

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



*Metodología para la fabricación de concretos base escoria
de alto horno con activación alcalina.*

Por

KAREN DE LA CARIDAD JUVIEL DURÁN

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en
Materiales de Construcción.

Abril, 2026

Vº. Bº. Dr. Ismael Flores Vivian

METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETOS BASE ESCORIA DE ALTO HORNO CON ACTIVACIÓN ALCALINA.

Aprobación de la tesis

Dr. Ismael Flores Vivian

Presidente Director de tesis, adscrito a la FIC-UANL

Dr. Alejandro Durán Herrera

Secretario Co-director de tesis Evaluador adscrito a la FIC – UANL

Dr. Gilbert Ortiz Rabell

Vocal Evaluador externo a la UANL

Dra. Dulce María Anahí Cruz Moreno

Vocal Evaluador externo a la UANL

Dr. José Manuel Mendoza Rangel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico proporcionado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil e Instituto de Ingeniería Civil.

Al departamento de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por brindarme las herramientas y materiales para realizar este proyecto.

Al Laboratorio de Investigación e Innovación de Materiales de Construcción, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al Dr. Ismael Flores Vivian por su valioso apoyo y orientación, fundamentales para la culminación de esta investigación.

A los Dres. Alejandro Durán Herrera y Lucio Guillermo López Yépez por el apoyo brindado y acompañamiento durante la Maestría.

A los Dres. Gilbert Ortiz Rabell y Dulce María Anahí Cruz Moreno por su orientación y aportaciones.

A los Ingenieros Jorge Castro, Diego Alexis Minaya y al Sr. Gumaro, por su ayuda y disposición en todo momento durante el desarrollo experimental de esta investigación.

A mi esposo Juan Alejandro Domínguez Coutiño por ser mi refugio y mi apoyo constante, por estar siempre presente y sostenerme en los momentos más difíciles. Su compañía y confianza fueron fundamentales para poder culminar este logro.

A mi familia por su apoyo y sacrificio para que realizara este proyecto de superación profesional. En especial a mis tíos Alain Basail, Yoimy Castañeda Seijas, Youssy Mainegra Seijas y mis abuelos María Caridad Seijas Hernández y Manuel Durán Rodríguez.

Y a ti mamá Yohilyn Yani Durán Seijas, te dedico este logro que, aunque no estás físicamente, sigues presente en cada paso de mi vida. Tu amor, ejemplo e impulso constante para que me formara como profesional viven en mí y en este logro, que también es tuyo.

Índice	
Lista de tablas.	3
Lista de figuras.	4
Lista de símbolos y abreviaciones	6
Resumen	8
INTRODUCCIÓN	9
Planteamiento del problema.....	12
Justificación	14
Hipótesis	15
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
Capítulo 1. GENERALIDADES.....	17
1.1 Cementantes Activados Alcalinamente (CAA).	17
1.2 Escoria de Alto Horno.	18
1.3 Activador Alcalino.....	20
Capítulo 2. ANTECEDENTES	22
2.1 Comparación del impacto ambiental uso de CAA y los sistemas basados en cemento Portland.....	22
2.2 Composición química	23
2.2.1 Mecanismos de reacción.....	24
2.2.2 Variables que Influyen en la Reactividad de los Aluminosilicatos	26
2.2.3 Productos de hidratación	28
2.3 Características y propiedades de Cementos de Escoria Activada.	29
2.3.1 Resistencia a la compresión.....	30
2.3.2 Retracción en CAA	31
Capítulo 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	35
3.1 Materiales	35
3.1.1 Escoria de Alto Horno.....	35
3.1.2 Activador alcalino “Alkahidroxy”	35
3.1.3 Agregados grueso y fino	36
3.2. Evaluación del efecto del activador alcalino en la resistencia a compresión de morteros manteniendo una relación l/s=0.5 con distintos porcentajes de dilución.	36
3.3 Fluidez	38

3.4	Puntos de Saturación	39
3.5	Elaboración de morteros con arena N° 4	41
3.6	Resistencia a compresión	41
3.7	Diseño de mezcla.....	42
3.8	Ensayes de resistencia a la compresión en Concretos	44
3.9	Determinación de la Resistividad Eléctrica Superficial (RES) en cilindros.	45
3.10	Carbonatación.	46
3.11	Retracción por Secado.....	48
Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		49
4.1.1	Escoria Granulada de Alto Horno	49
4.1.2	Activador Alcalino (Alkahidroxy).....	51
4.1.3	Agregados	52
4.2	Influencia en la RC la dilución en agua del activador Alkahidroxy	53
4.3	Puntos de Saturación	54
4.4	Resistencia a la compresión en morteros con Arena N°4	56
4.5	Resistencia a la compresión en con concretos con escoria activada.	58
4.6	Resistividad eléctrica superficial (RES)	59
4.7	Carbonatación.	60
Capítulo 5. CONCLUSIONES.....		62
Capítulo 6: BIBLIOGRAFÍA.....		63

Lista de tablas.

Tabla 1 Calidad de la escoria.....	19
Tabla 2 Propiedades de los aditivos.....	31
Tabla 3 Relación de porcentaje de dilución de Alkahidroxy y los valores de revenimiento.....	35
Tabla 4 Densidad de la escoria granulada.....	39
Tabla 5 Composición química de la Escoria Granulada.....	39
Tabla 6 Densidad de Alkahidroxy y contenido de sólido.....	41
Tabla 7 Valor de pH.....	41
Tabla 8 Composición química de Alkahidroxy.....	41
Tabla 9 Propiedades físicas de los agregados.....	42
Tabla 10 Serie de morteros.....	42

Lista de figuras.

Figura 1 Procesamiento de la escoria de alto horno.....	11
Figura 2 Diagrama ternario de los cementantes más utilizados para activación alcalina.....	16
Figura 3 Mecanismo de reacción simplificada de geopolímeros.....	17
Figura 4 Proceso de disolución: (A) intercambio de H^+ por Ca^{2+} y Na^+ , (B) hidrólisis de enlaces Al-O-Si, (C) destrucción de la red despolimerizada y (D) liberación de Si y Al.....	18
Figura 5 Relación de la retracción autógena y retracción química.....	25
Figura 6 Métodos utilizados para corroborar el pH del activador.....	28
Figura 7 Esquema representativo de los morteros.....	29
Figura 8 Mezclado de mortero relación l/s=0.5 con arena estándar.....	30
Figura 9 Cubos de morteros E1, E2 y E3.....	30
Figura 10 Medición de fluidez en la mesa de flujo para mortero con arena estándar.....	31
Figura 11 Cono de Marsh para determinar los puntos de saturación.....	32
Figura 12 Medición de fluidez en la mesa de flujo para mortero con arena N°4.....	33
Figura 13 Ensaye de resistencia a compresión.....	33
Figura 14 Determinación de revenimiento a) MR: Rev =17cm b) MEA: Rev =13cm.....	34
Figura 15 Determinación de revenimiento MCH a) Rev = 0 cm b) Rev =22 cm.....	35
Figura 16 Especímenes de cilindros.....	36
Figura 17 Mediciones de RES. a) Método de Wenner b) Método de Bulk.....	36
Figura 18 Preparación de las barras para someterla al e proceso de carbonatación.....	37
Figura 19 Procedimiento para determinar la penetración de CO_2	37
Figura 20 Medición de la Retracción por secado.....	38
Figura 21 Análisis de DRX de la escoria.....	40
Figura 22 Distribución del tamaño de partícula, Escoria Granulada.....	40
Figura 23 Curva de desarrollo de resistencia a compresión.....	43
Figura 24 Puntos de saturación en pasta con relación l/s=0.3.....	44
Figura 25 Puntos de saturación en pasta con relación l/s=0.4.....	44

Figura 26 Puntos de saturación en pasta con relación l/s=0.5.....	44
Figura 27 Desarrollo de resistencia a compresión en morteros con Arena N°4.....	45
Figura 28 Comparativa de desarrollo de resistencia a compresión entre un concreto de escoria activada y concreto base cemento Portland	46
Figura 29 Valores de RES por el método de Wenner.....	47
Figura 30 Valores de RES por Bulk o método directo.....	47
Figura 31 Penetración de CO ₂	48
Figura 32 Penetración de CO ₂ edad 7 días a) MR b) MEA.....	48

Lista de símbolos y abreviaciones

CAA Cementos Activados Alcalinamente

CP cemento Portland

CO₂ Dióxido de Carbono

SiO₂ Sílice

EAH Escoria de Alto Horno

CPC40 Cemento Portland Compuesto de 40 MPa

CH₄ Metano

N₂O Óxido de Nitrógeno

NaOH Hidróxido de Sodio

KOH Hidróxido de Potasio

SiO₂/Al₂O₃ Relación molar de óxido de sílice y óxido de aluminio

Na₂O/Al₂O₃ Relación molar de óxido de sodio y óxido de aluminio

CaO Óxido de Calcio

MgO Óxido de Magnesio

OH- Ión hidroxilo

Al₂O₃ Alúmina

Ca Calcio

Fe₂O₃ Óxido de Hierro III

NaSi₂O₃ Silicato de Sodio

Si-O-Si Siloxo

Al-O-Si Sialato

Si⁴⁺ Cation de silicio

Al³⁺ Cation de aluminio

Ca²⁺ Cation de calcio

Mg²⁺ Cation de magnesio

Al Aluminio

H₂O Agua

CaCO₃ Carbonato de Calcio

C-S-H Silicato de Calcio Hidratado

C-(A)-S-H Silicato de Calcio-Aluminio hidratado

l/s Relación líquido-sólido

RC Resistencia a Compresión

RESUMEN

En este estudio se utilizó un material alternativo al cemento Portland convencional: la escoria granulada de alto horno, integrándola como precursor en un sistema de cementante activado alcalinamente. En lugar de los activadores comúnmente empleados, se utilizó "Alkahidroxy" esto por las bondades que ofrece en cuanto a economía y su fácil manejabilidad que no representa un peligro para la salud del usuario.

Se realizaron pruebas mecánicas de resistencia a compresión en pastas, morteros y, finalmente, en concretos. En el caso de los morteros, se determinó inicialmente la relación líquido/sólido para lograr una fluidez objetivo del $110 \pm 5\%$, obteniendo un valor de 0.65. Posteriormente, se fabricaron muestras cúbicas de 5x5 cm para evaluar su resistencia a la compresión a edades de 1, 3, 7 y 28 días.

Una vez establecido lo anterior, se elaboraron concretos activados con escoria y una mezcla de referencia basada en cemento Portland. Se determinaron las resistencias mecánicas en cilindros de 10x20 cm, evidenciando que la mezcla con escoria activada mostró un mejor desempeño en el desarrollo de resistencia, alcanzando valores de hasta 70 MPa a los 90 días.

Además de las pruebas mecánicas, se llevaron a cabo pruebas de durabilidad, como la carbonatación a edades de 7, 14, 21, 28 y 56 días, la resistividad eléctrica superficial a 1, 7, 28, 56 y 90 días, y ensayos de variaciones volumétricas como la retracción química, autógena y por secado. Estos análisis demostraron la buena compatibilidad entre la escoria granulada de alto horno y el activador Alkahidroxy.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha incrementado notablemente el interés de la comunidad científica a nivel global en la búsqueda de formulaciones de materiales que puedan reemplazar al cemento Portland, considerando los impactos ambientales asociados con su producción. Este enfoque tiene como meta la obtención de materiales que no solo presenten un rendimiento mecánico comparable al del cemento convencional, sino que también sean duraderos, constituyendo así una opción viable para su aplicación en la industria de la construcción (1). En México, al igual que en numerosos países alrededor del mundo, la investigación continúa avanzando en el estudio de la composición, dosificación y elaboración de estos materiales, reflejando el compromiso continuo con el desarrollo sostenible.

El uso cada vez más extendido de materiales suplementarios, tales como metacaolín, cenizas volante, humo de sílice y escorias industriales, como reemplazo parcial o total del cemento Portland, ha mostrado un incremento a nivel mundial. Esto se observa especialmente en la fabricación de concreto de alta resistencia y alto rendimiento, ya que estos materiales tienen el potencial de mejorar las propiedades del concreto actuando como relleno y reaccionando químicamente (2).

En este contexto, han surgido los cementos activados con álcali (CAA) como aglutinantes alternativos al cemento Portland (CP). Se estima que la sustitución del cemento Portland (CP) por cementantes activados alcalinamente puede disminuir hasta un 80 % las emisiones de CO_2 (3). Estos sistemas utilizan un precursor rico en aluminosilicatos y un medio alcalino para obtener propiedades cementantes (4). Los precursores se obtienen principalmente como desechos de otras industrias, aunque también existen fuentes naturales. Los mecanismos de reacción de los CAA varían según la composición del precursor y los activadores. Se clasifican en sistemas bajos en calcio y sistemas altos en calcio según el contenido de calcio de las materias primas (5). Ya se ha comprobado la viabilidad de utilizar estos materiales, desarrollando propiedades mecánicas similares a las del cemento convencional o incluso superándolo y al ser materiales más densos y homogéneos se convierten en una excelente opción a utilizarse en ambientes agresivos donde el CP no tiene el mejor desempeño (6).

En la obtención de arrabio en la industria siderúrgica la escoria de alto horno se genera como subproducto y esta presenta diversas aplicaciones. Este material puede utilizarse como sustituto parcial del cemento Portland o actuar directamente como material cementante tras un proceso de activación química. Su reactividad depende de varios factores, entre ellos el área superficial específica, la composición química y el contenido de fase vítrea (7). Las propiedades hidráulicas de la escoria pueden activarse mediante diferentes técnicas; sin embargo, una de las más estudiadas corresponde a la activación alcalina, la cual consiste en incrementar el pH de la solución porosa por encima de 13 para favorecer la disolución de la estructura vítrea e inducir el proceso de hidratación asociado a la geopolimerización (8). En la fabricación de cementantes álcali-activados (CAA) es posible emplear distintas escorias residuales provenientes de procesos metalúrgicos diversos, siempre que el material posea un carácter predominantemente silicoaluminoso (9).

La composición química de la escoria es un factor clave que influye en su reactividad. La diferencia en la proporción de componentes como CaO y SiO₂ determina si una Escoria de Alto Horno (EAH) es básica, neutra o ácida (10),(11). En particular, una EAH básica exhibe una relación de CaO/SiO₂ mayor que 1, mientras que las escorias ácidas o neutras tienen una relación CaO/SiO₂ igual o menor a 1.

Esta distinción es significativa porque afecta la actividad hidráulica de la escoria cuando se activa con agentes alcalinos. En general, se observa que, a mayor basicidad, es decir, cuando la relación de CaO/SiO₂ es mayor, la actividad hidráulica en presencia de activadores alcalinos tiende a ser más pronunciada. Esto implica que las escorias básicas tienen una mayor capacidad para reaccionar y formar compuestos hidráulicos cuando se activan con agentes alcalinos en comparación con las escorias neutras o ácidas.

A pesar de las excelentes propiedades que han demostrado los CAA en términos de resistencia mecánica, durabilidad y sostenibilidad ambiental, la búsqueda de mejoras y el desarrollo de materiales de nueva generación continúan siendo una prioridad en el campo de la ingeniería de materiales de construcción. En este contexto, los esfuerzos de investigación se orientan hacia el diseño de materiales de alto desempeño capaces de

superar las limitaciones inherentes a los sistemas convencionales y de ofrecer soluciones innovadoras y técnicamente viables para una amplia variedad de aplicaciones.

Por todo lo expuesto anteriormente en este estudio se sugiere emplear escoria granulada de alto horno como una opción de cementante más sostenible en comparación con el Cemento Portland (CP). Además, se propone el uso de un nuevo activador llamado "Alkahidroxy", que ofrece la ventaja de ser un material que no representa un riesgo para la salud, lo cual es un problema comúnmente asociado con los activadores del grupo de los hidróxidos y silicatos utilizados habitualmente.

Por lo que en este trabajo se busca evaluar la viabilidad de emplear una Escoria de Alto Horno (EAH) en conjunto con el activador "Alkahidroxy" para la producción de concretos con CAA, que presenten propiedades hidráulicas similares o incluso superiores a las del CP.

Planteamiento del problema

El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera es una de las principales causas del cambio climático. Entre ellos el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) (12). Este fenómeno representa una problemática de alcance mundial de gran importancia, debido a que pone en riesgo el equilibrio ambiental y el bienestar de la sociedad. Aunque existe un amplio debate en torno a las emisiones antropogénicas de CO_2 y su impacto en esta problemática, es evidente que una proporción considerable de dichas emisiones, así como el rápido aumento en la concentración de estos gases, tiene su origen en los procesos industriales.

Dentro de la industria de la construcción, una fuente significativa de estas emisiones corresponde a la producción de cemento Portland. Se calcula que este sector es responsable de cerca del 8% de las emisiones mundiales de CO_2 (13). Dichas emisiones forman parte inherente del proceso de producción del cemento Portland, ya que la descarbonatación de la piedra caliza es indispensable en la producción de clínker. Este procedimiento se lleva a cabo a altas temperaturas, lo que implica el uso y combustión de combustibles.

La búsqueda de soluciones para abordar este problema ha conducido a la investigación de nuevos materiales alternativos. Como resultado, se han desarrollado nuevos cementantes que pueden cumplir con los requisitos estructurales y de durabilidad, satisfaciendo así las demandas emergentes de sostenibilidad. Los CAA surgen como una opción sostenible en comparación con los materiales convencionales basados en CP. No obstante, aún es necesario continuar investigando en este campo para ampliar su aplicación en la industria de la construcción.

De ahí que esta investigación busca contribuir a la comprensión, de estos sistemas activados alcalinamente para mejorar su desempeño y encontrar un proporcionamiento óptimo que permita colocar concretos de EAH activada. Los activadores que comúnmente se utilizan como el NaOH, KOH y $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$ llevan un procedimiento previo de preparación para el cual se requiere de agua potable, materia prima y consumo energético. Además, son altamente peligrosos para la salud por su alta alcalinidad, por

lo cual esto dificulta su uso a nivel de campo. Dicho esto, en este trabajo se analizará la implementación de otro activador el cual es conocido como “Alkahidroxy” que no presenta estas dificultades.

Además de todo lo expuesto anteriormente se pretende realizar un análisis de las variaciones volumétricas del cementante de escoria activada ya que investigaciones recientes indican que la estabilidad volumétrica de los sistemas activados con álcali (CAA) constituye uno de los aspectos menos satisfactorios en cuanto al rendimiento general, presentando valores de 2 a 4 veces mayores en comparación con el cemento Portland (14),(15),(16). Este fenómeno se atribuye a la variabilidad inherente de diversas composiciones químicas del precursor, el activador (y aditivos), los productos de reacción y la microestructura (17). Lo que causa problemas relacionados con las propiedades mecánicas y la durabilidad, como la carbonatación, penetración de iones, resistividad eléctrica y la resistencia al congelamiento y descongelamiento, entre otros (18) ,(19), (20).

A pesar de los avances en la comprensión de CAA aún falta mucho por lograr posicionar este tipo de sistemas como una alternativa para que se produzca a grande escala y ofrezca una competencia al CP. En su mayoría, estos estudios se han realizado a nivel de pastas y/o morteros, pero ya en la práctica, el material más utilizado en términos de volumen es el concreto, en esta investigación se pretende establecer un procedimiento y metodología, análisis de propiedades mecánicas, en estado fresco y durabilidad que sirva de base para posteriores trabajos de investigación.

Justificación

Esta investigación surge como respuesta al creciente problema ambiental causado por el incremento de los gases de efecto invernadero contribuyendo al cambio climático global. La industria de la construcción, particularmente la producción de cemento Portland, es responsable de una parte significativa de estas emisiones, representando hasta un 8% de las emisiones de CO₂. Este proceso implica la descarbonatación de la piedra caliza a altas temperaturas, generando un impacto ambiental considerable.

Ante este escenario, esta investigación se enfoca en la búsqueda de alternativas más sostenibles con el medio ambiente. Los cementantes activados alcalinamente (CAA) han surgido como una opción prometedora, ya que ofrecen un rendimiento mecánico comparable o superior al cemento Portland convencional, pero con una huella ambiental reducida. Sin embargo, aún existen desafíos en su implementación a gran escala, como la estabilidad volumétrica y la necesidad de activadores alcalinos que son peligrosos para la salud.

Por lo tanto, este estudio se justifica en la necesidad de investigar y comprender a fondo los sistemas CAA, con el objetivo de mejorar su desempeño y establecer un método óptimo para la elaboración de concretos utilizando escoria de alto horno activada alcalinamente. Además, se busca analizar la viabilidad de un nuevo activador, "Alkahidroxy", que promete ser una alternativa más segura y saludable que los activadores más usados comúnmente.

Esta investigación abordará aspectos clave como la estabilidad volumétrica, las propiedades mecánicas, la durabilidad y la implementación práctica de los CAA en concretos. Se espera que los hallazgos contribuyan al desarrollo de nuevas tecnologías en la industria de la construcción, ofreciendo soluciones innovadoras y sostenibles para enfrentar los desafíos ambientales actuales y en un aporte más para un futuro robusto y sostenible en la construcción, beneficiando a la industria y a la sociedad en su conjunto.

Hipótesis

La utilización de un producto de nombre comercial "Alkahidroxy" permitirá la activación alcalina de una Escoria Granulada de Alto Horno para la fabricación de concretos, los cuales en estado fresco y endurecido presentarán propiedades comparables o superiores a las de un concreto convencional base cemento Portland.

Objetivo General

Establecer una metodología estándar para fabricar concretos base Escoria Granulada de Alto Horno con activación alcalina mediante el activador de nombre comercial Alkahidroxy, los cuales en estado fresco y endurecido presenten propiedades comparables o superiores a las de un concreto convencional base cemento Portland.

Objetivos Específicos

1. Establecer una metodología para el proporcionamiento de mezclas de concretos bases EAH activadas alcalinamente con Alkahidroxy con una relación líquido/sólido=0.65
2. Evaluar las propiedades en estado fresco (temperatura, tiempos de fraguado, contenido de aire y masa unitaria) de los concretos base CP y concretos bases EAH activados alcalinamente
3. Evaluar la resistencia a la compresión, indicadores de durabilidad y la estabilidad volumétrica de los concretos base CP y concretos base EAH activados alcalinamente (contracción autógena, química y secado).

Capítulo 1. GENERALIDADES

En resumen, este capítulo proporciona una visión integral de los aspectos técnicos involucrados en el desarrollo de cementantes activados alcalinamente a base de escoria granulada de alto horno, sentando las bases para futuras investigaciones y estudios en el ámbito de la construcción sostenible.

1.1 Cementantes Activados Alcalinamente.

El primer uso de un compuesto alcalino como constituyente de un material cementante se remonta a la década de 1930. En ese momento, un investigador llamado Kühl llevó a cabo estudios sobre el fraguado de mezclas de escoria molida y una solución de hidróxido de potasio (KOH) (12).

El trabajo de Kühl fue pionero en la exploración de la activación alcalina de materiales como la escoria para producir un material con propiedades cementantes. La escoria, un subproducto de la industria siderúrgica, ya se reconocía por su potencial como material cementante debido a su composición química y sus propiedades reactivas. En 1937, Chassevent llevó a cabo un estudio sobre la reactividad de una escoria empleando soluciones de hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH). Descubriendo que la interacción entre ambos afectan la capacidad de la escoria para endurecerse y desarrollar resistencia mecánica (12).

En 1940, Purdon realizó el primer estudio amplio sobre cementos sin Clínker. Sus investigaciones las desarrolló con escoria y NaOH producidos por una base y una sal alcalina. Posteriormente, el campo de la activación alcalina no experimentó una expansión significativa, con excepción de las investigaciones realizadas por Glukhovsky en Ucrania. Este investigador desarrolló un nuevo material cementante conocido como “geo-cemento”, elaborado por aluminosilicatos combinados con residuos industriales.

Durante la década de 1970, el científico francés Joseph Davidovits registró diferentes formulaciones desarrolladas a partir de aluminosilicatos e introdujo el término “geopolímero”. Dicho concepto fue empleado para definir materiales cementantes activados alcalinamente con bajas concentraciones de calcio, obtenidos mediante la

mezcla de un precursor sólido aluminosilicato y una solución activadora de carácter alcalino (21).

Durante los años noventa, hubo un aumento en el interés por la investigación de los geopolímeros, siendo Palomo y Glasser quienes establecieron los cimientos para su desarrollo. En 1992, publicaron el primer estudio científico sobre geopolímeros elaborados a partir de metacaolín, lo que representó un hito significativo en el progreso de este campo de estudio (22).

Desde entonces, numerosos grupos de investigación se han sumergido en el estudio de cementantes activados alcalinamente, aprovechando el potencial de precursores como el metacaolín, la ceniza volante y escoria de alto horno siendo esta última una de las más utilizadas. Este enfoque permite una mejor comprensión de los mecanismos de formación y las características de estos materiales cementantes, aportando así al avance del conocimiento en el campo de los CAA.

Los CAA han encontrado una amplia gama de aplicaciones en diversas áreas debido a sus propiedades únicas y su versatilidad. Algunos de los campos de aplicación más destacados incluyen: concreto estructural, tubos de concreto, concreto refractario, bloques de mampostería (22). Aunque los CAA han encontrado una aplicación creciente en la construcción, todavía existen áreas de investigación que no han sido completamente exploradas que podrían ampliar su alcance y potencial de aplicación. Estos nichos representan oportunidades para el desarrollo futuro de los geopolímeros y su uso en una variedad de industrias y aplicaciones especializadas.

1.2 Escoria de Alto Horno.

Por todo lo anterior mencionado la EAH activada por álcalis representa una alternativa de producir materiales de construcción que puede presentar características superiores al CP (41). La escoria granulada de alto horno se produce como un subproducto durante el proceso de fabricación de hierro en altos hornos. Este proceso comienza con la carga de materias primas como mineral de hierro, coque y fundentes (generalmente piedra caliza) en un alto horno. El coque se quema como combustible, generando altas temperaturas que funden los materiales de carga.

Durante la fundición, los componentes no metálicos de la carga, como la piedra caliza, se combinan con las impurezas del mineral de hierro y otros materiales para formar la escoria. Esta escoria, que flota sobre el metal fundido, es una masa vítrea compuesta principalmente de óxidos de silicio, calcio, aluminio y magnesio, junto con otros componentes menores (23). Según el proceso de enfriamiento se obtienen 3 tipos de escoria: aireada, expandida y granulada.

Una vez el proceso de fusión ha concluido, la escoria se enfriará en un lecho de agua o se someterá a un proceso de enfriamiento rápido, lo que resulta en su solidificación y fragmentación en pequeñas partículas. Este proceso produce la escoria granulada de alto horno, un material granular con propiedades hidráulicas pudiendo reaccionar de forma muy lenta con el agua. Por lo que puede ser adecuado su uso como cementante en la industria de la construcción ver *Figura 1* el procesamiento de la escoria de alto horno.

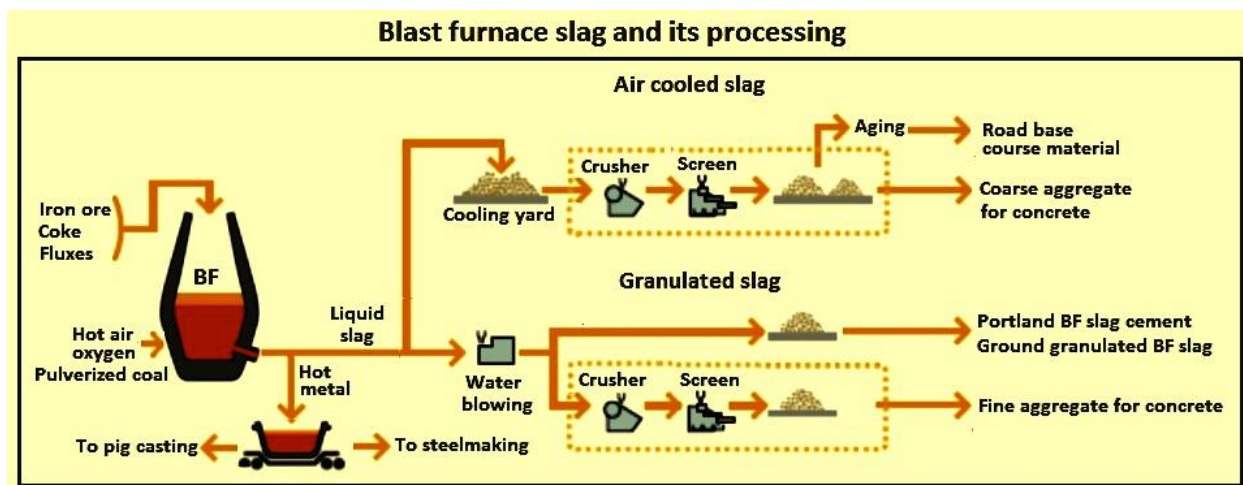


Fig. 1 Procesamiento de la escoria de alto horno (24).

La composición química de este material de desecho es similar a la del cemento Pórtland. Esta característica hace que sea un material altamente interesante para su uso como reemplazo parcial o total del cemento. Sin embargo, la escoria de alto horno debe cumplir algunos criterios para poder utilizarse como cementante como: debe ser granulada y contener entre un 85% y un 95% de fase vítrea. Su estructura debe ser altamente desorganizada para garantizar una alta propiedad hidráulica. La relación entre el contenido de $\text{CaO} + \text{MgO}$ y SiO_2 debe ser superior a 1 para que la escoria sea básica y

presente un mayor potencial hidráulico. Se ha observado que el contenido de cal afecta este proceso, aunque la escoria ácida también puede activarse. La superficie específica de la escoria desempeña un papel crucial en la intensidad y la velocidad de su activación, por lo que se requiere que tenga una superficie específica de entre 400 y 600 m²/kg (25), (42), (26). Para potencializar sus propiedades se utiliza activación química donde se produce la ruptura de la red vítrea por iones OH⁻. Posteriormente con la disolución de estos componentes ocurre la precipitación en productos de reacción que son insolubles en agua y tiene características cementicias.

La composición química de la EAH puede variar considerablemente dependiendo de su procedencia. Sin embargo, para que este material pueda clasificarse como cementante, es necesario que su composición se mantenga dentro de ciertos intervalos: CaO (30-45%), SiO₂ (30-48%), Al₂O₃ (15-25%), Fe₂O₃ (0.5-2%) y otros óxidos presentes en menores proporciones (42).

El mecanismo de reacción de EAH es más complejo que el de los geopolímeros debido al alto contenido de CaO, por lo que se han realizado numerosas investigaciones para investigar el papel del Ca en el proceso de polimerización. El Ca tiene un efecto positivo en la resistencia de las uniones geopoliméricas y desempeña roles importantes en la definición de la ruta de reacción y las propiedades físicas de los productos del proceso de hidratación. Además, como ya se mencionó la formación de compuestos de Ca depende en gran medida de la relación Si/Al y del valor de pH.

1.3 Activador Alcalino

Para iniciar el proceso de activación alcalina, además de contar con una fuente de aluminosilicatos, es necesario disponer de un activador alcalino. Este agente alcalino facilita la disolución de los precursores de aluminosilicatos, y por lo general, esta disolución se ve favorecida por un aumento en la cuantía de la solución alcalina (27).

El sodio (Na) y el potasio (K), son los metales solubles (M) más comunes como activadores alcalinos. Estos activadores alcalinos se han categorizado en seis grupos diferentes, que incluyen: 1) álcalis cáusticos [MOH], 2) sales de ácido débil sin silicato [M₂CO₃, M₂SO₃, etc.], 3) silicatos [M₂O·nSiO₂], 4) aluminatos [M₂O·nAl₂O₃], 5)

aluminosilicatos [$M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$], y 6) sales de ácido fuerte sin silicato [M_2SO_4] (28), (29), (30).

Los activadores más comúnmente utilizados para la obtención de CAA son el hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio ($NaSi_2O_3$), o combinaciones de ellos. Estos activadores son los más fáciles de encontrar en el mercado siendo lo de más bajo costo.

Cuando las soluciones de hidróxidos presentan concentraciones elevadas, pueden generar problemas de corrosión debido a su naturaleza química. Por esta razón, la producción de grandes volúmenes de materiales hidrox-activados requiere el uso de equipos especializados. En consecuencia, suele preferirse la activación mediante silicatos o mediante una combinación de ambos compuestos, ya que esta alternativa resulta más segura para los usuarios y, además, favorece un incremento en la resistencia mecánica.

Se ha documentado que, manteniendo constante la concentración de hidróxido de sodio, un incremento en el contenido de silicato de sodio o en la relación SiO_2/Na_2O , hasta un valor determinado, favorece el aumento de la resistencia a compresión (31),(32). Asimismo, se ha observado que al aumentar la concentración de hidróxido de sodio en la solución dentro del intervalo de 4 a 14 mol/l, la resistencia a compresión de los CAA también tiende a incrementarse. Este comportamiento se debe a una mayor disolución de los aluminosilicatos y a una condensación más rápida de estas especies (31).

Por otro lado, se ha comprobado la efectividad del uso del silicato de sodio ($Na_2O \cdot nSiO_2$) en la activación de la escoria granulada de alto horno. La utilización de este agente químico se ha destacado por su eficacia, ya que conduce a un endurecimiento rápido y una resistencia a la compresión elevada. Además, este método se aplica también en otros materiales que contienen silicio y aluminio, como la ceniza volante y el metacaolín (32).

En el caso de nuestro trabajo se propone la utilización de un activador alcalino (Alkahidroxy) en estado líquido con pH 11-13.7 de base silicio que disuelto en agua no es tóxico, no es corrosivo y no irritante con el objetivo de mostrar la viabilidad de su utilización para su comercialización. Con proporciones bajas de este material se obtiene

rápidas resistencias, es de más bajo costo en comparación a los demás activadores y se consigue de manera más fácil.

Capítulo 2. ANTECEDENTES

2.1 Comparación del impacto ambiental uso de CAA y los sistemas basados en cemento Portland.

El concreto es el pilar de la construcción moderna y es el segundo producto más utilizado después del agua. La dependencia del uso CP como el aglutinante principal del concreto, se debe a la facilidad de manejo, el buen rendimiento (resistencia y durabilidad) y la abundancia de materias primas, además que es un material ya muy conocido (33). Sin embargo, se han disparados las alarmas en cuanto a las implicaciones ambientales en su producción esto por los grandes volúmenes de emisiones de CO₂ que implica su obtención.

Según datos se fabrican alrededor de 4 mil millones de toneladas de cemento Portland cada año (34) y en la producción de 1 ton de CP se libera aproximadamente 1 ton de CO₂ a la atmósfera (35), (36). La mayor parte de las emisiones de carbono durante la producción de cemento se deben a la naturaleza química de este y a las altas temperaturas necesarias para su procesamiento (hasta 1450°C) (37). Más del 50% de las emisiones provienen de la quema del principal componente de la materia prima del cemento, la piedra caliza (CaCO₃), que se descompone en óxido de calcio (CaO) y (CO₂) (36). Esto implica que al sustituir el componente principal de la materia prima con un precursor que no contenga carbonato, las emisiones de CO₂ podrían reducirse de manera significativa.

Por otro lado, en la producción de acero durante la extracción del metal contenido en los minerales, se generan grandes cantidades de escorias metalúrgicas, lo que ha dado lugar a la formación de extensos depósitos de este subproducto industrial (38). Las industrias siderúrgicas a nivel mundial generaron en el año 2022 alrededor de 1,885 millones de toneladas de acero. Específicamente en México en el ese mismo año produjo 18.4

millones de toneladas de acero crudo ocupando el lugar 14 de la producción mundial. Se estima que, en los altos hornos modernos, se genera entre 0.25 y 0.30 ton de escoria por cada tonelada de crudo o arrabio, lo que equivale a aproximadamente entre 4.6 y 5.5 millones de toneladas de EAH únicamente en México (39). Por lo anterior la utilización de la escoria sería una buena opción como material, no se necesitan la quema de combustibles propiamente dicho, se aprovecharía el desecho de otra industria.

Por otro lado, en un contexto australiano, McLellan et. al., realizaron un examen del ciclo de vida para evaluar el impacto en carbono y los costos del concreto con CP convencional y del concreto activado alcalinamente procedentes de diversas fuentes (humo de sílice, metacaolín, gibbsita, ceniza volante y escoria granulada) (40). Se observó una gran variación en los costos ambientales y financieros calculados para el CAA, lo que podría ser perjudicial o beneficioso dependiendo de la ubicación de origen, la fuente de energía, las proporciones de la mezcla de concreto y el método de transporte. Algunas mezclas de CAA registraron una reducción del 44 al 64% en las emisiones de CO₂, mientras que el costo fue entre un 7% más bajo y un 39% más alto en comparación con el CP. Además, se realizaron afirmaciones por parte de fabricantes de CAA en Australia, donde se afirma que el uso de su CAA reduce la huella de carbono del CP en un 80% o incluso en un 10-20% en comparación con el CP (41). Otros estudios también llegaron a conclusiones similares, demostrando una reducción significativa en las emisiones de CO₂ del CAA en comparación con el PCC, que variaba entre el 55% y el 75%, dependiendo del activador alcalino utilizado (25), (42).

2.2 Composición química

Según los estudios los materiales cementicios más utilizados para la activación alcalina son la ceniza volante tipo F, humo de sílice, metacaolín y la escoria granulada de alto horno. La *Figura 2* muestra un diagrama ternario donde estos se ubican en correspondencia de los óxidos metálico de interés. Donde se observa en el caso de la escoria la presencia de altos valores de Ca característica esta típica que ya se ha mencionado anteriormente, así como de sílice SiO₂ y alúmina Al₂O₃. La composición química de la escoria granulada de alto horno depende del proceso de producción de

acero aplicado y del tipo de acero. Además, para que la escoria granulada de alto horno sea adecuada como alternativa al cemento, debe estar granulada, tener una estructura amorfa, mientras mayor contenido de Ca y una relación de $MgO/SiO_2 > 1$.

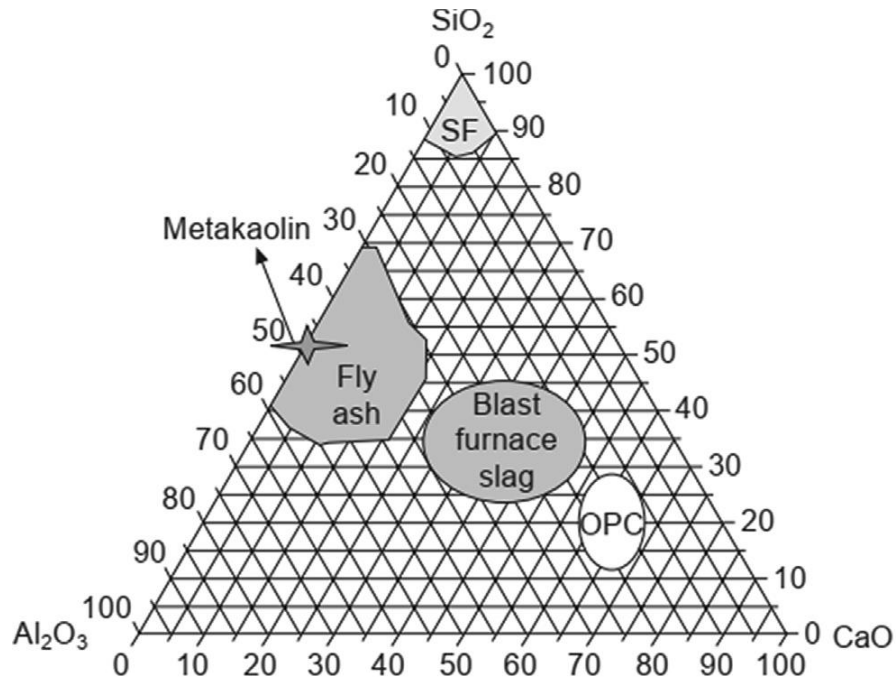


Fig. 2 Diagrama ternario de los cementantes más utilizados para activación alcalina (25)

2.2.1 Mecanismos de reacción.

Para los CAA, se ha propuesto un mecanismo general de reacción que implica la ruptura de enlaces Si-O-Si y Al-O-Si cuando aumenta el pH de la solución alcalina. Este mecanismo también se aplica a los geopolímeros, que son considerados un subconjunto de CAA, con una mayor concentración de Al y una menor de Ca, y con una fase de unión predominantemente de aluminosilicatos con estructuras muy bien definidas de cadenas (43). El proceso de geopolimerización se desarrolla a través de distintas etapas, las cuales se ilustran en la *Figura 3*. De manera general, este proceso incluye: a) la disolución de los precursores de aluminosilicatos, b) la reorganización y difusión de los iones disueltos junto con la formación de núcleos y pequeñas estructuras aglomeradas, c) la policondensación y generación de fases de gel de aluminosilicato, y finalmente, d) la transición hacia un estado sólido acompañado del endurecimiento del material (44).

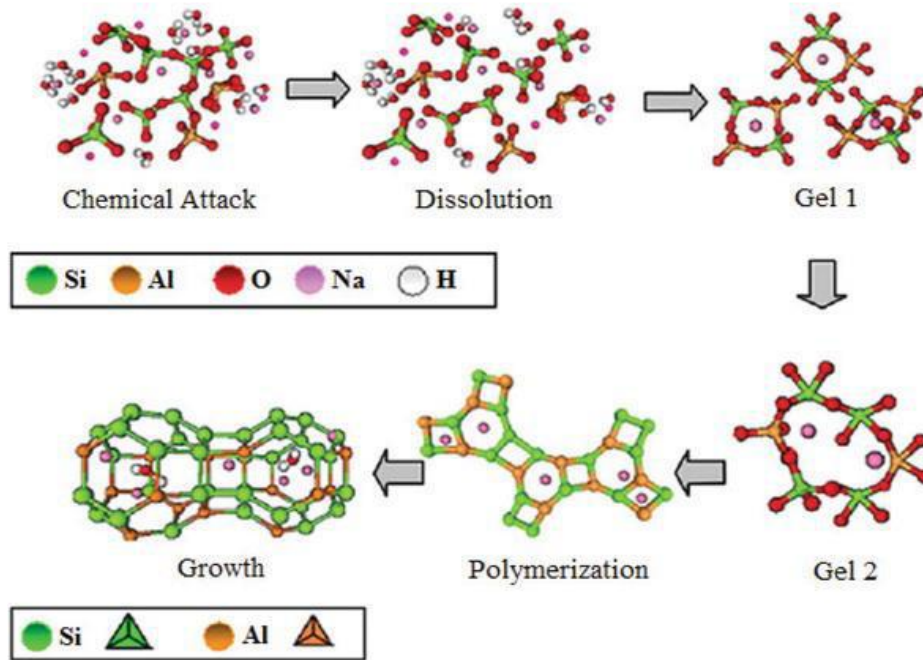


Fig. 3 Mecanismo de reacción simplificada de geopolímeros (45)

Para los sistemas con alto contenido de Ca, como es el caso de EAH el mecanismo de reacción es más complejo que el de los geopolímeros debido al alto contenido de CaO, por lo que se han realizado muchas investigaciones para investigar el papel del Ca en el proceso de polimerización (46). El Ca tiene un efecto positivo en la resistencia de las uniones geo-poliméricas y desempeña un papel importante en la definición del camino de reacción y las propiedades físicas en los productos del proceso de hidratación.

La escoria está compuesta por $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, quienes forman las fases de con akermanita, gehlenita y vidrio de aluminosilicato de calcio depolimerizado. Los cationes de Si^{4+} y Al^{3+} forman la red vítrea clave, mientras que Ca^{2+} y Mg^{2+} actúan como modificadores para la red con la presencia de los medios alcalinos (47). En la Figura. 4 aparece el mecanismo de reacción de la EAH. En un primer momento ocurre la disolución de los monómeros y las especies iónicas, en una segunda fase ocurre reorganización de las especies formándose donde el Ca liberado al entrar en contacto con los activadores alcalinos, formará un enlace con Si y H_2O y tenderá a formar el gel C-S-H, luego en una etapa posterior con el aumento del Ph de la disolución se liberara el Al el cual formará

enlaces con el C-S-H para formar el gel tipo C-(A)-S-H y al final se libera el Si presente en la escoria para incorporarse a los enlaces que ya existen (48), (49), (50).

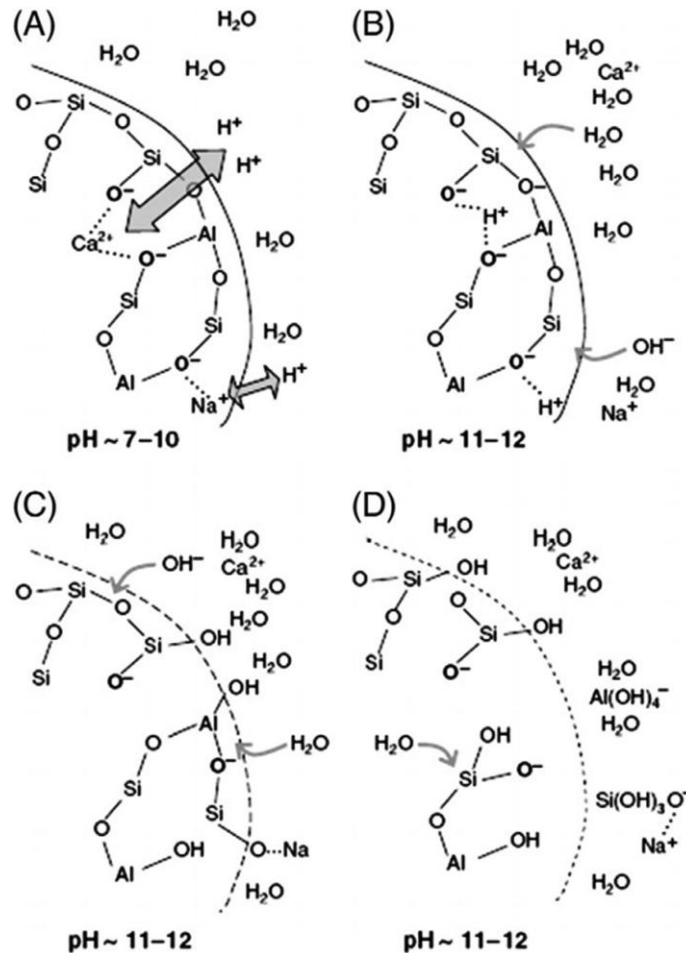


Fig. 4 Proceso de disolución: (A) intercambio de H^+ por Ca^{2+} y Na^+ , (B) hidrólisis de enlaces Al-O-Si, (C) destrucción de la red despolimerizada y (D) liberación de Si y Al (46).

2.2.2 Variables que Influyen en la Reactividad de los Aluminosilicatos

Se han desarrollado numerosas especificaciones para describir la reactividad de la escoria granulada de alto horno que puede ser utilizada como reemplazo parcial o total del CP. Según ASTM C989 la resistencia del cemento combinado (escoria + cemento) se comparó con la del CP (51). Se midió la resistencia de los morteros de escoria que se mezclaron con solución de NaOH. Se estimó la actividad de la escoria granulada de alto

horno determinando la resistencia a la compresión tanto del mortero de CP como del mortero correspondiente hecho con la escoria granulada de alto horno y CP en la misma proporción. El índice de actividad de la escoria se puede calcular de la siguiente manera (52):

$$\text{Índice de actividad EAH} = \frac{SP}{P} \times 100 \quad (\text{EC. 1})$$

Los factores que determinan el grado de actividad y en consecuencia el progreso de la resistencia mecánica a compresión de los cementantes ricos en aluminosilicatos, en este caso la escoria son: el grado de amorficidad, la composición química y el área superficial.

2.2.2.1 Composición química

La escoria granulada de alto horno a una mayor basicidad ($\text{CaO/SiO}_2 > 1$) presenta una actividad hidráulica mayor en presencia de activantes alcalinos. Se ha observado que la reactividad aumenta con el incremento en los contenidos de CaO, Al_2O_3 y MgO y disminuye con el incremento de SiO_2 .

Se han propuesto algunos índices de actividad de la escoria granulada de alto horno teniendo en cuenta su composición química esto se obtuvo en relación a un estudio realizado a un conjunto de morteros de escoria y sus resultados de resistencias (13).

$$I_h = \frac{\text{CaO} + 1.4\text{MgO} + 0.56\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad (\text{EC.2})$$

Tabla 1. Calidad de la escoria (13)

I_h	Calidad esperada en la escoria
<1.65	Inaceptable
1.65-1.85	Normal
1.85-2.10	Superior

2.2.2.2 Área superficial

En general el incremento en el área superficial incrementa la reactividad, mejora la resistencia mecánica y reduce el tiempo de fraguado se ha reportado que el rango óptimo

es 4200- 4500 cm²/g (53), sin embargo, este también estará determinado por aspectos económicos asociados al costo de la molienda y no solo por las propiedades mecánicas del cemento obtenido. Es necesario señalar que con el incremento de la finura se aumenta la demanda de líquido activador y una disminución de los tiempos de fraguado.

2.2.2.2 Contenido de fase amorfa.

Este es el parámetro más vital y crítico en la influencia de las propiedades hidráulicas de la EAH. El incremento en el contenido de fases cristalinas reduce la reactividad, y aunque una estructura vítrea es esencial, esta no garantiza una alta reactividad, lo cual sugiere que la composición química es también importante para la reactividad de la EAH.

Asimismo, durante su proceso de producción, la escoria debe atravesar un enfriamiento controlado que favorezca la formación de una estructura mayormente vítrea, la cual presenta reactividad en medios alcalinos (54), confiriéndole a las escorias un comportamiento de material hidráulico latente.

2.2.3 Productos de hidratación

Los productos de hidratación de escoria activada alcalinamente están influenciados por las composiciones de la EAH, el tipo de solución alcalina y el valor de pH. El gel de C-S-H es el producto básico de la hidratación además Wang y Karen Scrivener observaron la presencia de fases de AFm (monosulfato de aluminato de calcio) con el activador NaOH (55).

Por otro lado, con la combinación de diferentes soluciones de NaOH y Na₂O.nSiO₂ en un estudio en pastas con EAH utilizando la técnica de análisis de difracción de rayos X (DRX) Puertas F, Fernández-Jiménez A, Blanco-Varela MT. observaron en los compuestos activados con NaOH el gel C-S-H, carbonato de calcio (CaCO₃) y hidrotalcita (Mg₆Al₂CO₃(OH)₁₆.4H₂O) (56). En el caso de los activados por Na₂O.nSiO₂ no fue fácil encontrar la presencia de C-S-H y no se observó la hidrotalcita. Por otro lado, la velocidad de la reacción depende del valor del pH solución alcalina inicial, y que el pH debe ser superior a 11.5 para una mejor activación de la EAH (57).

Varios investigadores identifican la hidrotalcita como cristales diminutos combinados con el gel de CSH (57). La hidrotalcita comienza a formarse aproximadamente en 6 horas con NaOH y aproximadamente en 12 horas con agua de vidrio cuando la EAH contiene Mg y Al (57), (58).

En otro caso se dedujo un entorno con baja alcalinidad que el CSH cristalino no es un producto o no es el producto principal formado como resultado del proceso de activación alcalina. No obstante, en condiciones de alta alcalinidad (NaOH >7.5 M), la fase predominante es el gel C-A-S-H con pequeñas precipitaciones de Ca. Si al principio no hay una cantidad significativa de calcio reactivo, no se observa la formación de ambas fases (59).

2.3 Características y propiedades de Cementos de Escoria Activada.

Los hormigones y cementos activados con escoria exhiben atributos altamente atractivos, lo que les confiere ventajas en su aplicación en entornos particulares donde el concreto convencional no logra un desempeño óptimo. Algunas de ellas es:

- ✓ Alta durabilidad química, resistencia al ataque de agentes químicos corrosivos como ácidos fuertes (incluyendo lluvia ácida) y sulfatos.
- ✓ Cementantes con capacidades de aislamiento térmico más eficientes en comparación con los materiales de construcción convencionales disponibles actualmente en el mercado.
- ✓ Cementos con resistencia al fuego a temperaturas mayores de 800 °C.
- ✓ Altas resistencias mecánicas.
- ✓ Materiales más impermeables.
- ✓ Excelente desempeño a los ciclos de hielo y deshielo.
- ✓ Más económicos y solidarios con el medio ambiente.

2.3.1 Resistencia a la compresión

El comportamiento mecánico de los materiales, como el concreto, se evalúa principalmente a través de su resistencia a la compresión (RC), la cual se considera una herramienta valiosa para prever otras propiedades del material. La RC del cemento y hormigón activados con escoria se ve afectada por varios parámetros, como el tipo y la finura de la EAH, el tipo y la cantidad de activador alcalino, la relación líquido-sólido, el método de mezcla y el régimen de curado (60).

Es sabido que los concretos con escoria activada desarrolla altos valores de RC, mostrando desempeño para clasificarse como Concretos de Alto Comportamiento ya que logran resistencias de 60 MPa a los 90 días (61).

La molaridad de los activadores tiene una influencia directa en la RC del concreto de escoria activada esto producto del aumento de la alcalinidad del sistema lo que conduce a un aumento en la ruptura de los enlaces de Ca-O, Al-O y Si-O en la escoria de alto horno granulada, aumentando así la formación de productos de hidratación (62). Guohao Fang et al. informaron que el aumento en la molaridad de la solución de NaOH de 10 M a 12 M aumentó la RC de concreto de escoria activada en alrededor del 23%. Además, este incremento en la molaridad de la solución de NaOH tuvo un efecto significativo en RC. Donde en los tres niveles de molaridad de solución de NaOH que se fijaron (10, 12 y 14 M), y la RC después de 28 días fue de 56.70, 60.55 y 62.70 MPa, respectivamente.

Otro factor que influencia los valores de RC en concretos de escoria activada es la proporción de Na_2SiO_3 : NaOH, la causa fundamental porque aumenta la presencia de aniones de Na_2SiO_3 que reaccionan con Ca^{2+} que se disuelven en la superficie de los granes de las EAH lo que favorece a la formación del gel C-S-H (63). En estudio la proporción de Na_2SiO_3 : NaOH fueron (1.75:1, 2.50:1 y 3.25:1) donde se obtuvieron resultados de RC después de 28 días de 56.01, 60.45 and 63.49 MPa respectivamente.

F. Puertas et al. estudiaron también la influencia de dos métodos de mezclado con dos mezclas, una base CP y otra base escoria activada, observaron que el procedimiento de mezclado afectó de forma más significativa las propiedades en estado fresco de ambos concretos que la RC. Sin embargo, al aumentar el tiempo de mezclado en la mezcla de

concreto con escoria activada se observó una mejoría en las propiedades en estado fresco y un aumento en la RC (64).

En otro análisis se las condiciones de curado potenciaron el desarrollo de RC donde en condiciones de curado con calor se generaron mayores valores que las curadas al ambiente. Sin embargo, esto es hasta un punto porque al aumentar demasiado la temperatura provocó que las RC disminuyeran producto de la evaporación del agua causando un efecto negativo ya que pausó la formación de C-S-H (65).

Por otro lado, la relación líquido/sólido (l/s) si afecta la RC, a menores valores l/s se obtienen mayores valores de RC específicamente de la relación l/s de 0.4 a 0.35 aumentó la RC. Además, la cantidad de activador alcalino tuvo una influencia significativa en el desarrollo de la RC a una edad temprana (<14 días), mientras que la influencia se volvió menos significativa en la RC a una edad más avanzada (28 días) (66). Estos resultados coinciden con los hallazgos de Aliabdo et al., quienes informaron que aumentar la relación de l/s de 0.40 a 0.50 disminuye la RC de el concreto de escoria activada de 58.78 a 49.52 MPa después de 7 días y de 64.95 a 55.58 MPa después de 28 días (67).

2.3.2 Retracción en CAA

La retracción es un fenómeno natural causado por diferentes factores, y puede tener impacto en la durabilidad y el comportamiento del concreto. En general, la retracción del concreto proviene mayoritariamente de la retracción de la matriz de la pasta debido a la alta estabilidad dimensional de los agregados. La contracción plástica ocurre instantáneamente cuando la mezcla se vierte en un molde y se deriva de la evaporación del líquido (70).

Los principales mecanismos que conducen a la retracción de los materiales se pueden clasificar en las siguientes categorías: la tensión capilar, la pérdida de agua entre capas, la presión de separación y la energía superficial. Estos factores también afectan a los sistemas activados alcalinamente, pero se presentan de forma distinta pues los mecanismos de reacción son diferentes. En estos materiales es notablemente mayor en comparación al Cemento Portland Ordinario, esta diferencia se puede atribuir a la diferencia del tamaño de poro y a los productos de reacción de la matriz de la pasta (5).

Algunos mecanismos que pueden explicar la variación volumétrica de los CAA es la teoría de la presión capilar que se fundamenta en un conjunto extenso de resultados experimentales relacionados con la contracción química(68),(69) y la disminución de la humedad relativa (HR) (70). La lógica subyacente en esta teoría es admisible. Similar al CP hidratado, el material activado con álcali es poroso, con su estructura sólida que se endurece gradualmente después del moldeado, y el líquido presente en los espacios intersticiales se consume parcialmente. Este proceso conduce a la autodesecación debido a la reducción del volumen absoluto de todo el sistema, es decir, la contracción química, y a la hidrofiliidad de las paredes de los poros (71). Los meniscos, cuyos diámetros disminuyen gradualmente, generan tensiones de tracción que buscan reducir la distancia entre las superficies sólidas. La contracción en masa resultante es conocida como contracción autógena. Desde esta perspectiva, es lógico inferir que en los sistemas CAA también se origina una presión capilar.

Otro grupo de científicos de la Universidad de Pensilvania en 2016 informaron que la contracción de los sistemas compuestos activados con álcali dependía en gran medida de la humedad relativa (HR). En una HR alta, la reorganización y el reordenamiento de los geles C-A-S-H hacen que los compuestos activados muestren características viscoplásticas/viscoelásticas (72).

La inserción estructural de iones de metales alcalinos (Na) en los geles C-A-S-H también reduce la disposición regular de las capas de C-A-S-H, lo que permite que el gel C-A-S-H sea más susceptible a colapsarse y redistribuirse en los procesos de secado(65),(66),(67). La deformación que varía con el tiempo o por fluencia bajo fuerza interna juega un papel más significativo que la deformación elástica en la contracción autógena total de la pasta CAA.

De los mecanismos de contracción discutidos anteriormente, se concluye que el núcleo de la reducción de la contracción para sistemas activados con álcali depende del ajuste de los componentes estructurales de los productos de reacción y la optimización de la distribución del tamaño de poro.

2.3.2.1 Contracción autógena.

En general, la parte de la contracción que no incluye ningún cambio de volumen ocasionado por pérdida o entrada de sustancias, variación de temperatura y la aplicación de una fuerza y restricción externas puede considerarse como contracción autógena. Por lo tanto, también se conoce como contracción por autodesecación (65).

La contracción autógena es la reducción del volumen a edades tempranas cuando el cemento se hidrata, cuando no hay la humedad adecuada para llevar a cabo la reacción de hidratación se produce una hinchazón del cemento. La extracción de agua de los vertidos capilares para la reacción de hidratación conduce a la desecación del concreto.

2.3.2.1 Contracción química.

Contracción química se refiere al cambio de volumen durante las primeras edades de hidratación resultante de la formación de productos de hidratación con menor volumen en comparación con el volumen de los reactivos iniciales (líquido y cementante) durante el proceso de endurecimiento (65).

La contracción autógena va acompañada de la retracción química, ambas ocurren en los primeros momentos de endurecimiento del hormigón fresco; y ocurre por el proceso de hidratación del cementante. En la Figura 5 se establece las variaciones de volumen en una pasta durante el proceso de fraguado y la relación entre la retracción autógena y la retracción química.

Estudios experimentales indican que para una relación de $l/s = 0.4$ constante, valor más utilizado en la literatura, la influencia del Na_2O y el módulo del activador de silicato de sodio sobre la contracción autógena de la pasta de sistemas activados con álcali se observa una correlación entre el contenido de Na_2O y la contracción autógena cuando el módulo oscila entre 0,5 y 1,5 (73). Este hallazgo es razonable, ya que un mayor contenido de Na_2O suele indicar una mayor alcalinidad disponible en la solución de los poros, lo cual es beneficioso para la disolución de la escoria y la formación de productos de reacción. La velocidad de reacción es más rápida con una estructura de poros más densa, lo que indica una mayor retracción (74).

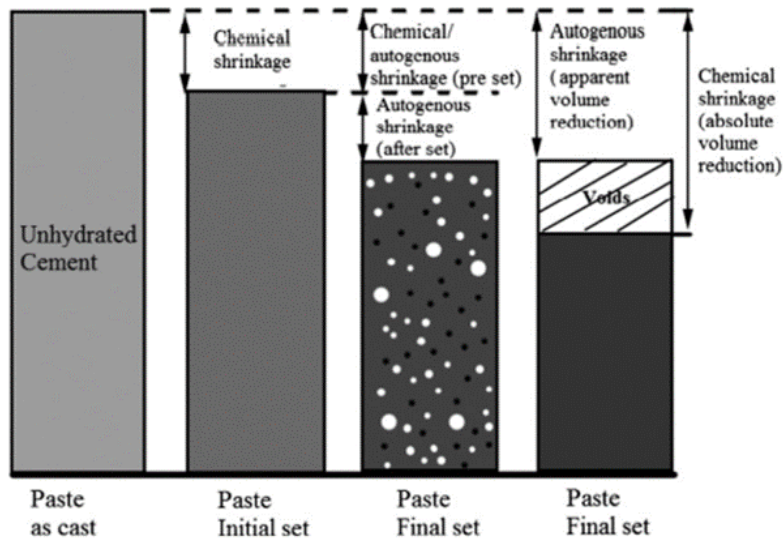


Fig. 5 -Relación de la retracción autógena y retracción química (67)

2.3.2.1 Contracción por secado.

La contracción por secado es causada por la evaporación interna del agua de la matriz debido a la baja humedad ambiental externa de los materiales a base de cemento (67).

Se produce en la superficie del concreto en estado fresco debido a la evaporación de la superficie o por absorción del hormigón (exudación). Este proceso es muy rápido y se produce en las primeras horas del vertido del concreto. La contracción en la capa superficial impide el movimiento de las partes internas y conduce al desarrollo de tensiones de tracción en el concreto fresco. Cuando estas tensiones de tracción son mayores que la resistencia a la tracción del concreto fresco, aparecen grietas plásticas.

El valor de la retracción por secado medido por el método tradicional contiene parte de la retracción autógena, sin embargo, no es una simple superposición, ya que la condición de secado tiene un efecto grave en la hidratación del cemento. La adición de materiales cementicios suplementarios como en cementos híbridos puede tener diferentes efectos sobre la contracción por secado y la contracción autógena en función de su reactividad e influencia en la hidratación (68).

Capítulo 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se hace una reseña de la metodología y experimentación que se llevaron a cabo para la elaboración de pastas, morteros y concretos con escoria granulada de alto horno. El estudio se centró en un sistema de cementante activado alcalinamente donde se analizó la compatibilidad de la escoria granulada de alto horno con el activador alcalino “Alkahidroxy” en diferentes concentraciones. La evaluación del rendimiento de los materiales se realizó a través de ensayos de resistencia, fluidez en pastas y morteros en cubos de 50X50 mm. Una vez obtenidos los resultados deseados en esta primera etapa se fijó una relación l/s para elaborar concretos con tres mezclas principales una de referencia (agua-CP), otra de (EAH-Alkahidroxy) y cementante híbrido con (EAH-CPC40 y una dilución de Alkahidroxy) estos últimos se realizaron ensayos de resistencia, ensayos de durabilidad y variaciones volumétricas.

3.1 Materiales

3.1.1 Escoria de Alto Horno

Como precursor para el CAA fue utilizado una escoria granulada de alto horno proveniente de una planta en Michoacán. Como características físicas presenta color blanco y granulada. Para utilizarse como cementante, primero se realizó un proceso de molienda para llevarlo a un estado físico de polvo. La composición química de la escoria se llevó a cabo mediante técnicas de espectroscopía de fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X, esta última empleada para identificar las fases cristalinas presentes. La caracterización física se ejecutó mediante pruebas de densidad evaluadas por medio del matraz Le Chatelier de acuerdo con método estándar ASTM C188 y distribución de tamaño de partícula.

3.1.2 Activador alcalino “Alkahidroxy”

El “Alkahidroxy” según datos del proveedor se presenta como un tipo de silicato de sodio modificado fue adquirido de la empresa de Texas en Estados Unidos. El material se caracteriza por presentar una composición de Na_2O al 15.64%, SiO_2 al 78.97%, relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 5.04$, porcentaje de sólidos del 35.33%, el H_2O al 64.67% y densidad de 1.26 g/cm^3 . Con valores de

pH altos de 12 el cual se corroboró mediante tirillas reactivas y un equipo de pH-metro como se muestra en la Figura 6.



Fig. 6 Métodos utilizados para corroborar el pH del activador.

3.1.3 Agregados grueso y fino

En el caso de los agregados se determinaron los valores de densidad y absorción según la norma ASTM C127, y ASTM 128. La norma ASTM C29 describe el procedimiento para estimar el peso volumétrico seco suelto para grava y arena; y el peso volumétrico varillado seco para la grava. La granulometría para la grava y arena fue realizada por medio de la norma ASTM C136. Para estimar la velocidad de absorción se utilizó el principio de Arquímedes. El empuje ejercido por el agua sobre el agregado depende de su volumen total, junto el aire retenido en sus poros. A medida que el aire contenido en dichos poros es desplazado por el agua, el peso sumergido de la muestra aumenta progresivamente. De esta manera, es posible relacionar la pérdida de aire —equivalente al agua absorbida— con el tiempo transcurrido, permitiendo así caracterizar la velocidad de absorción del material. Este análisis resulta necesario debido a que no se conoce con precisión la rapidez con la que los agregados absorben el agua ni la cantidad de esta que permanece libre. Por ello, se busca verificar que el agua no absorbida no afecte el incremento de la relación líquido/cementante.

3.2. Evaluación del efecto del activador alcalino en la resistencia a compresión de morteros manteniendo una relación l/s=0.5 con distintos porcentajes de dilución.

En la *Figura 7* se encuentra un esquema que representa el procedimiento para determinar el efecto del activador en la resistencia a compresión en morteros con arena estándar y determinar el porcentaje de dilución de la mezcla óptima. Para ello se realizaron diferentes porcentajes de dilución en agua común manteniendo una relación líquido/precursor 0.5 como un punto intermedio a considerar como punto de partida y tomarse como referencia a replicar en el resto de morteros para un total de 6 morteros. En este primer momento se realizó esta dilución para analizar el comportamiento del activador con la escoria en el desarrollo de la resistencia y analizar qué tan factible es degradación en agua. Desechándose los morteros E1, E2, E3 ya que no mostraron endurecimiento *Figura 9*. Sin embargo, en mayores concentraciones de activador 80% al 100% mostraron un buen desempeño comprobándose la influencia del agua en la disminución de las propiedades mecánicas.

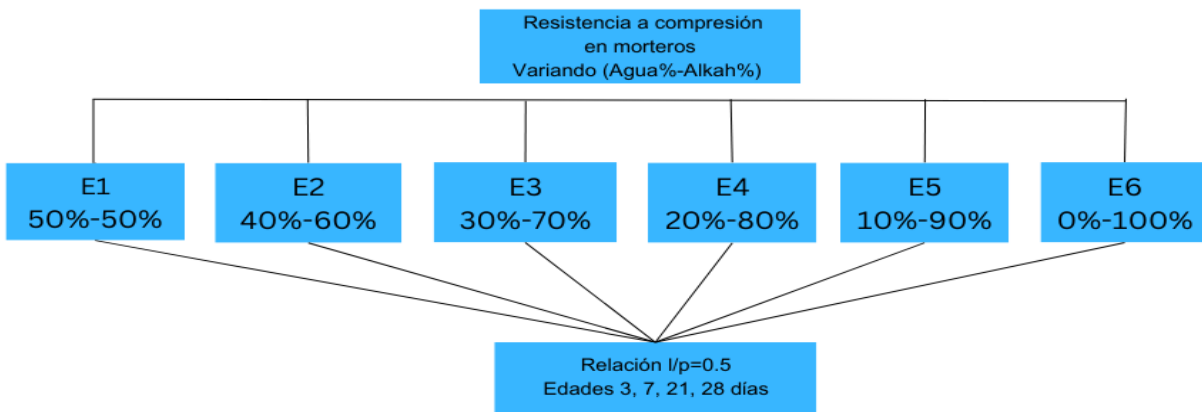


Fig. 7 Esquema representativo de los morteros.



Fig.8 Mezclado de mortero relación l/s=0.5 con arena estándar.



Fig. 9 Cubos de morteros E1, E2 y E3

3.3 Fluides

Se empleó una mesa de flujo conforme a las especificaciones establecidas en la ASTM-C-230. Como molde se utilizó un cono truncado con un diámetro interno de 70 mm en la base, 60 mm en la parte superior y una altura de 40 mm, de acuerdo con lo indicado en la ASTM-C-191.

El procedimiento consistió en colocar el molde en el centro de la mesa de flujo y llenar el cono con el mortero en dos capas. Cada capa fue compactada aproximadamente 20 veces hasta completar el llenado del molde. Posteriormente, se niveló la superficie con una regla y se limpiaron los bordes. Después, el cono se retiró lentamente mientras, de manera simultánea, se raspaban sus paredes con una espátula para evitar que el material quedara adherido.

A continuación, la mesa se dejó caer 25 veces en un periodo de 15 segundos. Finalmente, se determinó el incremento del diámetro de los morteros mediante la suma de cuatro mediciones tomadas sobre las líneas marcadas, tal como se muestra en la Figura 9.



Fig. 10 Medición de fluidez en la mesa de flujo para mortero con arena estándar

3.4 Puntos de Saturación

Al observar el comportamiento de la fluidez en la mesa de flujo se determinó utilizar tres aditivos 3 aditivos reductores de agua y analizar el efecto de compatibilidad con la escoria activada. En la Tabla 2 se observa los tipos de aditivos, su densidad, contenido de agua.

Tabla 2. Propiedades de los aditivos.

Aditivos	Densidad (g/cm ³)	Contenido de agua (%)
Naftaleno EUCON 1037	1.21	58.07
Policarboxilato FLOWCON P-01	1.1	49.98
Melamina Dfy 23-31	1.2	71.83

La prueba consiste en colocar un volumen de pasta en un cono ya estandarizado hasta el nivel marcado en el cono (Cono de Marsh) y se mide el tiempo que tarda en bajar todo el volumen de pasta como se muestra en la Figura 10, este proceso se va repitiendo a medida que se va aumentando la cantidad de aditivo lo que va generando una serie de puntos de para formar una gráfica de tiempo VS concentración de aditivo por Kg de escoria y determinar el punto máximo de concentración hasta donde el aditivo actúa de forma favorable.



Fig. 11 Cono de Marsh para determinar los puntos de saturación.

3.5 Elaboración de morteros con arena N° 4

Luego de realizado estos procedimientos anteriormente descritos, fue el aditivo de Naftaleno el que mejor desempeño tuvo en aumentar la fluidez de la pasta, pero su comportamiento no fue el óptimo porque se necesitaron grandes concentraciones de este para alcanzar una fluidez objetivo de $110\pm 5\%$ llegándose a necesitar la cantidad de 31.2 g de aditivo por Kg de escoria de ahí se decidió como otra opción no utilizar los aumentar el contenido de alkahidroxy hasta llegar a la fluidez de $110\pm 5\%$.



Fig. 12 Medición de fluidez en la mesa de flujo para mortero con arena N°4

3.6 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los cúbicos se evaluó a los 3, 7 y 28 días de edad. Los ensayos se realizaron utilizando una máquina universal INSTRON modelo 600 DX, con una velocidad de aplicación de carga de 50 kg/s. Se obtuvo a partir del ensayo de al menos tres especímenes correspondientes a cada mezcla. En la Figura 13 se muestra el desarrollo del ensayo sobre uno de los especímenes.



Fig. 13 Ensayo de resistencia a compresión.

3.7 Diseño de mezcla.

Luego de realizar los ensayos de resistencia compresión en morteros y fijada una relación de $l/s = 0.65$, se realizaron las correcciones por humedad por los agregados y se elaboraron las mezclas de concreto, en este caso se propuso la realización de 3 mezclas, estas deben cumplir con un revenimiento (Rev) de 15 ± 2 cm este procedimiento se realizó según la ASTM C-143 como se muestra en la Figura 13.

- I. Mezcla de referencia MR.
- II. Mezcla EAH- Alkahidroxy MEA.
- III. Mezcla con un cementante híbrido de 80% de EAH, 20% de CPC 40% y %Alkahidroxy MCH.

Procedimiento de mezclado se estableció.

1. Colocar los agregados y 1/3 del líquido esto para que los agregados absorban parte del agua y no afecte al agua de rección del cementante y revolver por 1 min,
2. Agregar el cementante y el resto del agua y revolver durante un tiempo de mezclado de 3 min.
3. Luego 1 min de reposo.
4. Finalmente, un remezclado de 2 min.



a)



b)

Fig. 14 Determinación de revenimiento a) MR: Rev =17cm b) MEA: Rev =13cm

En cuanto a la mezcla III (MCH) aún no se ha logrado el revenimiento objetivo para obtener la mezcla con el revenimiento deseado se repitieron varias veces la dosificación de la mezcla (Figura 14). La Tabla 3 expone un resumen de la relación de % de dilución de Alkahidroxy y los valores de revenimiento.

Tabla 3. Relación de % de dilución de Alkahidroxy y los valores de revenimiento.

% de dilución de alkahidroxy de la mezcla con relación l/s=0.65.	Valores de revenimiento en (cm)
a) 80 % Alkahidroxy y 20 % de Agua	No ocurrió un desplazamiento
b) 70% de Alkahidroxy y 30 % de Agua	20cm
c) 60% de Alkahidroxy y 40% de Agua	22 cm



a)

b)

Fig. 15 Determinación de revenimiento MCH a) Rev = 0 cm b) Rev =22 cm

3.8 Ensayes de resistencia a compresión en Concretos

La resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos fue determinada a las edades de 3, 7, 28 y 56 días (Figura 16). Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal INSTRON modelo 600 DX. Se determinó la resistencia a compresión por medio del ensaye de al menos tres especímenes de cada mezcla.



Fig. 16 Especímenes de cilindros

3.9 Determinación de la Resistividad Eléctrica Superficial (RES) en cilindros.

Las mediciones de la RES se determinaron a través de dos métodos con sus respectivas normas. Para ello se fabricaron las probetas saturadas y se midieron la RES a edades de 1, 7, 28 y 56 días. Las condiciones de humedad y temperatura fueron controladas al realiza el ensayo (Figura 17) por estos métodos.

- a) Método de Wenner o de 4 puntos.
- b) Método directo o de Bulk



a)

b)

Figura 17. Mediciones de RES. a) Método de Wenner b) Método de Bulk.

3.10 Carbonatación.

Para la determinación de la penetración de CO_2 , el procedimiento se realizó a través de la norma UNE-EN 13295 de carbonatación en el concreto con las dimensiones que ahí se especifican por cada mezcla se elaboraron 3 especímenes. Estas barras se sometieron a un tiempo de curado por 28 días, luego se pintaron en sus extremos con una resina epóxica especial para evitar la penetración en esa dirección en la Figura 18 se observa este procedimiento. Para luego colocarse en una cámara de CO_2 con una concentración del 4%. Luego se realizaron cortes a cada una de ellas con un mínimo de 15 mm de espesor a edades de 3, 7, 14 y 28 días cada que se hace el tiene que espolvorear cada corte con una solución del indicador fenolftaleína, este es el que indica la penetración de la carbonatación dejando de forma incolora toda esa zona (Figura 19).



Figura 18 Preparación de las barras para someterla al proceso de carbonatación



Fig. 19 Procedimiento para determinar la penetración de CO₂

3.11 Retracción por Secado.

Para la medición de la retracción por secado se confeccionaron barras de 75 mm de lado y 285 mm de longitud, las cuales en cada extremo tienen un tornillo el cual va adherido al concreto que es quien permite medir las variaciones de longitud como se muestra en la Figura 19. Por cada mezcla se elaboraron 3 especímenes los cuales primeramente se mantuvieron curando por 28 días. Para luego ser llevadas a un cuarto de secado con condiciones de humedad y temperatura controlada. Se reportarán los resultados a las edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días.



Fig. 20 Medición de la Retracción por secado

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de los materiales

4.1.1 Escoria Granulada de Alto Horno

Para el caso de la escoria de Alto Horno se realizó la caracterización obteniendo los siguientes resultados.

La densidad para el polvo de escoria granulada se determinó por el Método ASTM C188, el resultado se muestra en la *tabla 4*. Se comprobó que este valor se encuentra dentro del rango de valores reportados en literatura.

Tabla 4. Densidad de Escoria Granulada

Muestra	Densidad (g/cm ³)
Escoria Granulada	2.88

Composición química (FRX).

La *tabla 5* muestra la composición química por porcentaje en masa de las fases mineralógicas que fueron determinadas por fluorescencia de rayos X (FRX) de la escoria granulada. Se comprueba que muestra altos valores de CaO y la presencia de SiO₂, Al₂O₃ y MgO. Estos óxidos son los de mayor importancia en el progreso de las propiedades mecánicas en la activación de la escoria.

Tabla 5. Composición química de la Escoria Granulada

Contenido %							
Escoria Granulada	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Otros
	44.37	31.64	9.02	0.963	2.83	8.37	2.81

La EAH fue analizada mediante difracción de rayos X (DRX) con el propósito de encontrar las fases cristalinas. En el difractograma se observa el halo amorfo característico de este tipo de puzolanas, localizado entre los ángulos de 20° a 40° 2θ, lo que indica que se trata

de un material mayormente vítreo y con potencial para reaccionar con activadores alcalinos y generar productos de hidratación.

Asimismo, se realizó la caracterización por DRX de la escoria, encontrándose que presenta una naturaleza predominantemente amorfa. También se identificaron algunas fases cristalinas en menor proporción, entre ellas Akermanita (A) ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Gehlenita (G) ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Merwinita (M) ($\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$) y Hematita (H) ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

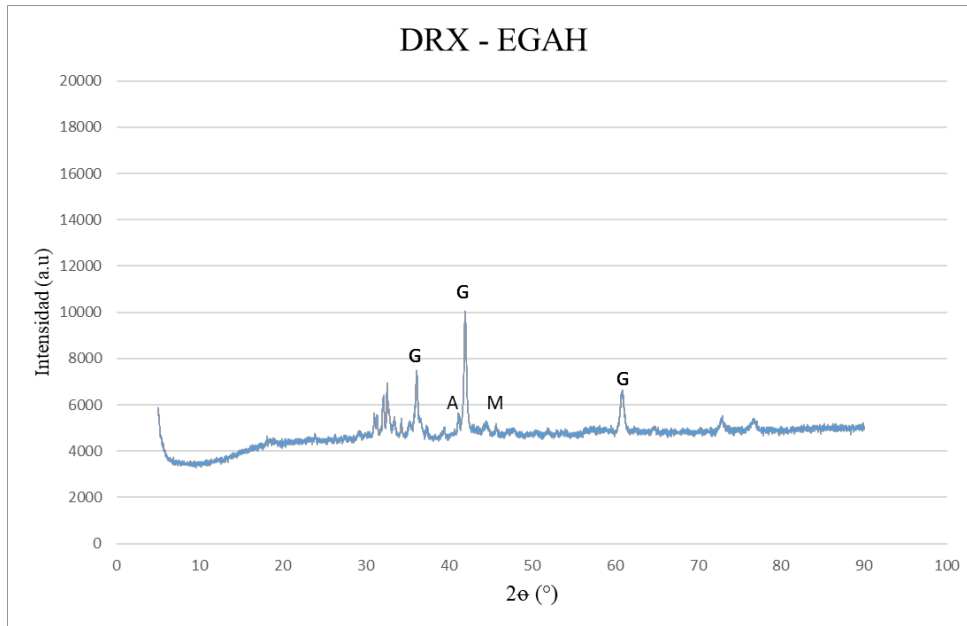


Fig.21 Análisis de DRX de la escoria.

Tamaño de partícula DTP.

Se obtuvo un tamaño de partícula promedio de 29.72 μm , encontrándose dentro del rango repostado en la literatura para la activación alcalina(Figura 22).

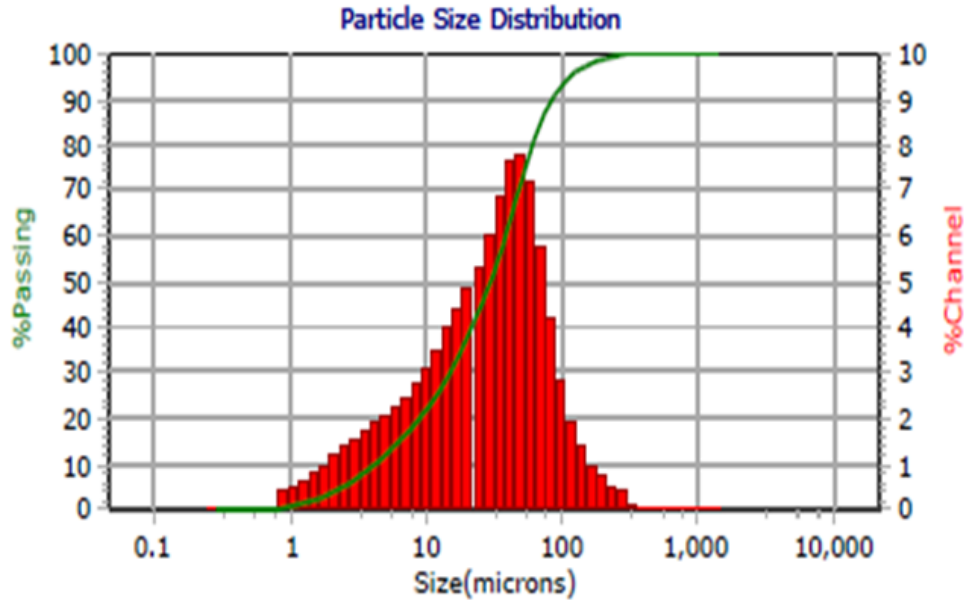


Fig. 22 Distribución del tamaño de partícula, Escoria Granulada.

4.1.2 Activador Alcalino (Alkahidroxy)

Densidad

La *tabla 6* muestra la densidad del activador alcalino determinada por el método ASTM D3230 y el contenido de sólido.

Tabla 6. Densidad de Alkahidroxy y contenido de sólido.

Muestra	Densidad (g/cm ³)	Contenido de agua (%)
Alkahidroxy	1.26	64.67

Valores de pH.

La *tabla 7* muestra el valor de pH del activador. Se realizó a través de dos métodos por las tiras indicadoras del pH y a través de un Peachimetro, donde se corroboró el dato del valor 12 ya indicado por el fabricante, según las referencias bibliográficas este es un valor aceptable que generalmente se utiliza para activar la escoria.

Tabla 7. Valor de pH

Muestra	pH
Alkahidroxy	12

Composición química (FRX).

La *tabla 8* muestra la composición química por porcentaje en masa de las fases mineralógicas que fueron determinadas por fluorescencia de rayos X (FRX) del Alkahidroxy. Aquí se Comprueba que efectivamente se encuentra en altos valores los compuestos de SiO₂ y Na₂O responsables estos de generar los enlaces de los geles tipo C-S-H y C-A-S-H.

Tabla 8. Composición química de Alkahidroxy.

Contenido %							
Alkahidroxy	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	Otros
	15.64	78.97	0.57	0.53	1.09	2.25	0.95

4.1.3 Agregados

Propiedades físicas.

La *tabla 9* se muestra las propiedades de los agregados que se determinaron de acuerdo con las normas y procedimientos explicados en el apartado 8.1.3.

Tabla 9. Propiedades físicas de los agregados

Propiedades físicas	Arena #4	Grava
Densidad (g/cm ³)	2.64	2.41
Absorción (%)	1.69	0.66
PVSS (Kg/cm ³)	1610	1422
PVVS (Kg/cm ³)		1510
MF	3.15	
TMA		19 mm

4.2 Influencia en la RC la dilución en agua del activador Alkahidroxy.

En la evaluación de la utilización de la dilución de Alkahidroxy en diferentes porcentajes se determinó desde un 80% al 100% con una relación l/s=0.5 mostraron el mejor desempeño en el proceso de activación de la escoria. En la *tabla 10 aparecen* el conjunto de morteros con arena estándar.

Tabla 10. Serie de Morteros.

Clave de la Serie de Morteros	Porcentaje (Agua%-Alkah%)
E1	50%-50%
E2	40%-60%
E3	30%-70%
E4	20%-80%
E5	10%-90%
E6	0%-100%

Luego de elaborados los morteros, las series E1, E2, E3, no desarrollaron resistencia a edades tempranas, al siguiente día de elaborados los cubos, se observó que no mostraban dureza, perdiendo su forma, por lo que se decidió no ensayar estas series comprobándose la teoría de la influencia negativa de las disoluciones en agua de los activadores causan un efecto adverso en la generación de propiedades mecánicas. La *Figura 23* muestra la curva de progreso de resistencia a compresión de las series E4, E5, E6. De aquí se decidió utilizar el Alkahidroxy en un 100 % ya que este fue el mortero que mayor desarrollo de resistencia alcanzo llegando a valores de 50 MPa. Sin embargo, en los análisis de la fluidez en mesa de flujo solo se alcanzó un 35 % siendo este un valor muy bajo.

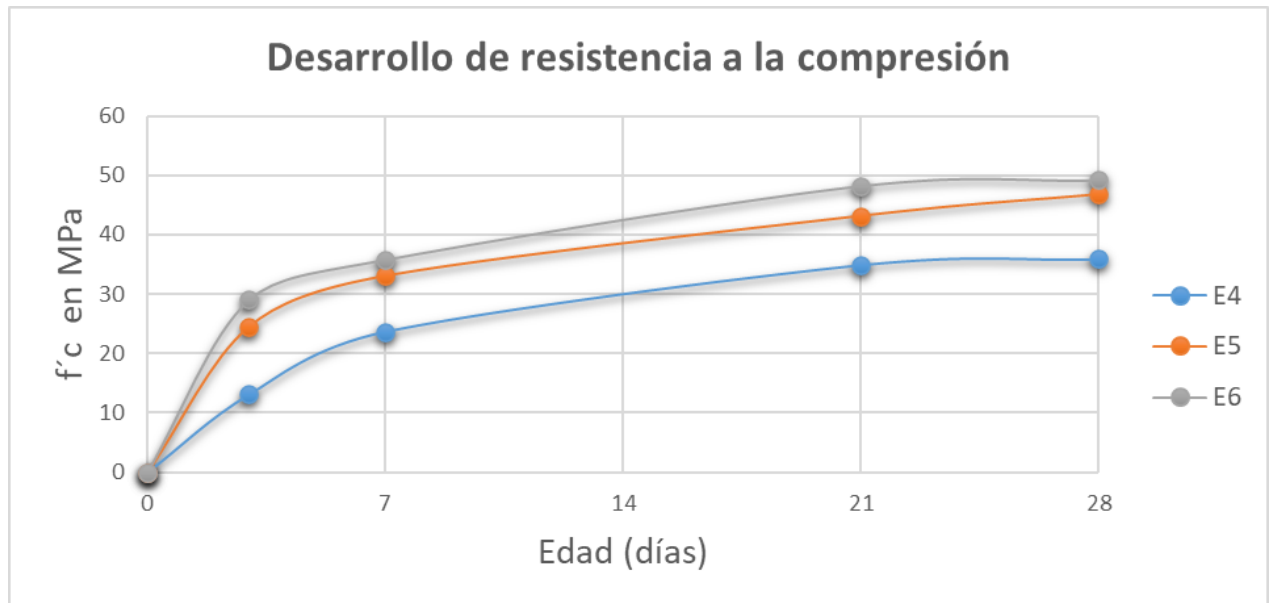


Figura 23. Curva de desarrollo de resistencia a compresión.

4.3 Puntos de Saturación

Producto a lo dicho en el anterior subíndice en cuando a los bajos valores de fluidez para darle solución a esto se realizaron puntos de saturación por el cono de Marsh esto para encontrar el aditivo compatible con la escoria activada con los 3 aditivos EUCON, FLOWCON y Melamina. Para ello se elaboraron pastas con relaciones l/s de 0.5, 0.4 y 0.3 a las cuales se fue aumentando la concentración del aditivo. El de mejor comportamiento en comparación a los demás el EUCON 1037, esto coincidió con datos reportados por Palomo et al. donde en su estudio de las fuerzas de repulsión de los aditivos en CAA el Naftaleno mostró un excelente desempeño (75). Figuras 24, 25 y 26. De esto se encontró una dosificación de aditivo de 31.2 g de EUCON 1037 por cada Kg de escoria.

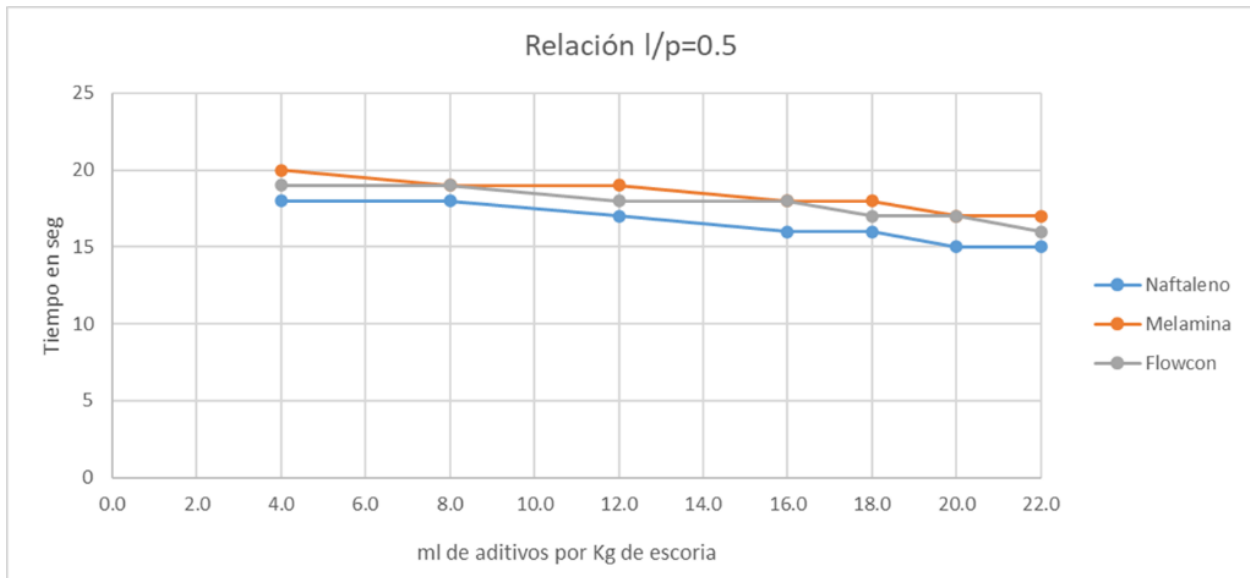


Figura 24. Puntos de saturación en pasta con relación l/s=0.5

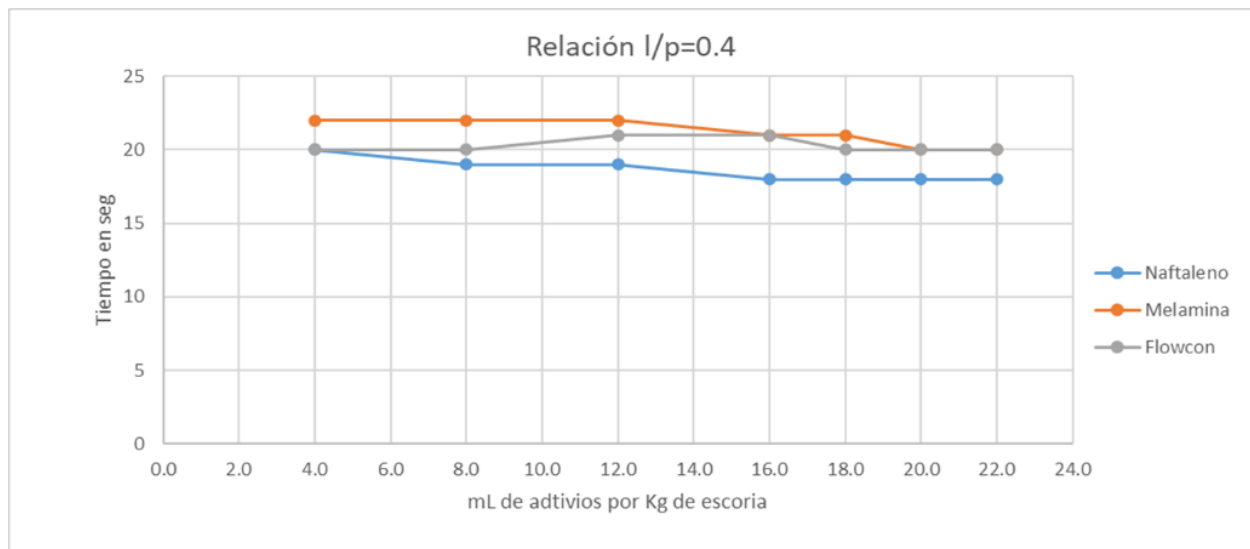


Figura 25. Puntos de saturación en pasta con relación l/s=0.4

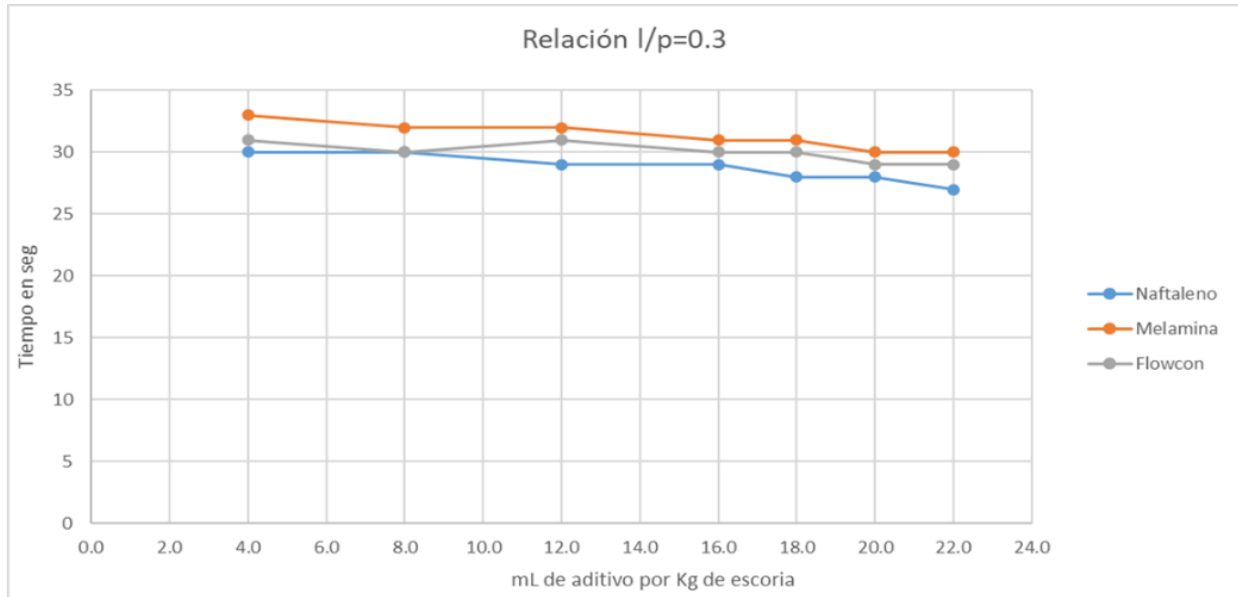


Figura 26. Puntos de saturación en pasta con relación l/s=0.3

4.4 Resistencia a la compresión en morteros con Arena N°4

Considerando que la cantidad de aditivo encontrada era muy alta, se decidió como otra opción más económica aumentar la cantidad de activador lo suficiente para lograr una fluidez en la mesa de flujo de 110 ± 5 %. Encontrándose que con una relación de l/s =0.63 se alcanzó una fluidez de 105%. En el desarrollo de la resistencia se observa que al aumentar la relación l/s aumenta también la resistencia mecánica. Al existir mayor cantidad de activador se potencia la nucleación de los geles C-S-H y C-A-S-H.

Llegado a este punto se elaboraron morteros en cubos de 50X50 mm con arena N°4 con tres tipos de morteros que se muestran en la tabla 10. Con relaciones l/s=0.5, 0.63 y 0.65. Una vez obtenidos estos valores se fijó una relación l/s= 0.65 a replicar en los concretos.

Tabla 10. Valores de resistencia en morteros con Arena N°4

	I/s=0.5	I/s=0.63	I/s=0.65
EUCON 1027	44g	0	0
Edades	f'c MPa		
3	30.5	29	29.75
7	33	41	42
28	46	55	54

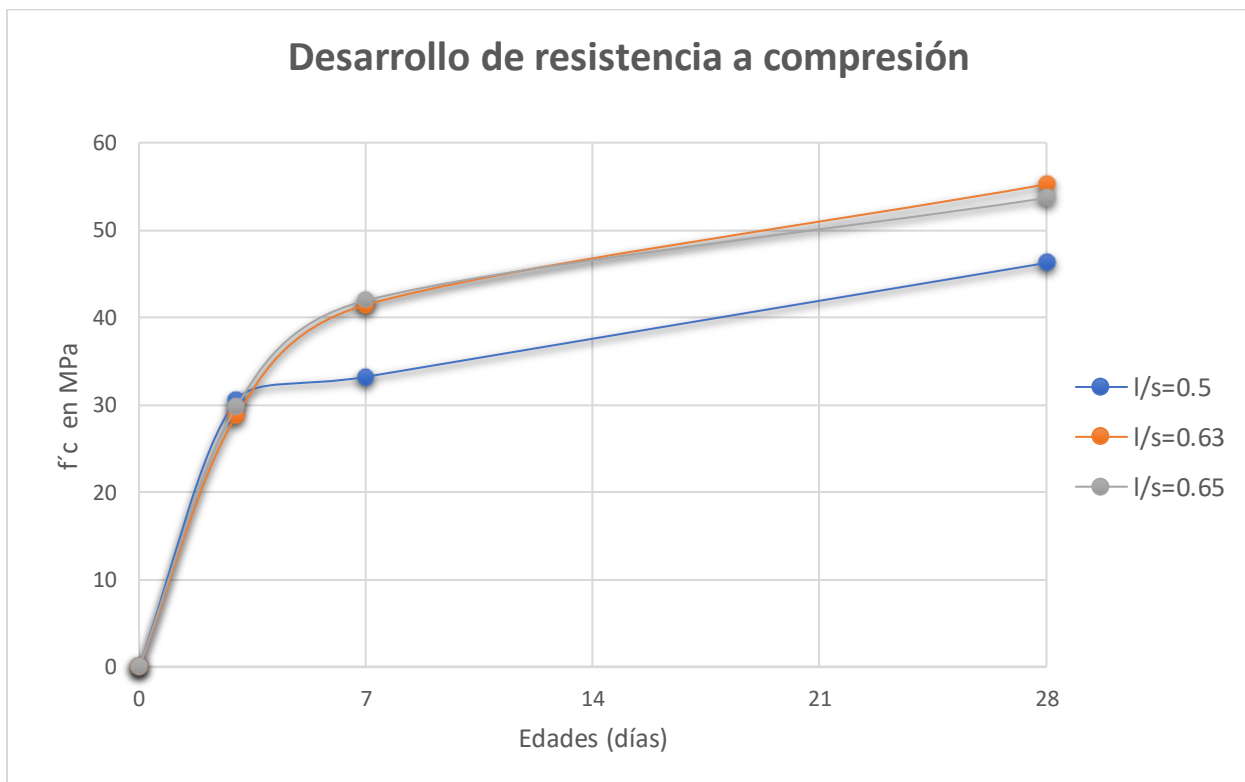


Fig. 27 Desarrollo de resistencia a compresión en morteros con Arena N°4

4.5 Resistencia a la compresión en con concretos con escoria activada.

La resistencia mecánica es un parámetro de alto interés cuando se habla de materiales de construcción, especialmente la resistencia a compresión. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta etapa de la investigación.

En la Figura 28 se observa el desarrollo de resistencia de la mezcla del concreto con escoria activada, lo que va en congruencia con lo ya reportado ya que sus procesos de endurecimiento ocurren a través de activación química facilita la formación de enlaces químicos más fuertes y una matriz de concreto más densa, lo que contribuye a una mayor resistencia mecánica. La activación alcalina promueve una mejor distribución de las partículas de la escoria y una reacción más completa entre los materiales, lo que conduce a una estructura de concreto más homogénea y resistente. Al formarse geles diferentes de aluminosilicatos estos tienen una mayor resistencia y estabilidad en comparación a los del cemento portland.

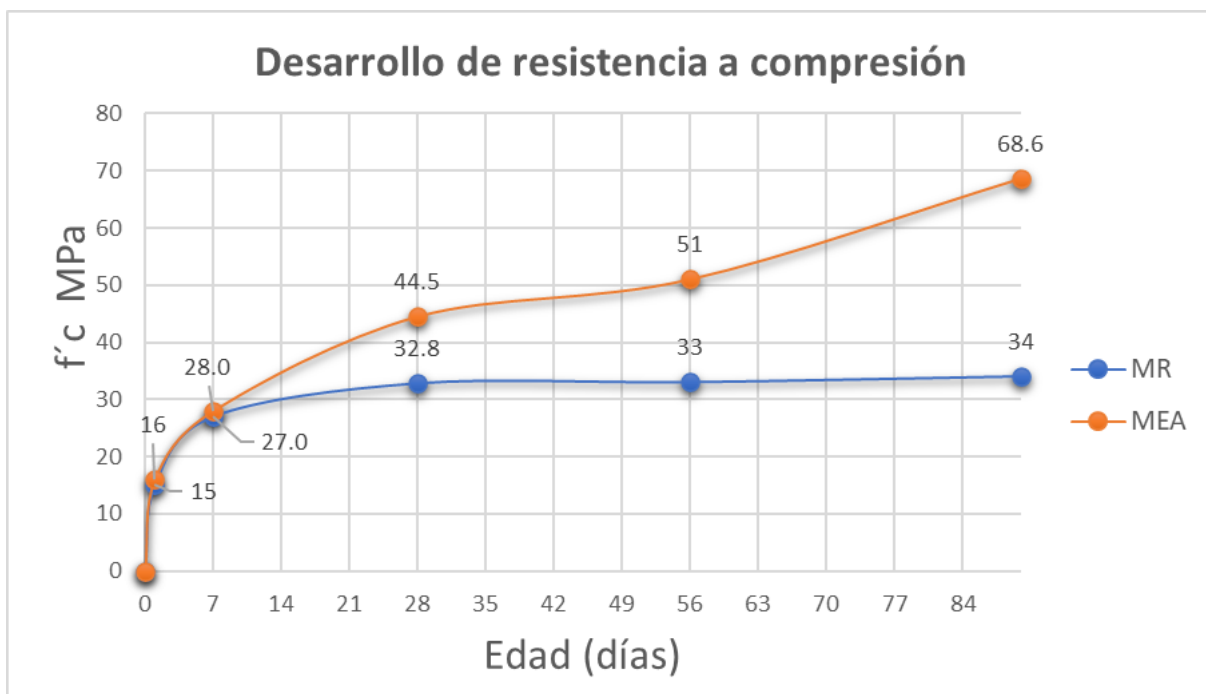


Fig. 28 Comparativa de desarrollo de resistencia a compresión entre un concreto de escoria activada y concreto base cemento portland.

4.6 Resistividad eléctrica superficial (RES).

La resistividad eléctrica superficial es uno de los parámetros que ha ganado cada vez mayor importancia en los estudios de durabilidad y que esclarece el comportamiento a largo plazo del concreto. Esta propiedad es importante en aplicaciones donde se necesita controlar la corrosión de refuerzos de acero incrustados en el concreto, como en estructuras de concreto armado, puentes, muelles marinos, entre otros. La resistividad eléctrica superficial del concreto está influenciada por varios factores, incluyendo la composición del concreto, la humedad. Controlar y mantener la resistividad eléctrica superficial adecuada en el concreto es crucial para garantizar la durabilidad y la integridad estructural a largo plazo de las obras construidas con este material.

En las figuras 29 y 30 se compararon los valores de RES en ambas mezclas. En este caso del concreto base CP muestra valores muy bajos y con el paso del tiempo crece de forma muy lento lo que no sucede en el caso del concreto base escoria activada donde se observa la ganancia de forma más pronunciada, esto porque el ser una matriz más homogénea, con baja porosidad, muestra una excelente opción al paso de la corriente eléctrica

Valores de resistividad eléctrica (KΩ.cm)		
Edades	MR	MEA
1	2.4	X
7	3.7	2.5
28	4.5	6.9
56	5.4	10.5
90	8.1	15

Fig. 29 Valores de RES por el método de Wenner

Valores de resistividad eléctrica (KΩ.cm)		
Edades	MR	MEA
1	15.43	X
7	18.1	8.4
28	31.7	40.4
56	57.7	76.2
90	73.3	96.6

Fig. 30 Valores de RES por Bulk o método directo.

4.7 Carbonatación.

Luego de realizar las pruebas de carbonatación acelerada el concreto base Escoria activada muestra un mejor comportamiento que el concreto base CP en edades tempranas. Algunas de las razones de este comportamiento son porque el Ca^{2+} que se encuentra dentro de la matriz se encuentra formando fuertes enlaces químicos por lo que no quedan libres dentro del sistema dificultando la formación de CaCO_3 . También al ser un sistema muy denso con estructuras definidas con baja porosidad impide la entrada de agentes externos. Mientras que en edades posteriores se observó que la mezcla de escoria activada presentó mayores valores de penetración.

Se obtuvieron los primeros resultados de carbonatación a la edad de 7,14, 21,28 y 56 días para MR y MEA Figura 31. Y para mejor comprensión visual de la comparativa de ambas mezclas la Figura 32.

Valores de Carbonatación (mm) en 4% de concentración		
Edades	MR	MEA
7	2.8	0
14	5.3	5.5
21	7.1	9.2
28	9.5	12.8
56	11	15

Fig. 31 Penetración de CO2



Fig. 32 Penetración de CO2 edad 7 días a) MR b) MEA

Capítulo 5. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos de la caracterización de la escoria de alto horno y el activador alcalino (Alkahidroxy) sugieren que ambos materiales poseen propiedades favorables para la producción de concreto activado alcalinamente. La densidad y composición química de la escoria granulada se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura, y su estructura amorfa, junto con la presencia de ciertas fases cristalinas, la hacen adecuada para la activación alcalina. Por otro lado, el Alkahidroxy presenta una densidad y pH adecuados, así como una composición química compatible con la formación de geles tipo C-S-H y C-A-S-H, esenciales para la resistencia mecánica del concreto.
2. La influencia de la dilución del Alkahidroxy en la resistencia a compresión del concreto revela que una dilución del 100% del activador proporciona el mejor rendimiento, aunque se debe considerar la fluidez del concreto en el proceso de diseño. Además, se encontró que el aditivo EUCON 1037 mejora significativamente la fluidez del concreto, lo que resulta en una dosificación óptima para mejorar las propiedades de flujo sin sacrificar la resistencia mecánica.
3. Los resultados de resistencia a compresión muestran que el concreto activado alcalinamente, en comparación con el concreto Portland convencional, exhibe un desarrollo de resistencia superior debido a su matriz más densa y a la formación de geles más resistentes. Esto sugiere que el concreto activado alcalinamente es una opción prometedora para aplicaciones de construcción que requieren altos niveles de resistencia mecánica y durabilidad.
4. Se observa que el concreto activado alcalinamente muestra una resistividad eléctrica superficial más alta en comparación con el concreto Portland, lo que indica una mayor capacidad para resistir la corrosión. Esto subraya aún más las ventajas potenciales del uso de concretos activados alcalinamente en estructuras sujetas a condiciones agresivas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Habert G, Miller SA, John VM, Provis JL, Favier A, Horvath A, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:11. 2020 Sep 22;1(11):559–73. doi:10.1038/s43017-020-0093-3
2. Megat Johari MA, Brooks JJ, Kabir S, Rivard P. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Constr Build Mater.* 2011 May 1;25(5):2639–48. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.12.013
3. Juenger MCG, Winnefeld F, Provis JL, Ideker JH. Advances in alternative cementitious binders. *Cem Concr Res.* 2011 Dec 1;41(12):1232–43. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.012
4. Zhang Z, Li L, Ma X, Wang H. Compositional, microstructural and mechanical properties of ambient condition cured alkali-activated cement. *Constr Build Mater.* 2016 Jun 15;113:237–45. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.043
5. Zhang B, Zhu H, Feng P, Zhang P. A review on shrinkage-reducing methods and mechanisms of alkali-activated/geopolymer systems: Effects of chemical additives. *Journal of Building Engineering.* 2022 May 15;49:104056. doi:10.1016/J.JOBE.2022.104056
6. Shi C, Jiménez AF, Palomo A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cem Concr Res.* 2011 Jul 1;41(7):750–63. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2011.03.016
7. Escalante-Garcia JI, Espinoza-Perez LJ, Gorokhovskiy A, Gomez-Zamorano LY. Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement. *Constr Build Mater.* 2009 Jul 1;23(7):2511–7. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.02.002

8. Bellmann F, Stark J. Activation of blast furnace slag by a new method. *Cem Concr Res.* 2009 Aug 1;39(8):644–50. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2009.05.012
9. Ministerio de Industria y Energfa. Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. RESIDUOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA MINERA DEL CARBÓN [Internet]. 1995 [cited 2024 May 7]. Available from:
https://books.google.com/books/about/Manual_de_reutilizaci%C3%B3n_de_residuos_de.html?hl=es&id=NO56Cgyf6uwC
10. Nanayakkara O, Gunasekara C, Sandanayake M, Law DW, Nguyen K, Xia J, et al. Alkali activated slag concrete incorporating recycled aggregate concrete: Long term performance and sustainability aspect. *Constr Build Mater.* 2021 Feb 15;271:121512. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121512
11. Ray T, Ranjan Mohanta N, Hitesh Kumar M, Saikrishna Macharyulu I, Samantaray S. Study of effect of temperature on behavior of alkali activated slag concrete. *Mater Today Proc.* 2021 Jan 1;43:1352–7. doi:10.1016/J.MATPR.2020.09.169
12. Curry KC. *Cement* 2018.
13. Daube J, Bakker R. Portland Blast-Furnace Slag Cement: A Review. ASTM special technical publications. 1986;5–14. doi:10.1520/STP36388S
14. Mastali M, Kinnunen P, Dalvand A, Mohammadi Firouz R, Illikainen M. Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Constr Build Mater.* 2018 Nov 30;190:533–50. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.125
15. Wang SD, Pu XC, Scrivener KL, Pratt PL. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. <https://doi.org/10.1680/adcr199572793>. 2015 May 14;7(27):93–102. doi:10.1680/ADCR.1995.7.27.93
16. Li Z, Chen L. Robustness of multipartite networks in face of random node failure. *Chaos Solitons Fractals.* 2019 Apr 1;121:149–59. doi:10.1016/J.CHAOS.2019.01.036

17. Li Z, Chen Y, Provis JL, Cizer Ö, Ye G. Autogenous shrinkage of alkali-activated slag: A critical review. *Cem Concr Res.* 2023 Oct 1;172:107244. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2023.107244
18. Arbi K, Nedeljković M, Zuo Y, Ye G. A Review on the Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Systems: Advances, Issues, and Perspectives. *Ind Eng Chem Res.* 2016 May 18;55(19):5439–53. doi:10.1021/ACS.IECR.6B00559/SUPPL_FILE/IE6B00559_SI_001.PDF
19. Wu H. Improving freeze-thaw resistance of alkali-activated slag by admixtures [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 29]. Available from: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ad790c9be-bc39-4244-814f-6cfc8dc06c14>
20. Bernal SA, de Gutierrez RM, Provis JL, Rose V. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cem Concr Res.* 2010 Jun 1;40(6):898–907. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2010.02.003
21. Davidovits J. The manufacture of geopolymer cements. *Geopolymer Chemistry and Applications.* 2015;537–68.
22. Provis JL, Van Deventer JSJ. Geopolymers : structure, processing, properties and industrial applications. 2009;454.
23. O'Connor J, Nguyen TBT, Honeyands T, Monaghan B, O'Dea D, Rinklebe J, et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. *J Hazard Mater.* 2021 Oct 5;419:126478. doi:10.1016/J.JHAZMAT.2021.126478 PubMed PMID: 34323725.
24. Escoria de alto horno – IspatGuru [Internet]. [cited 2024 May 10]. Available from: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-slag/>
25. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes - Google Libros [Internet]. [cited 2024 May 10]. Available from: <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=KXQmBAAQBAJ&oi=fnd&pg=>

PP1&ots=FJsw6kb8PW&sig=HgOgOgG3oeGobZj2QudoCA-
J6Yo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

26. Wang PZ, Trettin R, Rudert V. Effect of fineness and particle size distribution of granulated blast-furnace slag on the hydraulic reactivity in cement systems. <https://doi.org/10.1680/adcr2005174161>. 2015 May 5;17(4):161–6. doi:10.1680/ADCR.2005.17.4.161
27. Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ, Lukey GC. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*. 2002 Oct 28;89(1–3):63–73. doi:10.1016/S1385-8947(02)00025-6
28. Shi C, Roy D, Krivenko P. Alkali-Activated Cements and Concretes. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. 2003 Apr 2. doi:10.1201/9781482266900
29. Provis JL, Lukey GC, Van Deventer JSJ. Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. *Chemistry of Materials*. 2005 Jun 14;17(12):3075–85. doi:10.1021/CM050230I
30. Santana HA, Amorim Júnior NS, Ribeiro D V., Cilla MS, Dias CMR. Vegetable fibers behavior in geopolymers and alkali-activated cement based matrices: A review. *Journal of Building Engineering*. 2021 Dec 1;44:103291. doi:10.1016/J.JOBE.2021.103291
31. Rashad AM. Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer – An overview. *Constr Build Mater*. 2013 Apr 1;41:751–65. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.12.030
32. Krizan D, Zivanovic B. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali–slag cements. *Cem Concr Res*. 2002 Aug 1;32(8):1181–8. doi:10.1016/S0008-8846(01)00717-7
33. Emissions BZ. Zero carbon industry plan: rethinking cement. Rehabilitation of mining and resources projects as it relates to Commonwealth responsibilities

- Submission 86 - Attachment 1 [Internet]. Beyond Zero Emissions Inc.; 2017 [cited 2024 May 11]. 98 p. Available from: <http://bze.org.au>
34. Pavithra P, Srinivasula Reddy M, Dinakar P, Hanumantha Rao B, Satpathy BK, Mohanty AN. A mix design procedure for geopolymers concrete with fly ash. *J Clean Prod.* 2016 Oct 1;133:117–25. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2016.05.041
 35. Josa A, Aguado A, Heino A, Byars E, Cardim A. Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cem Concr Res.* 2004 Aug 1;34(8):1313–20. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2003.12.020
 36. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cem Concr Res.* 2004 Sep 1;34(9):1489–98. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2004.01.021
 37. Rehan R, Nehdi M. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environ Sci Policy.* 2005 Apr 1;8(2):105–14. doi:10.1016/J.ENVSCI.2004.12.006
 38. Ulubeyli GC, Artir R. Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of Some Construction Wastes. *Procedia Soc Behav Sci.* 2015 Jul 3;195:2191–8. doi:10.1016/J.SBSPRO.2015.06.297
 39. Anuario Estadístico de la Industria Siderúrgica Mexicana 2 ANUARIO ESTADÍSTICO DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA MEXICANA 2017-2022 PRESENTACIÓN.
 40. McLellan BC, Williams RP, Lay J, Van Riessen A, Corder GD. Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement. *J Clean Prod.* 2011 Jun 1;19(9–10):1080–90. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2011.02.010
 41. Low-carbon Concrete Life Cycle Analysis | Zeobond [Internet]. [cited 2024 May 11]. Available from: <http://www.zeobond.com/life-cycle-analysis.html>
 42. Yang KH, Song JK, Song K II. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. *J Clean Prod.* 2013 Jan 1;39:265–72. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2012.08.001

43. Habert G, D'Espinose De Lacaillerie JB, Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *J Clean Prod.* 2011 Jul 1;19(11):1229–38. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2011.03.012
44. Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ. Geopolymer technology: The current state of the art. *J Mater Sci.* 2007 May 19;42(9):2917–33. doi:10.1007/S10853-006-0637-Z/FIGURES/15
45. Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ. Geopolymer technology: The current state of the art. *J Mater Sci.* 2007 May;42(9):2917–33. doi:10.1007/S10853-006-0637-Z
46. Duxson P, Provis JL. Designing Precursors for Geopolymer Cements. *Journal of the American Ceramic Society.* 2008 Dec 1;91(12):3864–9. doi:10.1111/J.1551-2916.2008.02787.X
47. Li C, Sun H, Li L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. *Cem Concr Res.* 2010 Sep 1;40(9):1341–9. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2010.03.020
48. Xu H, Van Deventer JSJ. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Int J Miner Process.* 2000 Jun 1;59(3):247–66. doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5
49. Yip CK, Lukey GC, Provis JL, van Deventer JSJ. Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cem Concr Res.* 2008 Apr 1;38(4):554–64. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2007.11.001
50. Aziz IH, Abdullah MMAB, Mohd Salleh MAA, Azimi EA, Chaiprapa J, Sandu AV. Strength development of solely ground granulated blast furnace slag geopolymers. *Constr Build Mater.* 2020 Jul 30;250:118720. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118720
51. C311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete [Internet]. [cited 2024 May 12]. Available from: <https://www.astm.org/standards/c311>

52. C989 Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars [Internet]. [cited 2024 May 12]. Available from: <https://www.astm.org/c0989-06.html>
53. Steel slag grinding plant [Internet]. [cited 2024 May 12]. Available from: <https://www.chaeng.co/solutions/steel-slag-grinding-plant.html>
54. Montoya S. Citation [Internet]. 2023. doi:10.3390/buildings13071854
55. Wang SD, Scrivener KL. Hydration products of alkali activated slag cement. *Cem Concr Res.* 1995 Apr 1;25(3):561–71. doi:10.1016/0008-8846(95)00045-E
56. Puertas F, Fernández-Jiménez A, Blanco-Varela MT. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. *Cem Concr Res.* 2004 Jan 1;34(1):139–48. doi:10.1016/S0008-8846(03)00254-0
57. Wang SD, Scrivener KL, Pratt PL. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cem Concr Res.* 1994 Jan 1;24(6):1033–43. doi:10.1016/0008-8846(94)90026-4
58. Mozgawa W, Deja J. Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *J Mol Struct.* 2009 Apr 30;924–926(C):434–41. doi:10.1016/J.MOLSTRUC.2008.12.026
59. Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. *Ind Eng Chem Res.* 1999;38(10):3932–41. doi:10.1021/IE980804B
60. Alharbi YR, Abadel AA, Mayhoub OA, Kohail M. Effect of using available metakaoline and nano materials on the behavior of reactive powder concrete. *Constr Build Mater.* 2021 Feb 1;269:121344. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121344
61. Bernal SA, Mejía De Gutiérrez R, Pedraza AL, Provis JL, Rodriguez ED, Delvasto S. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cem Concr Res.* 2011 Jan 1;41(1):1–8. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2010.08.017

62. Ryu GS, Lee YB, Koh KT, Chung YS. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Constr Build Mater.* 2013 Oct 1;47:409–18. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.05.069
63. Huang X, Yu L, Li DW, Shiau YC, Li S, Liu KX. Preparation and properties of geopolymer from blast furnace slag. *Materials Research Innovations.* 2015 Dec 31;19:413–9. doi:10.1179/1432891715Z.0000000002210
64. Puertas F, González-Fonteboá B, González-Taboada I, Alonso MM, Torres-Carrasco M, Rojo G, et al. Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behaviour. *Cem Concr Compos.* 2018 Jan 1;85:22–31. doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.10.003
65. Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng YB. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cem Concr Res.* 1999 Oct 1;29(10):1619–25. doi:10.1016/S0008-8846(99)00143-X
66. Fang G, Ho WK, Tu W, Zhang M. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Constr Build Mater.* 2018 May 30;172:476–87. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.008
67. Aliabdo AA, Abd Elmoaty AEM, Emam MA. Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete. *Constr Build Mater.* 2019 Feb 10;197:339–55. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.086
68. Li Z, Nedeljkovic M, Zuo Y, Ye G. Autogenous shrinkage of alkali-activated slagfly ash pastes [Internet]. 2018 [cited 2023 Nov 29]. p. 369–72. Available from: <https://research.tudelft.nl/en/publications/autogenous-shrinkage-of-alkali-activated-slagfly-ash-pastes>
69. Thomas JJ, Allen AJ, Jennings HM. Density and water content of nanoscale solid C–S–H formed in alkali-activated slag (AAS) paste and implications for chemical shrinkage. *Cem Concr Res.* 2012 Feb 1;42(2):377–83. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2011.11.003

70. Hanjitsuwan S, Injorhor B, Phoo-ngernkham T, Damrongwiriyanupap N, Li LY, Sukontasukkul P, et al. Drying shrinkage, strength and microstructure of alkali-activated high-calcium fly ash using FGD-gypsum and dolomite as expansive additive. *Cem Concr Compos.* 2020 Nov 1;114:103760. doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103760
71. Qu ZY, Yu Q, Ji YD, Gauvin F, Voets IK. Mitigating shrinkage of alkali activated slag with biofilm. *Cem Concr Res.* 2020 Dec 1;138:106234. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2020.106234
72. Ye H, Radlińska A. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cem Concr Res.* 2016 Oct 1;88:126–35. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2016.07.001
73. Zuo Y, Nedeljković M, Ye G. Coupled thermodynamic modelling and experimental study of sodium hydroxide activated slag. *Constr Build Mater.* 2018 Nov 10;188:262–79. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.08.087
74. Sun B, Ye G, de Schutter G. A review: Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials. *Constr Build Mater.* 2022 Apr 4;326:126843. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126843
75. View of A review on alkaline activation: new analytical perspectives | *Materiales de Construcción* [Internet]. [cited 2024 May 12]. Available from: <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1492/1762>