto horno.

**EAH:** Probetas de escoria de alto horno, mejores resultados a compresión. Relación Waterglass/ NaOH igual a 1,0 y NaOH 4M

**CPA:** Probetas de Cemento Portland Tipo I de Argos, tesis de grado "ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE CUATRO CEMENTOS COMERCIALES PORTLAND TIPO I" Universidad Militar Nueva Granada

**CPB:** Probetas de Cemento Portland Tipo I de Cemento Boyacá, tesis de grado "ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE CUATRO CEMENTOS COMERCIALES PORTLAND TIPO I" Universidad Militar Nueva Granada

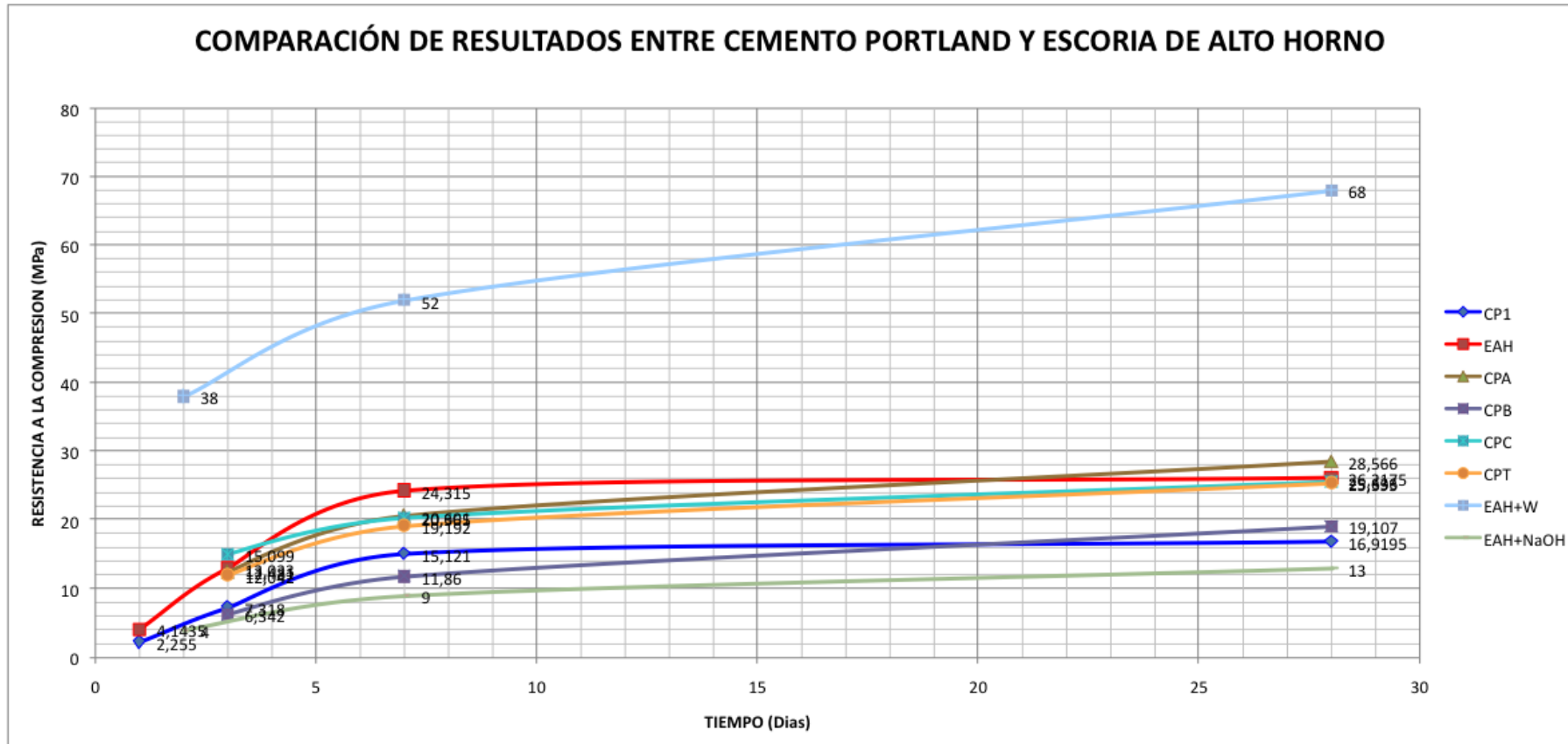
**CPC:** Probetas de Cemento Portland Tipo I de Cemento Cemex, tesis de grado "ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE CUATRO CEMENTOS COMERCIALES PORTLAND TIPO I" Universidad Militar Nueva Granada

**CPT:** Probetas de Cemento Portland Tipo I de Cemento Tequendama, tesis de grado "ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE CUATRO CEMENTOS COMERCIALES PORTLAND TIPO I" Universidad Militar Nueva Granada

**EAH+W:** Probetas de Escoria de Alto Horno+Waterglass, relación escoria: arena igual 1:2. Artículo: "MORTEROS DE ESCORIA ACTIVADA ALCALINAMENTE. PROPIEDADES Y DURABILIDAD"

**EAH+NaOH:** Probetas de Escoria de Alto Horno+NaOH, relación escoria: arena igual 1:2. Artículo: "MORTEROS DE ESCORIA ACTIVADA ALCALINAMENTE. PROPIEDADES Y DURABILIDAD"

Gráfica 9 Comparación EAH y CP1



Fuente Autoría Propia



Las probetas CP1 y EAH fueron realizadas por el autor bajo las mismas proporciones y condiciones. Se puede observar que sin importar el día de curado la resistencia de las activadas alcalinamente estuvieron por encima.

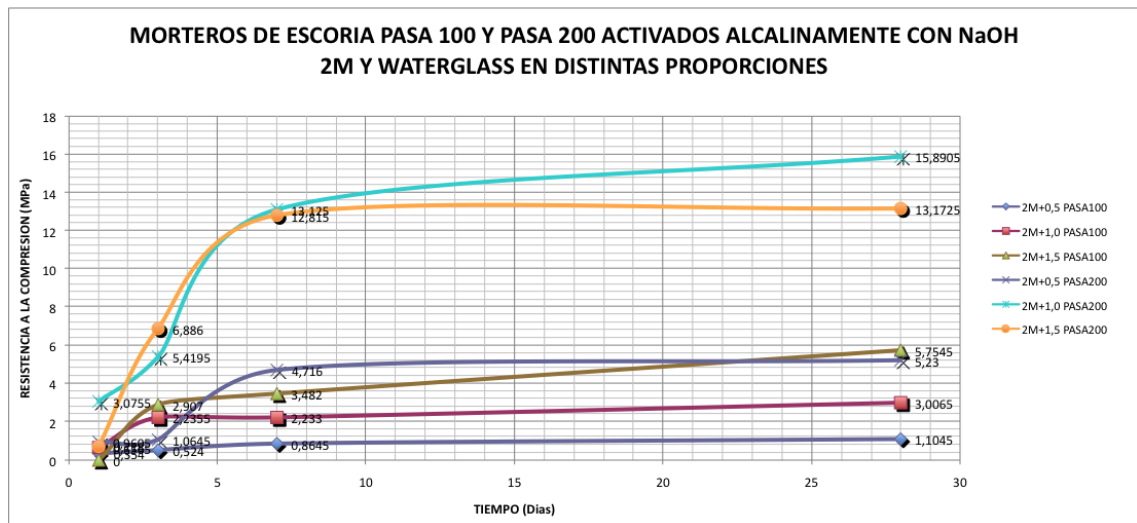
Los morteros CPA, CPB, CPC, CPT se realizaron con relaciones al material cementante: arena igual 1: 2,75 establecidos en las normas NTC y la adición de agua fue de acuerdo al ensayo de fluidez.

A pesar que los morteros de escoria de alto horno (EAH) tienen mayor contenido de líquido activador su resistencia a la compresión se aproxima a la que desarrollan los morteros de cemento Portland Tipo I que cumplen con todos los requerimientos de la norma.

Los resultados EAH+W son escorias activadas alcalinamente con Waterglass y se observa que supera a todos los resultados obtenidos, lo que conlleva a concluir que aumentando el porcentaje de arena y disminuyendo el líquido activador se pueden obtener mejores resistencias a la compresión.

#### 9.4. FINURA DE LA ESCORIA

Gráfica 10 Finura de la EAH



Fuente Autoría propia

Los mejores resultados a la compresión se obtienen con probetas de escoria Pasa 200.

Las probetas que se elaboraron con escoria pasa 100 presentan mayor porosidad y se desboronan con facilidad, su resistencia a la compresión alcanza alrededor del 35-55% de la resistencia de los morteros de escoria con Pasa 200 a la mismas edades y mismas relaciones Waterglass/NaOH.

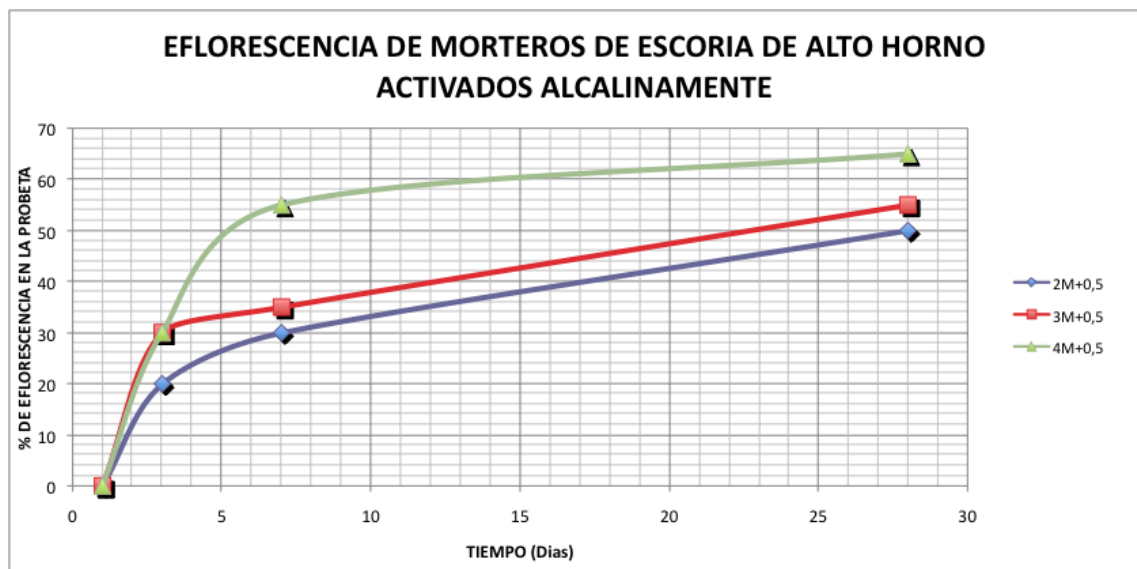
Los morteros de escoria con Pasa 100 no presentan un aumento significativo en la resistencia a la compresión.

La finura es fundamental en la resistencia a la compresión, al disminuir la finura mayor será la resistencia ya que la escoria ocupa los espacios entre las partículas de arena lo que genera una matriz más compacta.

## 9.5. EFLORESCENCIA DE LOS MORTEROS

La eflorescencia es la reacción que sufren los morteros activados alcalinamente debido a que los compuestos que no reaccionaron químicamente buscan la forma de salir al medio ambiente. Dicha eflorescencia se puede disminuir al curar las probetas en altas temperaturas, pero esto disminuiría la resistencia a la compresión.

Gráfica 11 Eflorescencia

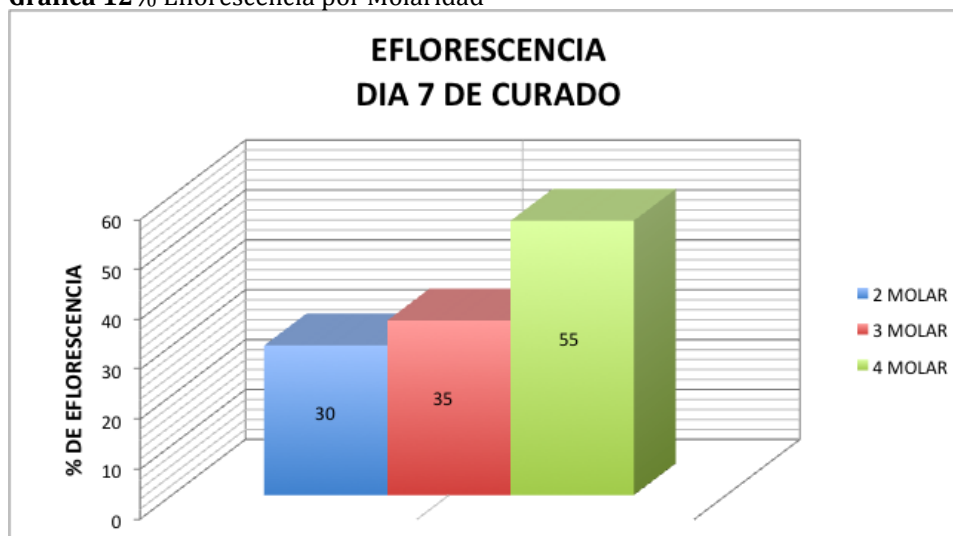


Fuente Autoría Propia

La eflorescencia ocurre únicamente en los morteros activados alcalinamente. Como se puede observar en la gráfica 11 dicha eflorescencia aumenta gradualmente con el pasar del tiempo en mayor grado cuando la molaridad del activador alcalino también aumenta, esto para el caso del NaOH.

Como se puede observar al día 7 de curado la mayor eflorescencia se produce con el NaOH 4M, lo que conduce a afirmar que la eflorescencia está directamente relacionada con la molaridad del NaOH, a pesar que los morteros de escoria de alto horno activados alcalinamente con NaOH 4M y relación Waterglass/NaOH igual a 1,0 presentan eflorescencia ésta es muy mínima lo que conlleva a considerarlos como capaz de satisfacer las necesidades que satisface hoy en día el cemento Portland Tipo I.

**Gráfica 12%** Eflorescencia por Molaridad



Fuente Autoría Propia

No se recomienda la relación Waterglass/NaOH igual a 0,5 ya que es la que mayor eflorescencia presenta y puede ocasionar reducción en la impermeabilidad y durabilidad de los morteros.

Las probetas que tienen mayor cantidad de Waterglass no presentan eflorescencia con el pasar del tiempo.

### 9.6. CAMBIO VOLUMÉTRICO

Es la variación en altura que sufren los morteros. Se realizó dicho análisis para encontrar el que más se acerque a los resultados de Cemento Portland Tipo I. Todas las probetas tienen las mismas características.

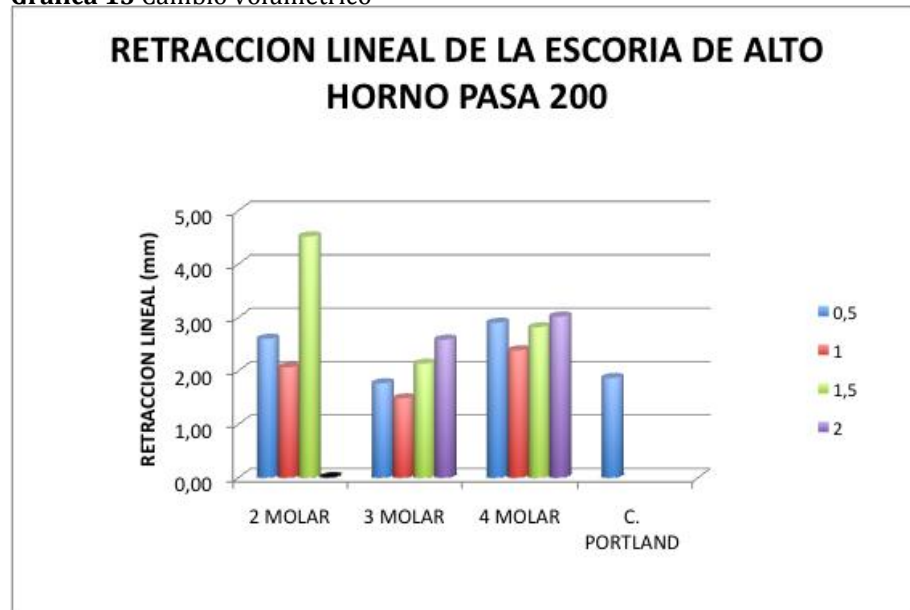
**Tabla 10**Retracción lineal

		RETRACION LINEAL (mm)			
		2 MOLAR	3 MOLAR	4 MOLAR	C. PORTLAND
RELACION WATERGLASS /NaOH	0,5	2,60	1,77	2,90	1,87
	1	2,07	1,48	2,38	
	1,5	4,52	2,13	2,82	
	2	NA	2,58	3,02	

Fuente Autoría Propia

Se observó que la variación en altura sin importar la relación Waterglass/NaOH y la molaridad del NaOH se produce hasta las 24 horas de curado a temperatura ambiente, por tal motivo se considera una sola altura de probeta por molaridad y relación.

**Gráfica 13** Cambio volumétrico



Fuente Autoría Propia

La relación Waterglass/NaOH que presenta más retracción lineal es 2,0 lo que indica que el principal factor que afecta es el Waterglass, debido a su estructura y la microporosidad que producen los morteros de escoria que son activados con este líquido.

En comparación con el cambio volumétrico que sufren los morteros de cemento Portland Tipo I, las probetas de escoria de alto horno pasa 200 tiene mayor grado de afectación por secado.

El NaOH 3M y la relación Waterglass/NaOH igual a 1,0 son los factores que menor variación en altura producen.

En comparación del cemento Portland Tipo I y las Escorias de Alto horno que obtuvieron el mejor resultado a la compresión, se observa que tienen mayor variación en altura las activadas alcalinamente pero para ello se están llevando a cabo diferentes investigaciones con el fin de disminuir dicho cambio volumétrico con la adición de fibras y/o aditivos.

## 10. CONCLUSIONES

El análisis mecánico a la compresión indica que los morteros de escoria de alto activados alcalinamente presentan la mejor resistencia (26 MPa) utilizando como activadores alcalinos Waterglass y NaOH 4M con relación igual a 1,0, esto debido a que los pH de las disoluciones son muy altos, lo que conlleva a la generación de Sílice Soluble lo que es responsable de formación de matrices más compactas.

El Waterglass utilizado como único activador toma mayor tiempo en reaccionar con la escoria, por tal motivo los morteros tardan más en presentar resistencia alguna, mientras que si se realiza una mezcla con NaOH dichos morteros presentan una resistencia mínima a tempranas edades (24 horas).

La finura de la escoria es directamente proporcional a la resistencia mecánica a la compresión, es decir que al disminuir el tamaño de las partículas dicha resistencia puede aumentar considerablemente. Las escorias pasa Tamiz 100 presentan un alto porcentaje de desmoronamiento en los morteros.

El desmoronamiento en las probetas se puede disminuir al aumentar el porcentaje de escoria y de activador alcalino.

La eflorescencia se produce cuando el activador alcalino es el NaOH y aumenta al incrementar la molaridad de dicho líquido activador, pero cuando es utilizado en una mezcla donde Waterglass tenga el mismo o superior porcentaje la eflorescencia desaparece.

El incremento de ligante (escoria de alto horno) en las mezclas de mortero mejora el comportamiento mecánico a la compresión.

El NaOH 2M no se recomienda como activador alcalino ya que los morteros presentan la menor resistencia a la compresión.

Con respecto a la variación en el volumen, los morteros de escoria de alto horno presentan mayor disminución en altura en comparación con los cementos Portland, en principal medida cuando el porcentaje de Waterglass tiende a aumentar en las mezclas.

La mejor resistencia a la compresión presentan los morteros activados alcalinamente con relaciones 1,0 de Waterglass/NaOH

Los morteros de escoria con relación Waterglass/NaOH 3M igual a 1,0 aunque no tienen la mayor resistencia a la compresión a 28 días presentan varias ventajas entre ellas: su resistencia es la segunda obtenida en el desarrollo de la investigación (24 MPa), su eflorescencia es 0 y su retracción lineal es la menor de la obtenida para las escorias y a demás menor que los de cemento Portland.

La fabricación de morteros de escoria de alto horno activada alcalinamente es mucho más económica que los de cementos Portland, se disminuyen también los gastos energéticos y de combustibles.

o

## 11. RECOMENDACIONES

A partir de las relaciones Waterglass/NaOH con los mejores resultados de resistencia a la compresión se recomienda hacer en ensayo de fluidez para conocer el contenido ideal de activador alcalino.

Analizar la resistencia a la compresión de morteros en un tiempo más prolongado, con fin de determinar si la resistencia continua aumentando.

Realizar los ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado para la relación Waterglass/NaOH igual a 1,0 con NaOH 4M.

Se recomienda realizar ensayos de resistencia a la compresión disminuyendo la finura de la escoria de alto horno para obtener mejores resultados de resistencia a la compresión.

Aumentar en las mezclas de morteros el contenido de arena para disminuir los costos de producción.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, Y. Incidencia de La Temperatura Ambiente En La Formación de Compuestos Cementantes Mediante La Activación Alcalina de Cenizas de Carbón. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2013. pp. 1-69

BERNAL, S, MEJIA, R y RODRIGUEZ, E. Alkali-Activated Materials: Cementing a Sustainable Future. En: Ingeniería y Competitividad. 2013, Vol. 15, n. 2, pp. 211-223.

COLQUE PINELO, Teresay SANCHEZ CAMPOS, Víctor. Los Gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?'. Asociación amigos de la tierra. Perú, 2007.

DAVIDOVITS, J. Properties of Geopolymer Cements. En: Alkaline Cements and Concretes. 1994, pp. 131–49.

Domoterra. El cemento y la producción de CO<sub>2</sub>. España. 2013.

ESCALANTE, J y Col. Reactividad y propiedades mecánicas de escoria de alto horno activada por álcalis. En: Bol. Soc. Ceram. V. México. 2002. Vol. 41, pp. 451-458.

ESPINOZA PÉREZ L. J. y ESCALANTE GARCIA J. I. Morteros a Base de Vidrio de Desecho/escoria de Alto Horno; Activación Mecanoquímica Del Vidrio En Soluciones Alcalinas. En: Nexo. Nicaragua. 2011, Vol. 24, n. 2, pp 92-103

FERNANDEZ JIMENEZ A., PUERTAS, F y FERNANDEZ CARRASCO L. Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno. En: Materiales de Construcción. España. 1996, Vol. 46, n. 241, pp. 23-37.

FICEM. Informe Estadístico 2013. pp. 1-51

GLUKHHOVSKY, V, ROSTOVSKAJA, G y RUMYNA, G. High Strength Slag-Alkaline Cements, citado por Puertas. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas del futuro.

Guía del Usuario de Altos Hornos. Steeluniversity (Online). Versión 1.10. 2013. pp. 1–21.

HOGAN, F. Study of Grinding Energy Required for Pelletized and Water Granulated Slag. En: Silic. Ind. 1983. Vol. 48, n. 3, pp. 71-80.

KUTTI, T. Hydration Products of Alkali Activated Slag, citado por Puertas. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas del futuro.

MONZO, M, FERNANDEZ-JIMENEZ, A, VICENT, M, PALOMO, A Y BARBA, A Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado. Sociedad española de cerámica y vidrio. 2008, Vol. 47, n.1,pp. 35-43.



MONZO, M, FERNANDEZ-JIMENEZ, A, VICENT, M, PALOMO, A Y BARBA, A Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado. Sociedad española de cerámica y vidrio. 2008, Vol. 47, n.1, pp. 35-43.

PUERTAS, Francisca, PALACIOS, Marta, GUTIÉRREZ, RUBY. Morteros de Escorias Activada Alcalinamente. Propiedades y Durabilidad. España. Pp. 1-12

PUERTAS, Francisca. Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas del futuro. En: Materiales de Construcción. España. 1995, Vol. 45, pp. 1-11.

REGOURD, M. Slags and Slag Cements. En: Concrete Technology and Design. Inglaterra. Vol. 3, pp. 73-99.

RUNZHANG, Y., SHI-ZI, O y QIONG-YING, G. Structure and Hydraulic Activity of Slags in the System  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . En: Silic. Ind. 1983. Vol. 1, pp. 3-6.

SANCHEZ, H. Estado de Arte Sobre Las Escorias Negras de Horno de Arco Eléctrico Y Sus Aplicaciones En Pavimentos. V Cong. Inter. De Ing. Civil. Universidad Santo Tomas. 2014. pp. 1-14.

