

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Uso, características y aplicaciones del cemento de escoria activada por
alcalinos en estructuras de concreto**

Trabajo de graduación presentado por José Alejandro Matheu Sifontes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2022

Uso, características y aplicaciones del cemento de escoria activada por alcalinos en estructuras de concreto

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



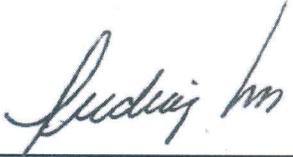
**Uso, características y aplicaciones del cemento de escoria activada por
alcalinos en estructuras de concreto**

Trabajo de graduación presentado por José Alejandro Matheu Sifontes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2022

Vo.Bo.:

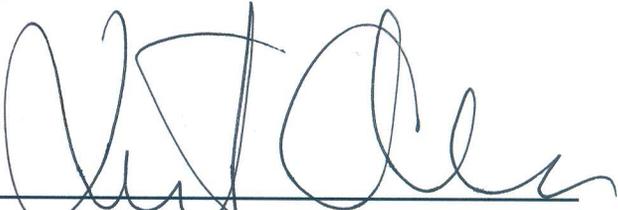
(f) 

Ing. Ludwing Benjamín López Manrique

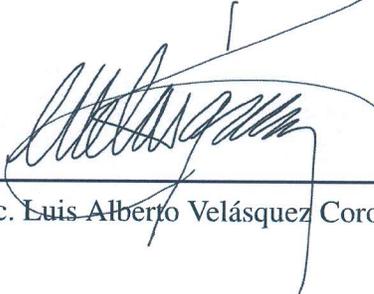
Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Ludwing Benjamín López Manrique

(f) 

Ing. Robert Godo Levensen

(f) 

Lic. Luis Alberto Velásquez Coronado

Fecha de aprobación: Guatemala, 29 de junio de 2022.

PREFACIO

El presente trabajo fue elaborado con el apoyo de Dios, de mi familia, de mis catedráticos en la Universidad del Valle de Guatemala y de mi asesor Ludwing Benjamín López Manrique, a pesar de las dificultades dadas por la pandemia del COVID-19, que causó muchos problemas tanto para la universidad como para el estudiante autor, provocando retrasos en la elaboración del trabajo. Por eso agradezco a mi familia, por tener paciencia, al catedrático Otoniel Alejandro Echeverria Castellanos, por todo su apoyo durante los tiempos difíciles, a Robert Godo Levensen, por permitir la elaboración de este trabajo como director del departamento de Ingeniería Civil de la universidad, a mi asesor Benjamín López, por apoyarme a lo largo de todo este proceso, a mis amigos cercanos, por escuchar todas mis quejas, a mi padre, que en paz descanse, por permitirme estudiar en esta Universidad que abrió paso a mi futuro, y a Dios, por guiarme durante todo el camino.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	IV
LISTA DE CUADROS	VII
LISTA DE GRÁFICOS	VIII
RESUMEN	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. OBJETIVOS	4
A Objetivo general	4
B Objetivos específicos	4
V. ALCANCE	5
VI. Marco teórico	6
A Cemento de uso general con puzolanas	6
1 Características químicas	6
2 Resistencia	6
3 Ventajas y desventajas	7
B Cemento de escoria activada por alcalinos	7
1 Procesos de producción, almacenamiento, transporte y fundición	7
2 Características químicas	9
3 Tipos de soluciones de activadores alcalinos	11
4 Características químicas y micro-estructurales a los 20 meses	12
5 Características físicas	13
VII. Requerimientos técnicos para el cemento de uso general	20
A Clasificación	20
B Propiedades químicas	21
C Propiedades físicas	21
VIII. Normativa	23
A Código NTG 41095	23
B Código ASTM C989/C989M	23
C Código ASTM C1073	23

IX. Ventajas y desventajas	24
A Contracción, velocidad de fraguado y trabajabilidad	24
1 Contracción autógena y por secado	24
2 Velocidad de fraguado	26
3 Trabajabilidad	27
4 Aditivos	27
B Durabilidad	28
C Permeabilidad	29
D Impacto ambiental	30
X. Características y diseño de mezclas	31
A Composición química del activador	31
1 Efecto del OH^-	31
2 Efecto de los silicatos	32
3 Efecto de los carbonatos	33
B Mezclas de varios tipos de cementos con cemento de escoria	33
1 Comportamiento hidráulico	33
2 Comportamiento mecánico	34
C Mezclas con cemento de escoria y un activador sólido	35
1 Activadores alcalinos	35
2 Aditivos	36
3 Mezclas con cemento Portland	37
XI. Otras aplicaciones	38
A Uso en reparación de estructuras de concreto expuestas a fluidos corrosivos	38
B Uso en estabilización de suelos	38
XII. Casos de uso en proyectos de construcción	40
A Embalse Akron Hazel	40
B Puente CSVT	40
C Edificio El Lumen	40
XIII. CONCLUSIONES	42
XIV. RECOMENDACIONES	44
XV. BIBLIOGRAFÍA	45
XVI. APÉNDICES	52
XVII. Glosario	55

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Rango de componentes químicos de cementos de escoria en los Estados Unidos y Canadá.	10
2	Parámetros y coeficientes de correlación de un análisis de regresión según la ecuación (17).	25
3	Parámetros y coeficientes de correlación de un análisis de regresión según la ecuación (18).	26
4	Concentración de Ciertos Elementos (en %) y las relaciones Ca/Si y Ca/Al de las mezclas de concreto producidas con las fórmulas A y C después de 20 meses. . . .	53

LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración	Página
1 Cotización de transporte marítimo de 1000 toneladas de escoria, desde el puerto Rizhao, China, hasta el puerto Everglades, Florida.	52
2 Cotización de transporte marítimo de 1000 toneladas de escoria, desde el puerto Everglades, Florida, hasta el Puerto Santo Tomás de Castilla, Guatemala	54

RESUMEN

En el siguiente trabajo profesional se cubre el tema de cementos alternativos avalados por el ACI, concentrándose en el cemento de escoria activada por alcalinos. Se explican las características físicas del concreto preparado con cemento de escoria activada, su comportamiento mecánico, así como sus características químicas y micro-estructura al utilizar diferentes tipos de activadores alcalinos, de acuerdo a investigaciones realizadas por diversos estudios científicos. Se explican las ventajas del uso de este tipo de cementos, según cada tipo de activador, así como los procesos industriales necesarios para procesar de este tipo de cemento y las posibles desventajas y problemáticas que se puedan experimentar durante estos procesos y durante su uso en estructuras. Se listan las normativas a cumplir en la implementación de este cemento en un proyecto en Guatemala, según las especificaciones de la Norma Técnica Guatemalteca, el ASTM y el ACI. Se presentan diferentes casos de uso en proyectos avalados por la Asociación de Cemento de Escoria (SCA) de los Estados Unidos, así como breves explicaciones del uso en la estabilización de suelos y en la reparación de estructuras.

I. INTRODUCCIÓN

Existe un gran número de tipos de cementos, con diferentes composiciones químicas, características mecánicas e impacto ambiental de acuerdo a sus procesos de producción. Entre los numerosos cementos alternativos existe el cemento de escoria activada por alcalinos, el cual será el enfoque de este trabajo de tesis. Ya que la escoria utilizada es un material de desecho industrial de la fundición de hierro, aprovecharlo como material cementante permite que las empresas dispongan de este material sin tener que desecharlo. Esto también sería de utilidad para las empresas que produzcan cemento o mezclas de concreto, ya que al utilizar escoria se puede evitar el trabajo y gasto energético en el procesamiento térmico con hornos que el cemento Portland requiere. En este trabajo de graduación se buscó encontrar otras características ventajosas que presente este cemento para hacerlo más atractivo al mercado guatemalteco.

Se presentaron resultados de múltiples estudios y casos demostrando las propiedades de las mezclas con cemento de escoria activada, mostrando las múltiples aplicaciones y características que pueden tener. Estos tipos de mezclas pueden incluir cemento de escoria con uno o más activadores alcalinos (estos incluyen el silicato de sodio, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, cal, cal hidratada, entre otras sustancias alcalinas), o bien pueden incluir cemento de escoria con cemento Portland, formando una mezcla binaria que no requiere de un activador alcalino.

Las mezclas activadas con silicato de sodio o hidróxido de sodio presentan un fraguado rápido y una alta contracción y agrietamiento, lo cual puede corregirse usando aditivos. Al activarse con carbonato de sodio, la mezcla tiene un tiempo de fraguado similar al Portland, mientras que desarrolla mayor resistencia a largo plazo. Las mezclas sin cemento Portland aún no son comunes en proyectos reales, pero existe un gran esfuerzo por desarrollar investigaciones y estudios en diferentes países del mundo, para determinar sus características y los efectos de diferentes activadores y aditivos en estas mezclas.

Las mezclas binarias con escoria y cemento Portland desarrollan una alta resistencia y una baja permeabilidad, mejorando la durabilidad y la protección del acero de refuerzo contra sustancias corrosivas. Estas mezclas son comúnmente utilizadas en puentes, carreteras y estructuras expuestas a sulfatos.

II. ANTECEDENTES

En el pasado el cemento de escoria activada por alcalinos ha sido sujeto a amplia investigación desde 1908, cuando esta tecnología fue patentada por primera vez en los Estados Unidos por [1]. Se utilizó extensamente en estructuras en la antigua Unión Soviética, así como en Escandinavia y se vendió como material para reparación de estructuras en Estados Unidos a mediados de los años 90. Este material ha recibido mayor atención en años recientes, tras ser sujeto a nuevos estudios y diversas aplicaciones en estructuras. En los Estados Unidos existe la “Slag Cement Association”, una asociación sin fines de lucro que representa a los productores y distribuidores de cemento de escoria en los Estados Unidos, para apoyar al uso de este cemento en mezclas de concreto. En la China, también existen normativas para el uso de cemento de escoria en estructuras, así como diversos estudios recientes que evalúan sus características. [2], [3]

III. JUSTIFICACIÓN

Los procesos de producción en la industria de la construcción son particularmente difíciles de modificar para reducir emisiones de gases invernadero, ya que los materiales producidos deben cumplir con todas las normativas pertinentes, las cuales se basan en el uso del cemento Portland tradicional. La producción de este tipo de cemento tiene emisiones de CO_2 inherentes a los procesos de calcinación necesarios. Según [4], al tomar en cuenta la extracción de minerales, la calcinación y el gasto energético, la producción de cemento suma un 7 % a 8 % de las emisiones globales de CO_2 ; ya que se atribuye un porcentaje tan significativo a la producción de un solo material, se ha realizado una gran variedad de investigaciones para mitigar estas emisiones.

Por estas razones se han desarrollado procesos para adaptar cementos alternativos que tienen emisiones menores de CO_2 en estructuras. Recientemente, el ACI autorizó el uso de estos cementos en el código ACI 318-19, en la sección 26.4.1.1, siempre que se cuente con información suficiente respecto a su comportamiento en las aplicaciones consideradas para un proyecto, lo cual incluye diferentes ensayos e información de casos de uso en otros proyectos similares. Esto ha abierto las puertas para que los cementos alternativos se implementen en Guatemala.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Describir información pertinente sobre el uso, requerimientos, beneficios y desventajas de sistemas de cemento de escoria de alto horno activada por alcalinos, como alternativa para el cemento Portland tradicional, como reemplazo parcial o total para este, en estructuras de concreto.

B. Objetivos específicos

- Identificar ensayos, pruebas de laboratorio y estudios realizados para el cemento de escoria activada, que demuestren sus características estructurales.
- Definir las ventajas y desventajas del uso de cemento de escoria activada en comparación con el cemento de uso general utilizado en Guatemala y con el cemento tipo I.
- Comparar el impacto ambiental de los diferentes sistemas de cemento de escoria activada por alcalinos y cemento de uso general, según diferentes indicadores.
- Describir los requerimientos técnicos, y ensayos necesarios para el diseño de estructuras de concreto que utilicen cemento de escoria activada por alcalinos, según las normativas pertinentes de la AGIES, el ACI y de la ASTM.
- Describir un conjunto de casos de uso del cemento de escoria activada en proyectos de construcción.

V. ALCANCE

En este trabajo de graduación se cubren las características mecánicas, químicas e hidráulicas de las mezclas que incluyen cementos de escoria de alto horno activada por alcalinos líquidos, proveniente de la fundición de hierro, concentrándose en las mezclas con cemento de escoria y un activador alcalino líquido, sin otros tipos de cementos. También se incluye información de mezclas binarias (con cemento de escoria y cemento Portland tradicional) y mezclas con activadores sólidos, pero no fueron el enfoque principal de este trabajo. No se tomaron en cuenta otros tipos de escoria provenientes de otros procesos industriales o de otros tipos de hornos, ya que estas escorias tienen una composición química distinta y por ende diferentes características mecánicas e hidráulicas, así como diferentes procesos de producción. Estas escorias también pueden generar resultados distintos al combinarse con los activadores y aditivos que se utilizan con la escoria de alto horno.

Además, se incluyó información sobre la normativa Norteamericana y Guatemalteca que cubre el uso de estos cementos, así como las diferencias en las características de las mezclas según el activador utilizado. Se cubrió principalmente el uso en estructuras de concreto y se incluyó información adicional sobre uso en reparación de estructuras y en estabilización de suelos, pero no fueron el enfoque de este trabajo.

Se incluyen casos de uso del cemento de escoria de alto horno en estructuras, en combinación con cemento Portland, ya que estas mezclas son las más comunes en proyectos reales. Las mezclas de cemento de escoria activada sin otros tipos de cemento se han utilizado principalmente en estudios donde se investigan sus características en combinación con diferentes activadores y aditivos, aún no son comunes en proyectos reales según la información de casos de uso en los Estados Unidos.

VI. Marco teórico

A. Cemento de uso general con puzolanas

Este es uno de los cementos comúnmente utilizados en Guatemala para mezclas de morteros y concreto en edificaciones. Es un cemento tipo Portland con adición de puzolanas naturales que califica como un cemento tipo I (de uso general) según el código ASTM 1157 y NTG 41095. De acuerdo a la clasificación del ACI, es un tipo de cemento alternativo, distinto al cemento portland ordinario. [4]-[7]

Las puzolanas son sustancias agregadas al cemento para mejorar las características mecánicas del material. Entre las ventajas de agregar este mineral están el aumento de la resistencia del concreto a lo largo del tiempo, un mayor tiempo de trabajabilidad, una reducción a la permeabilidad y al agrietamiento, además de un aumento a la resistencia a sulfatos y otras sustancias corrosivas. [8]

1. Características químicas

Las puzolanas son sustancias compuestas por minerales silíceos y aluminosos. Estos minerales reaccionan con la cal y agua para formar compuestos cementantes a temperaturas ordinarias, en adición al cemento portland, un compuesto cristalino. El producto principalmente responsable de la resistencia del cemento Portland es el silicato de calcio hidratado ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 8H_2O$) o $C-S-H$ (también llamado $C-(A)-S-H$) en su nomenclatura abreviada. [8], [9]

La composición típica del cemento portland se muestra a continuación [2]:

- Calcio (CaO), 65 por ciento de su masa.
- Sílice (SiO_2), 20 por ciento de su masa.
- Alúmina (Al_2O_3), 5 por ciento de su masa.
- Magnesia (MgO), 2 por ciento de su masa.

2. Resistencia

El cemento tipo I tiene una capacidad a compresión de 4060 psi a los 28 días como mínimo, aunque se fabrica para una capacidad mayor al utilizar un factor de seguridad, de forma que la resistencia es mayor al mínimo de 4060psi, para evitar que la capacidad esté por debajo de la mínima. El cemento debe cumplir con el código ASTM C1157 para cementos hidráulicos, así como el código Guatemalteco NTG 41095 (esta norma está basada en la ASTM C1157 e incluye los mismos requisitos). Además, al agregar las puzolanas se incrementa la resistencia de las mezclas de concreto. [8]

3. Ventajas y desventajas

Este tipo de cemento es útil para uso general en estructuras, además de presentar ciertas ventajas en comparación al cemento portland ordinario. El clinker del cemento tipo I tiene una menor entalpía de reacción que el ordinario, lo cual se traduce a menores requerimientos de calor para calcinar el clinker en hornos durante la producción a nivel industrial. Según un estudio que modeló el impacto ambiental de diferentes tipos de cemento, se encontró que el cemento tipo I tiene menores emisiones de gases invernadero y un menor impacto en otros indicadores medidos, de acuerdo a la infraestructura de producción industrial presente en California, así como las diferentes entalpías de reacción de cada tipo de cemento. [4]

Sin embargo, el uso de este cemento depende de la disponibilidad de puzolanas para su producción. Este mineral es poco abundante en algunas partes del mundo, por lo que la producción del cemento con puzolanas depende de la cercanía a un sitio de origen de puzolanas y será dependiente de la distancia de transporte requerida para llevar el material al sitio de producción del cemento. Esto, a su vez tendrá un efecto en el costo de producción y en el impacto ambiental generado por la quema de combustible durante el transporte. A mayor distancia de transporte requerida, mayor será este impacto. Por esta razón, el impacto medido en el estudio antes mencionado será diferente al impacto en sitios distintos a California, si las distancias de transporte son significativamente mayores a lo utilizado en el modelo del estudio. [4]

B. Cemento de escoria activada por alcalinos

Este material es parte del grupo de cementos llamados **geopolímeros**, es un **cemento alternativo** que es capaz de reemplazar completa o parcialmente al cemento portland tradicional, por lo que su composición química, sus procesos de producción, su comportamiento mecánico y su mecanismo de endurecimiento son distintos. Ya que la reacción que causa el endurecimiento es diferente al mecanismo hidráulico del cemento portland, el cemento de escoria activada no se incluye en la misma clasificación de cementos hidráulicos, aunque su reacción sí es latentemente hidráulica. Esto se explicará con más detalle en la sección 2. Este cemento requiere de una sustancia alcalina para acelerar la reacción hidráulica, ya que sin esta sustancia la reacción es mucho más lenta que la del cemento Portland. Por esta razón es común incluir un activador alcalino en la mezcla para aplicaciones de este cemento donde no se utiliza Portland y dependiendo del activador utilizado, así como su concentración y cantidad utilizada, se verán diferentes características en la mezcla. Cuando la mezcla incluye tanto cemento Portland como cemento de escoria, el Portland tiene suficiente alcalinidad para activar la reacción de fraguado de la escoria, por lo que no es necesario incluir otro activador. [2], [5]

1. Procesos de producción, almacenamiento, transporte y fundición

a. Origen y producción

La escoria comúnmente utilizada para producir cemento tiene su origen en la producción de hierro, en la que el alto horno se llena constantemente con óxido de hierro (en forma de mineral, píldoras o sintetizado de hierro) piedra fundente (piedra caliza o dolomita) y combustible (coque).

El horno genera dos productos, hierro fundido que se acumula en el fondo del horno y escoria de alto horno, compuesta por impurezas de silicatos y aluminatos que fueron separadas del hierro o de la coque. Ambos productos se retiran del horno a temperaturas de 1500°C (2700°F). Luego de la extracción, la escoria se debe enfriarse rápidamente en agua. El método tradicional para este procedimiento es sumergir la escoria en agua, pero un método más eficiente utilizado en sistemas más modernos, llamado proceso de granulación a chorro, es el mojado con chorros de agua a alta presión, con una razón de masa de agua-escoria de 10 a 1. Con este método se enfría la escoria a una temperatura menor al punto de ebullición del agua de manera casi instantánea. Otro método, llamado granulación con aire, consiste en el uso de una peletizadora. En este dispositivo la escoria fundida pasa sobre una placa vibratoria donde es rociada con agua, lo cual la expande y la enfría. Luego la escoria pasa sobre un tambor rotatorio con aletas que lanzan la escoria en el aire, lo cual causa que se solidifique rápidamente y que se consolide en píldoras esféricas. Estas píldoras tendrán una mayor cantidad de sílice y se pueden usar como material cementante; o como un agregado de peso ligero en tamaños de partículas más grandes. Además, otros procesos comúnmente usados para producir agregados ligeros, que también combinan escoria con agua, son capaces de generar escoria con suficiente cantidad de sílice para poder usarse como material cementante. [10], [11]

Posteriormente, las píldoras o gránulos de escoria se secan, comúnmente en calentadores, y se muelen en molinos. Se usan imanes antes y después de la molienda para remover el hierro restante. La escoria suele reducirse a tamaños más finos que el cemento Portland, para aumentar la actividad cementante en la etapa temprana del fraguado, la velocidad de reacción de la escoria molida aumenta al reducir el tamaño de sus partículas. [10]

b. Almacenamiento y manejo

Según la “Slag Cement Association” de los Estados Unidos, el cemento de escoria se debe almacenar en recipientes o silos, como con el cemento Portland, para protegerlo de la humedad y de contaminación. Además, se debe tener especial cuidado en identificar camiones que contengan cemento de escoria, ya que se utilizan los mismos tipos de camiones para transportar el cemento Portland, de forma que se evite cualquier confusión entre los dos materiales en almacenamiento y transferencias entre bodegas. Los mismos equipos que se usan para el manejo del cemento Portland se pueden utilizar para el cemento de escoria. [12]

c. Almacenamiento en lotes y transporte

El almacenamiento y mezclado de concreto con cemento de escoria es similar al del cemento Portland. Para mezclas que usen cemento Portland, el ACI 233 recomienda almacenar el cemento de escoria justo después del Portland, en el mismo aparato de pesado. El equipo y el tiempo de mezclado son los mismos que para el Portland. Para el transporte, se pueden utilizar mezcladoras de tambor giratorio, entre otros equipos comunes. [10], [12]

Si fuera necesario importar la escoria de otros países para su uso en Guatemala, el precio de esta podría ser considerable. La escoria está disponible en países como Estados Unidos, India y China, por lo cual, si se opta por importarla deberá realizarse una cotización para calcular los costos, desde la compra con el proveedor hasta el transporte marítimo hacia Guatemala. Como parte de este trabajo de investigación se realizó una cotización con un proveedor de escoria de la China, por

medio del sitio web de Alababa, que ofreciera una cantidad mínima de 1000 toneladas de escoria. Se cotizó un servicio de transporte marítimo desde el puerto de Rizhao, China, hasta el puerto Everglades en Florida (como se puede observar en la Figura 1); junto con un transporte marítimo desde Florida hasta el puerto Santo Tomás de Castilla en Guatemala (como se puede observar en la Figura 2). Al realizar la suma de los costos, desde la compra del material hasta el transporte a Guatemala, se obtuvo un precio de Q206.76 por saco de escoria. Es importante tener en cuenta que los precios de importación se obtuvieron durante la Guerra de Ucrania, por lo cual serán mayores a los comúnmente vistos antes de este suceso.

d. Fundición

En combinación con el cemento Portland, el cemento de escoria aumenta reología del concreto, lo cual facilita el bombeo y su consolidación (el proceso por el que se libera el aire atrapado dentro de la mezcla fresca por medio de compactación). [12] Sin embargo, siempre deben cumplirse las buenas prácticas de trabajo en la fundición y se deben tomar en cuenta las características de la mezcla según el activador utilizado (requerido cuando se utiliza sin cemento Portland), ya que distintos activadores a diferentes concentraciones pueden aumentar considerablemente el tiempo de fraguado del concreto, como se explica en la sección IX.

e. Acabado y curado

Incluye las operaciones de nivelado, alisado, consolidado y tratado de superficies de concreto fresco para producir la apariencia o superficie deseada. Para lograr un acabado adecuado, se requiere una planeación adecuada del tiempo tomado para el acabado después de la fundición y compactación, mientras la mezcla sigue fresca. El período de tiempo oportuno para realizar el acabado varía según la temperatura ambiente del sitio, ya sea una región caliente o fría. Además, las mezclas con cemento de escoria y Portland tendrán una cantidad menor de sangrado o fuga de agua, y esta ocurre a una velocidad menor, siempre que sean molidas a un tamaño menor que el cemento Tipo 1 o Tipo 2, como comúnmente se hace en los Estados Unidos. Para el curado, es aceptable utilizar las prácticas comunes del cemento Portland, como el uso de rociadores, mantas de curado o compuesto de curado. [12]

2. Características químicas

El cemento de escoria es un aluminosilicato de calcio, de similar composición que el cemento portland. La composición de la escoria generalmente sigue los porcentajes mostrados en el Cuadro 1, aunque esto puede variar según la fuente y las impurezas del material. [2], [10]

La nomenclatura comúnmente utilizada para describir los compuestos químicos del cemento (llamados fases) incluye ciertas abreviaciones, donde se escribe solamente la primera letra del compuesto. Por ejemplo, para el H_2O se utiliza una simple H , para el $CaSO_4$ se utiliza una C , para el $2SiO_2$ se utiliza una S , etc. Cabe notar que el azufre se escribe con una línea horizontal sobre la letra para diferenciarlo de los silicatos. Por ejemplo, el SO_3 se abrevia como \bar{S} . Algunas fases pueden escribirse de forma dividida, separándolas en dos partes, por ejemplo: $CaSO_4 = CaO \cdot SO_3$,

Cuadro 1
Rango de componentes químicos de cementos de escoria en los Estados Unidos y Canadá.

Componentes constituyentes	Rango de composición en porcentaje de masa
Calcio (CaO)	32 a 45
Sílice (SiO_2)	32 a 42
Alúmina (Al_2O_3)	7 a 16
Magnesia (MgO)	5 a 15
Sulfuro (S)	0.7 a 2.2
Hierro (Fe_2O_3)	0.1 a 1.5
Manganeso (MnO)	5 a 15

[10]

lo cual se abrevia como $C\bar{S}$. Algunas fases presentes en el cemento se escribirán a continuación en su forma abreviada por simplicidad, como se encuentra comúnmente en la literatura, incluyendo el $C - A - S - H$ y el $C - (A) - S - H$ o $C - S - H$. [9]

Tanto el cemento portland como el cemento de escoria contienen la misma composición, a diferentes proporciones. El cemento portland es un material predominantemente cristalino, mientras que el de escoria es amorfo (no tiene una micro-estructura interna definida). Al hidratarse, la escoria reacciona con alcalinos de sodio y de potasio y con hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$, también llamado cal hidratada) para formar el gel $C - A - S - H$ (la forma abreviada de $CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$). Este es el producto principal de la reacción, importante para el desarrollo de la resistencia de las mezclas, a diferencia del cemento Portland cuyo producto principal es el $C - (A) - S - H$. Ambas fases son similares, con la diferencia que el $C - (A) - S - H$ también es llamado $C - S - H$ y experimenta una reacción inmediata que libera calcio e iones de aluminio a la solución. El $C - (A) - S - H$ también contiene una mayor cantidad de calcio que de sílice, con una razón de $[CaO]/[SiO_2]$ entre 1.6 y 2.0, mientras que el $C - A - S - H$ tiene una razón menor a 1, indicando menor cantidad de calcio que de sílice. Por esta razón se colocan paréntesis alrededor de la letra “A” en “ $C - (A) - S - H$ ” para diferenciar ambas fases en la nomenclatura. Además, el cemento de escoria es latentemente hidráulico, de forma que requiere un **activador alcalino** para generar la hidratación avanzada del compuesto. Este comportamiento es causado por una capa impermeable que se forma rápidamente alrededor de los granos de escoria tras la hidratación inicial, que debe ser rota por otro compuesto alcalino para que se genere la hidratación secundaria del compuesto. Para proveer la alcalinidad necesaria, es posible utilizar cemento portland cuando se genera una mezcla de ambos cementos, o es posible utilizar un **activador alcalino** por si solo, lo cual forma una mezcla sin cemento portland que utiliza a la escoria como un reemplazo total. Algunos activadores utilizados son el alcalino de sodio y potasio, el alcalino de sílice, el alcalino de carbonato y el hidróxido de sodio. Este último es el más comúnmente utilizado, a una concentración de 15M, siendo “M” la unidad de molaridad o concentración del fluido, indicando la cantidad de la sustancia en cierto volumen. [2], [10], [13]

La escoria de alto horno tiene un alto contenido de fase vítrea, un 90 a 95 %, y está compuesta principalmente por óxido de calcio (CaO), sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3). Al agregarle el activador se disuelve la escoria, liberando Si^{4+} , Al^{3+} y Ca^{2+} disueltos a la solución, los cuales están inmediatamente disponibles para formar el gel $C - A - S - H$, en conjunto con casi todo el contenido de óxido de calcio y sílice presentes en la escoria original que también participan en la formación del gel. Este tiene una estructura “dreierkette”, en la que se presentan cadenas paralelas de silicatos que

están posicionadas alrededor de una lámina de óxido de calcio, con átomos de aluminio formando puentes entre las estructuras, los cuales favorecen la formación de conexiones entre las cadenas. [13], [14]

3. Tipos de soluciones de activadores alcalinos

El comportamiento del cemento de escoria activada depende en gran medida del activador utilizado y de la temperatura de curado, en cuanto a velocidad de fraguado y endurecimiento, resistencia a sustancias externas y rigidez final. [2] A continuación se describen las características generadas por algunos activadores alcalinos adicionados en solución líquida:

a. Hidróxido de Sodio ($NaOH$):

Con este activador se acelera significativamente el tiempo de reacción, de forma que la mayoría de la formación del producto ocurre en la primera hora de hidratación, así como en las primeras 12 horas. Esto es causado por la mayor alcalinidad del activador, especialmente a altas molaridades. El calor liberado en el fraguado es similar al del cemento portland. [2]

Al usar este activador se obtiene una mayor resistencia temprana, después de un día, pero la resistencia después de los 7 días es menor que al usar silicato de sodio como activador. [15]

Además, es posible aumentar la trabajabilidad de una mezcla al usar este activador en combinación con un aditivo específico (un derivado de naftaleno formaldehído). Esto se discute en más detalle en la sección IX.A. [16]

b. Silicato de sodio (Na_2SiO_3):

Al usar este activador, la reacción con el cemento sucede en tres fases: el mojado de las partículas de escoria, la solidificación del activador, y la reacción y formación en masa del producto. Al aumentar el contenido de sílice en el activador, el tiempo de fraguado aumenta, mientras que a temperaturas mayores este se reduce. El calor liberado en el fraguado está alrededor de la mitad de aquel liberado por el cemento portland. Además, en un estudio se determinó que se alcanza mayor resistencia a los 7 días y a los 28 días de curado al utilizarlo, en comparación con mezclas que utilicen el hidróxido de sodio o mezclas con cemento portland tradicional. Adicionalmente, se ha determinado que al usar este activador se alcanza una permeabilidad similar a la del cemento Portland, lo cual asegura una protección similar contra sustancias corrosivas que puedan dañar el acero de refuerzo. Esto se explica con más detalle en la sección IX.C. [2], [15], [17], [18]

De acuerdo a imágenes obtenidas de escaneos con microscopio electrónico de barrido, se determinó que al utilizar hidróxido de sodio o silicato de sodio se genera una reacción controlada por difusión, donde la velocidad de reacción es equivalente a la velocidad de transporte de los reactivos a través del medio de reacción, el agua. Además, se ha determinado que el producto principal de la reacción del cemento alcalino de escoria es el alúminosilicato de calcio hidratado (C-A-S-H), con una cantidad de calcio menor a la de sílice. [2]

Entre otras características ventajosas, en un reporte realizado por el Diario Internacional de Toxicología se determinó que el silicato de sodio es una alternativa segura de manejar, en cuanto a seguridad industrial, siempre que la razón entre sílice y óxido de sodio esté por encima de 1.5. Además, existen modelos matemáticos que permiten calcular la **contracción autógena** y la contracción por secado en mezclas de concreto con escoria activada por silicato de sodio, comprobados por [19] según resultados de ensayos realizados. Estos modelos no serán válidos para mezclas que usen otros activadores, debido a las diferencias en composición química que afectarán la reacción de fraguado y la micro-estructura de la mezcla. Dichos modelos se muestran en la ecuación (17) y (18) y se describen con más detalle en la sección [X], [19], [20]

Entre otras características dadas con este activador, se experimentan menores tiempos de fraguado dependiendo de la concentración del activador, así como una alta contracción por secado. Esta última puede ser una característica indeseable en mezclas de concreto, ya que ocasiona grietas en las masas fundidas. Posibles soluciones a estos problemas pueden ser utilizar un agente reductor de la contracción por secado y aumentar los tiempos de mezclado para incrementar el tiempo de fraguado, estos temas se discuten con más detalle en la sección [X], [15], [16], [19], [21]

c. **Carbonato de Sodio (Na_2CO_3):**

Al usar este activador, se obtiene una resistencia significativamente menor que con otros activadores. Sin embargo, en un estudio realizado por la Universidad de Drexel en Philadelphia se encontró evidencia demostrando que las mezclas de concreto con este activador desarrollan mayor polimerización de $C - S - H$ a largo plazo, lo cual puede ocasionar una mejora en las propiedades de resistencia a lo largo del tiempo. También se experimenta un tiempo de fraguado y una contracción por secado similares al cemento Portland. [3], [15], [22]

Además, al utilizar un activador con porcentaje de masa de óxido de sodio (Na_2O) de 8% y módulo de SiO_2/Na_2O de 1 o mayor, se puede reducir la profundidad de la **carbonatación**, según un estudio realizado en morteros de escoria activada. [17] A pesar que este activador es una opción menos común que el silicato de sodio y el hidróxido de sodio, se puede considerar su uso si es necesario reducir el efecto de la corrosión por **carbonatación** en ciertas condiciones específicas.

4. **Características químicas y micro-estructurales a los 20 meses**

En un estudio realizado en la Universidad de Drexel, Philadelphia, se determinaron las características químicas y micro-estructurales de mezclas de cemento de escoria activada, así como concreto realizado con el mismo y con agregados finos de piedra caliza, con mezclas de cemento tradicional fresco a 55 días utilizadas como control. Es importante notar que el agregado utilizado en este estudio es distinto al piedrín comúnmente usado en Guatemala, aunque el piedrín de piedra caliza sí está disponible con diferentes proveedores, también conocido como granza blanca. Por esta razón, los resultados vistos tendrán algunas diferencias si se utiliza el piedrín tradicional, aunque en el estudio se encontró que la reacción fue similar en las mezclas de cemento y de concreto con escoria activada. [3]

En el estudio se realizaron cuatro mezclas de cemento, en las que la formación de fases cristalinas se ralentiza pero el cemento continua con la reacción química, mientras el sílice se coloca en forma-

ciones más ordenadas. Dos mezclas de cemento fueron activadas con carbonato de sodio, las cuales experimentan recarbonatación y producen calcita así como aragonita en la recarbonatación de los materiales de alta durabilidad ricos en calcio. En las dos muestras de cemento restantes, activadas con hidróxido de sodio, no se vieron avances pequeños de la reacción tras los 55 días y la relación Ca/Si se reduce desde el centro hacia afuera de los granos de escoria sin reaccionar. En el estudio se titularon las muestras activadas con hidróxido de sodio como la fórmula A y la fórmula B y las muestras activadas con carbonato de sodio como la fórmula C y la fórmula D. Las concentraciones de cada una se muestran en el Cuadro 4 [3]

Para las fórmulas A y B activadas con hidróxido de sodio se vieron resultados similares en la muestra de concreto que los obtenidos de la muestra de cemento, de tal forma que las composiciones químicas fueron parecidas. Las diferencias de concentraciones fueron menores al uno por ciento, o estuvieron dentro de la desviación estándar de cada elemento. Entre las fórmulas C y D se observaron diferencias leves en el producto externo de las muestras. Se observó un aumento menor en la cantidad de magnesio y sílice, un cambio moderado en el aluminio y sodio, y cambios en carbono, oxígeno y calcio. [3]

Se encontró que la escoria activada con carbonato de sodio en la muestra C se comporta de forma diferente que las muestras activadas con hidróxido de sodio, entre los 55 días y 20 meses. En el estudio se encontró evidencia de una mayor polimerización de C-S-H en la muestra C con el paso del tiempo, lo cual lleva a mejores propiedades para esta fórmula en mezclas de mayor edad. [3]

5. Características físicas

Las propiedades mecánicas del cemento dependen del activador utilizado, así como de su concentración, la temperatura de curado y la composición de la escoria utilizada. La resistencia a compresión también depende del grado de alcalinidad de la escoria, determinada por la razón de CaO/SiO_2 o $CaO + MgO/SiO_2 + Al_2O_3$. Una escoria alcalina desarrolla mayor resistencia que una escoria ácida o neutra. La dosis del activador también tiene un efecto significativo en la resistencia de los cementos de escoria activada. Sin embargo, la dosis óptima para una mezcla depende de las características de la escoria y del activador utilizados, así como de las condiciones de curado. [15]

a. Finura de la escoria

La finura de la escoria utilizada tiene un gran impacto en las características mecánicas de las mezclas, ya que se aumenta la reactividad del material según se reduce el tamaño de las partículas de la escoria. Sin embargo, aumentar la finura sobre cierto límite puede tener efectos negativos en la resistencia, ya que se aumenta la cantidad de agua necesaria en la reacción de fraguado. Aumentar la finura de la escoria generará una mayor resistencia, aunque también se experimentan tiempos de fraguado significativamente menores, lo cual reduce la trabajabilidad de las mezclas. [15], [23], [24]

Para asegurar una buena resistencia de las mezclas, [25] recomienda una superficie de partícula de 400 a $550 m^2/kg$, aunque aumentar la finura genera menor trabajabilidad según [24]. Otra forma de mejorar la resistencia es utilizando una porción de escoria ultra fina, con superficie menor a $1500 m^2/kg$. De esta forma se alcanzan resistencias tempranas mayores, sin reducir la trabajabilidad de forma significativa. [15], [26]

Para aumentar la finura de la escoria, una opción es separar los granos más finos por medios físicos, utilizando el método de la segregación por ciclón [27]. También se obtiene una mayor reactividad de la escoria al utilizar el método de la activación mecánica, donde se comprimen las partículas por medio de un molino de desgaste. [15], [28]

b. Contenido de agua

En los sistemas de mezclas de escoria activada actúa como medio de transporte de sustancias disueltas durante la reacción del fraguado. Por lo tanto, la cantidad de agua utilizada es un factor que influye en la trabajabilidad y en la resistencia de la mezcla. [15]

En un estudio se realizaron ensayos con múltiples muestras de morteros de cemento de escoria con diferentes razones de agua/cemento (0.3 a 0.6) y de $Na_2O/S M$ (0.039 y 0.089), algunas activadas con silicato de sodio y otras con una combinación de silicato de sodio e hidróxido de sodio. Se obtuvieron mayores resistencias a compresión al utilizar una razón de agua/cemento de 0.3, la diferencia de resistencias era más pronunciada en las mezclas con una relación de $Na_2O/S M$ de 0.089. [15], [29]

c. Efectos de la composición química

Al aumentar el contenido de óxido de magnesio (MgO) a un peso de 13 % en mezclas de pastas activadas con silicato de sodio se obtiene un incremento en la resistencia de 50 a 80 % a los 28 días y se acelera la reacción de fraguado, según un estudio realizado en el 2011. Al usar hidróxido de sodio como activador, se obtuvo un incremento leve en la resistencia a compresión de las pastas. [30], [31]

En otro estudio se evaluó el efecto del aumento en la concentración de alúmina en la escoria utilizada en morteros, resultando en una reacción de fraguado más lenta y en una reducción en la resistencia temprana. Sin embargo, a los 28 días no se vio una diferencia significativa en la resistencia a compresión de los morteros. [30], [32]

Por otro lado, en este estudio se agregaron pequeñas cantidades de polvo de alúmina a mezclas de concreto con cemento de escoria curadas a temperatura ambiente, en las que se obtuvo un aumento de 31 % en la resistencia a compresión a los 28 días, comparado con un concreto sin adición de alúmina. Con esta adición se alcanzaron hasta 65 MPa de resistencia. [30], [32]

d. Temperatura de curado

Al curar mezclas de concreto a alta temperatura se incrementa la resistencia temprana, de forma que a 48 horas se obtiene la misma resistencia que se alcanzaría a 28 días con curado a temperatura ambiente. Sin embargo, la resistencia temprana se reduce significativamente si se cura a temperatura ambiente, de forma que se posible no sobrepasar los 1500 psi tras un día de curado. La resistencia aumenta al incrementar la concentración del activador, lo cual también aumenta la molaridad del hidróxido de sodio o la concentración de sodio y de sílice en el silicato de sodio. De esta forma se

han reportado resistencias de entre 11,600 psi y 14,500 psi a 28 días para mezclas de concreto. [2], [6]

e. Módulo de Poisson y Módulo de Elasticidad

El módulo de Poisson y el módulo de elasticidad son parámetros que pueden variar según los materiales utilizados y otros factores, por lo que no son constantes para todas las mezclas y deben medirse por medio de los ensayos de el código ASTM C469/C469M y de acuerdo a el código ASTM C989M - 18a, o por medio de el código NTG 41017-h16. [5], [33].

En un estudio se realizaron ensayos de nanoindentación en geles de cemento de escoria activadas con silicato de sodio o con hidróxido de sodio, para determinar y comparar el módulo de Young y la dureza superficial con los de pastas de cemento Portland. El ensayo consistió en realizar abolladuras con una punta Berkovich, realizar una gráfica de carga-desplazamiento para cada abolladura y estimar el módulo de Young y la dureza superficial mediante el procedimiento de Oliver y Pharr. Los geles de cemento de escoria están compuestos principalmente por $C - A - S - H$, mientras que los geles de cemento Portland están compuestas por $C - S - H$. Para la escoria activada con silicato de sodio, el gel de $C - A - S - H$ alcanzó un módulo de Young de 28-47 GPa y una dureza superficial de 0.84-1.53 GPa. Para la escoria activada con hidróxido de sodio, el gel de $C - A - S - H$ alcanzó un módulo de Young de 12-43 GPa y una dureza de 0.30-1.32 GPa. Para el cemento Portland, el gel de $C - S - H$ alcanzó un módulo de Young de 16-44 GPa y una dureza de 0.40-1.40 GPa. Los resultados reflejaron una relación entre la porosidad y el módulo de Young, con una mayor porosidad se formó una micro estructura más compacta y por lo tanto un mayor módulo de Young, indicando una mayor resistencia. Sin embargo, la porosidad conlleva otros problemas, como una mayor contracción por secado por la evaporación de agua a través de los poros y una mayor vulnerabilidad a ataque de sustancias externas en el acero de refuerzo. En el estudio se encontró que los geles activados con silicato de sodio mostraron el mayor módulo de Young y una mayor porosidad en comparación con los activados con hidróxido de sodio y los de cemento Portland. Esto refleja las características vistas en la literatura y anteriormente descritas: las mezclas de silicato de sodio muestran una mayor resistencia y una mayor contracción por secado que aquellas activadas con hidróxido de sodio. [15], [34]

Para mezclas de concreto con cemento Portland es común utilizar ecuaciones empíricas para predecir el módulo de elasticidad y otros parámetros en función de la resistencia a compresión ($f'c$), pero estas no se deben utilizar para mezclas con cemento de escoria, ya que estos tipos de mezclas tienen un comportamiento distinto. Por lo tanto, es necesario utilizar ecuaciones distintas para el cemento de escoria. [15]

En un estudio se realizaron ensayos para generar estas ecuaciones, utilizando dos diferentes tipos de aditivos como activadores: el tipo S con un 7.5 % de cal hidratada ($Ca(OH)_2$) y 1 % de silicato de sodio, y el tipo C con 7.5 % de cal hidratada y 2 % de carbonato de sodio (Na_2CO_3); los porcentajes de los activadores se tomaron en relación al peso de toda la mezcla. Se utilizó una combinación de dos activadores en cada tipo para estabilizar la reactividad de la cal hidratada, pero esta sigue actuando como el activador principal. Se obtuvieron ecuaciones empíricas a partir del análisis de regresión múltiple no lineal de los resultados experimentales, y se compararon con las ecuaciones de las normativas de diferentes países para concreto de cemento Portland. Finalmente se presentaron las ecuaciones que mejor se ajustaron a los resultados experimentales, las cuales se listan en las

siguientes secciones. [15], [35]

Para el módulo de elasticidad del concreto de peso normal activado principalmente con cal hidratada ($Ca(OH)_2$) puede usarse la ecuación establecida en el ACI 318, que se ha mantenido hasta la última versión del código (ACI 318-19), así como la ecuación generada en el estudio por [35], ya que ambas generan resultados muy similares y acordes a lo obtenido en los resultados experimentales de [35], siendo la ecuación de [35] ligeramente más precisa según estos resultados. [15], [35], [36]

Obtenido del código ACI 318-19:

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \sqrt{f'_c} \quad (MPa) \\ E_c &= 57000 \sqrt{f'_c} \quad (lb/pulg.^2) \end{aligned} \quad (1)$$

Obtenido de [35]:

$$\begin{aligned} E_c &= 4690 \sqrt{f'_c} \quad (MPa) \\ E_c &= 56475 \sqrt{f'_c} \quad (lb/pulg.^2) \end{aligned} \quad (2)$$

En un estudio realizado para medir la permeabilidad de mezclas de cemento de escoria se utilizó un módulo de Poisson de 0.2 para realizar los cálculos, [18] lo cual es similar a los valores vistos en el cemento Portland. Puede ser aceptable asumir este valor del módulo para mezclas de cemento de escoria, según el criterio del profesional encargado y según los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio de acuerdo a el código ASTM C469/469M y ASTM y ASTM C989M-18a.

f. Predicción de la resistencia a compresión

Según un estudio, se determinó que es posible predecir la resistencia de mezclas de cementos alternativos, utilizando el método de redes neuronales artificiales, un modelo computacional que permite resolver problemas mediante una forma de inteligencia artificial con aprendizaje autónomo. Usando este método se logró predecir la resistencia con un porcentaje de error absoluto de 2.2102 para el modelo con el mejor desempeño. [37] Por otro lado, en un nuevo caso de estudio se encontró que otro método aceptable es el de los sistemas interfaciales neuro-difusos adaptativos (ANFIS por sus siglas en inglés, es un tipo de redes neuronales artificiales), ya que los resultados obtenidos tuvieron una precisión de más el 90 %. Cabe destacar que ambos estudios se realizaron utilizando cementos de composición similar al cemento de escoria, dentro de la clasificación de geopolímeros, pero no se utilizó escoria como material de prueba. Los geopolímeros son una clase de polímeros inorgánicos con una estructura amorfa consistente de tetraedros de $[SiO_4]^{4-}$ y $[AlO_4]^{5-}$ y que comparten sus esquinas entre ellos por medio de átomos de oxígeno. Estos son producidos por medio de la reacción entre un aluminosilicato, generalmente un sub-producto de algún proceso industrial, y un activador alcalino. Ya que el cemento de escoria activada entra en esta clasificación, es posible utilizar los modelos matemáticos descritos para predecir la resistencia de esta clase de cemento, siempre que la escoria utilizada tenga una composición química que siga los parámetros de concentración dados en la Tabla 4. [3], [6], [30], [37]

Por otro lado, según en el estudio descrito en la sección e. se determinaron las siguientes ecuaciones empíricas:

Para obtener la curva parabólica de ganancia de resistencia a la compresión en el tiempo del cemento de escoria de alto horno activada principalmente por cal hidratada se utiliza la siguiente ecuación: [15], [35]

$$f'_c(t) = \frac{t}{A_1 + B_1 t} (f'_c)_{28} \quad (3)$$

Donde $(f'_c)_{28}$ es la resistencia máxima a la compresión a los 28 días, t es la edad del concreto en días y los parámetros A_1 y B_1 se obtienen de las siguientes ecuaciones: [35], [38]:

$$A_1 = 5.2 \cdot \ln[(\alpha w/b)^{-0.1} \beta^{3.25}] + 2.42 \quad (4)$$

$$B_1 = 0.44 \cdot \ln[(w/b)^{0.35} \beta^{-2}] + 1.04 \quad (5)$$

Donde S/A es la razón de agregado fino/agregado grueso, w/b es la razón de agua/cemento, $\alpha = 1.1$ para concreto activado con cal hidratada y silicato de sodio y $\alpha = 1.0$ para concreto activado con cal hidratada y carbonato de sodio; $\beta = 1.0$ para curado al aire y $1.4(w/b/\alpha)^{0.23}$ para curado en agua; $f_{co} = (10MPa[1.45ksi])$ = resistencia de referencia. [35]

Es preferible que los parámetros α y β se obtengan de ensayos de laboratorio para cada caso de uso, por medio de un análisis de regresión múltiple no lineal de los resultados experimentales de una mezcla específica. Cuando se utilicen activadores distintos a los estipulados en el estudio, las ecuaciones [4] y [5] carecerán de precisión, ya que los parámetros α y β dependen del activador utilizado y de las condiciones de curado, por lo que se deberán determinar mediante el análisis de resultados de laboratorio, como se realizó en el estudio presentado. [35]

g. Predicción del esfuerzo y deformación unitaria

En el estudio antes descrito se generaron gráficas de esfuerzo-deformación, de las que se obtuvieron las siguientes ecuaciones para el esfuerzo según la deformación y el esfuerzo máximo a los 28 días (f'_c) de mezclas activadas principalmente con cal hidratada: [35]

$$f_c = \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] \quad \text{para } \varepsilon_c < \varepsilon_o \quad (6)$$

$$f_c = \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_o}{0.38 - \varepsilon_o} \right] \quad \text{para } \varepsilon_c < \varepsilon_o \quad (7)$$

Donde f_c es el esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria (ε_c); y ε_o es la deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo, según la siguiente ecuación: [35]

$$\varepsilon_o = 0.0005(f'_c)^{0.47} \quad (8)$$

h. Resistencia a la tensión

En comparación con el cemento Portland, el concreto de cemento de escoria desarrolla una mayor capacidad de esfuerzo a tensión, debido a que se experimenta un “creep” mayor, un módulo de elasticidad menor y una resistencia a tensión mayor. [35]

En un estudio antes descrito se desarrollaron ecuaciones para describir las siguientes características:

Resistencia a la tracción directa [35]:

$$\begin{aligned}f_t &= 0.26(f'_c)^{0.64} \quad (MPa) \\f_t &= 1.56(f'_c)^{0.64} \quad (psi)\end{aligned}\tag{9}$$

Resistencia a la tracción por compresión diametral [35]:

$$\begin{aligned}f_{sp} &= 0.26(f'_c)^{0.7} \quad (MPa) \\f_{sp} &= 1.16(f'_c)^{0.7} \quad (psi)\end{aligned}\tag{10}$$

Módulo de ruptura [35]:

$$\begin{aligned}f_r &= 0.26(f'_c)^{0.74} \quad (MPa) \\f_r &= 0.95(f'_c)^{0.74} \quad (psi)\end{aligned}\tag{11}$$

i. Resistencia al corte directo

En el estudio de [35] se desarrollaron ecuaciones para describir el corte directo, mediante el método de empuje. Además, se explica que la baja resistencia a la tensión del concreto hace que esta característica sea crítica en la falla por cortante.

Resistencia al cortante directo: [35]:

$$\begin{aligned}\tau &= 0.4(f'_c)^{0.69} \quad (MPa) \\ \tau &= 1.87(f'_c)^{0.69} \quad (psi)\end{aligned}\tag{12}$$

j. Resistencia de la adherencia acero-concreto

En el estudio de [35] se desarrollaron ecuaciones para describir la resistencia de la adherencia acero-concreto de una barra corrugada instalada en especímenes de concreto de cemento de escoria activada principalmente por cal hidratada. Se encontró que la resistencia de la adherencia (τ_b)

aumenta con el f'_c , mientras que el desliz de la barra (s_1) en el esfuerzo de adherencia máximo disminuye al aumentar el (τ_b), por lo que tanto la resistencia como el desliz son dependientes del f'_c del concreto. Cabe notar que [35] recomienda que se realicen más ensayos para determinar los efectos de los cambios geométricos en el corrugado, como la altura, forma, y espaciado del mismo. A continuación se muestran las ecuaciones resultantes de los ensayos realizados en el estudio:

$$\tau' = \tau_b(s/s_1)^{0.4} \quad \text{para } s \leq s_1 \quad (13)$$

$$\tau' = \tau_b[1 - 0.45(s - s_1)] \quad \text{para } s > s_1 \quad (14)$$

Donde τ' es el esfuerzo de adherencia acero-concreto a un desliz s de la barra y s_1 es el desliz de la barra en el esfuerzo de adherencia máximo.

$$\begin{aligned} \tau_b &= 0.83(f'_c)^{0.75} \quad (MPa) \\ \tau_b &= 2.88(f'_c)^{0.75} \quad (psi) \end{aligned} \quad (15)$$

Donde τ_b es la resistencia de adherencia acero-concreto.

$$\begin{aligned} s_1 &= 2.5(\tau_b)^{-0.72} \quad (mm) \\ s_1 &= 3.54(\tau_b)^{-0.72} \quad (pulg.) \end{aligned} \quad (16)$$

Donde s_1 es el desliz de la barra en el esfuerzo máximo.

VII. Requerimientos técnicos para el cemento de uso general

En el código NTG 41095 se establecen los requisitos para los cementos que se comercializan en el territorio de Guatemala, basándose en el código ASTM C1157/C1157M-17. [7]

A. Clasificación

El código NTG 41095 de la COGUANOR establece los requerimientos y la clasificación para diferentes tipos de cementos según sus características, basándose en el código Norteamericano ASTM C1157/C1157M-17. La NTG 41095 establece los requerimientos para cada categoría, pero no se limita la composición del cemento o sus componentes. Esto quiere decir que es posible realizar mezclas con dos o tres tipos de cementos, incluyendo cemento de escoria activada. A continuación se describen las clasificaciones estipuladas:

- Tipo UG: “Cemento hidráulico para uso general. Debe utilizarse en la construcción de toda clase de obras, pequeñas, medianas o grandes, donde no se requieran otros tipos de cementos con propiedades especiales.”
- Tipo AR: “Alta resistencia inicial. Para obras especiales de concreto simple, reforzado y preforzado de endurecimiento rápido y altas resistencias iniciales. Para la prefabricación liviana y de elementos estructurales y cuando se requiere desencofrado y desmoldado rápido.”
- Tipo DLR: “Desarrollo lento de resistencia. Para la estabilización de suelos, concreto compactado con rodillo (CCR) para pavimentos y para presas. Se debe despachar preferentemente a granel.”
- Tipo MRS: “Moderada resistencia a los sulfatos. Para concretos en aguas y terrenos que contienen sulfatos, concretos en aguas marinas o en ambientes marinos y concretos expuestos a concentraciones moderadas de sulfatos de calcio, sodio y magnesio, en aguas o suelos.”
- Tipo ARS: “Alta resistencia a los sulfatos. Para concretos en aguas y terrenos que contienen sulfatos, concretos en aguas marinas o en ambientes marinos y concretos expuestos a concentraciones altas de sulfatos de calcio, sodio y magnesio, en aguas o suelos.”
- Tipo MCH: “Moderado calor de hidratación. Para obras de concreto masivo susceptibles de fuertes retracciones por variaciones térmicas y peligro de fisuración (presas, estribos, cimentaciones, muros gruesos y grandes losas). Para obras de concreto normal en ambientes muy calurosos.”
- Tipo BCH: “Bajo calor de hidratación. Se utiliza cuando interesa que el concreto desarrolle poco calor a partir de la hidratación del cemento, como es el caso de las presas de concreto, bases de grandes dimensiones y otras construcciones masivas.”
- Opciones adicionales:
 - Opción BRA: Baja reactividad álcali-sílice con los agregados reactivos, debe someterse a ensayos para asegurar que se cumpla lo requerido en el Cuadro 1 de la NTG 41095 para la opción BRA.

- Opción BL: Color blanco. Debe cumplir con lo establecido en la opción BL del Cuadro 1 de la NTG 41095.
- Opción A: Con aire incorporado. “Agregado al clinker durante la manufactura del cemento. Mejora la resistencia al congelamiento y deshielo, adicionalmente, mejora la trabajabilidad de las mezclas de concreto.” Debe cumplir con lo establecido en la opción A del Cuadro 1 de la NTG 41095.

[7]

B. Propiedades químicas

En el código NTG 41095 no se especifica la composición química del cemento. Aunque se estipula que este debe ser analizado para obtener información. La elección de los análisis químicos a realizarse dependerá del criterio del profesional, incluyendo los ensayos estipulados en el mismo código y en la literatura. Según [39], para asegurar que la escoria presente una actividad cementante satisfactoria, la composición química de esta debe estar dentro de los parámetros de uso común, como se muestran en el Cuadro 1. Para lograr esto, es necesario que la escoria sea empapada en agua al salir de la forja y triturada a la finura adecuada. Ya que la actividad cementante está ligada a la cantidad de fase vítrea en el cemento (compuesta de silicato de calcio despolimerizado) y al usar este procedimiento se incrementa la cantidad de la fase, esto asegura que el contenido de esta cumpla con el mínimo requerido, aunque cave destacar que la composición puede variar según la fuente de la que se obtuvo la escoria. [10], [39]

Además, es necesario que la escoria tenga un pH básico, es decir que tenga una razón de $CaO + MgO/SiO_2 > 1$. La escoria básica tiene un mayor potencial hidráulico, ya que el contenido de cal controla su activación, aunque una escoria ácida también puede ser activada mediante un activador alcalino. [13], [39]

C. Propiedades físicas

En el código NTG 41095 se establecen los requerimientos mínimos para cementos de uso general, se deben cumplir las siguientes características:

- Finura clase A de acuerdo con los métodos de ensayo de la NTG 41003 h6 o ASTM C430.
- Expansión en autoclave, cambio de longitud máximo de 0.8 %, según el código NTG 41014 h1 o la ASTM C151.
 - Una alternativa a este requerimiento es cumplir con una expansión de Chatelier máxima de 10 mm, según el método de ensayo estipulado en la NTG 41003 h10 o la ASTM C191.
- Tiempo de fraguado Vicat inicial entre 45 y 420 minutos, según el método de ensayo de la NTG 41003 h10 o la ASTM C191.
- Contenido de aire en el mortero de 12 %, según el método de ensayo de la NTG 41003 h3 o la ASTM C185.

- Resistencia a compresión mínima, según el método de ensayo de la NTG 41003 h4 o la ASTM C109:
 - A los 3 días: 13 MPa o 1890 psi.
 - A los 7 días: 20 MPa o 2900 psi.
 - A los 28 días: 28 MPa o 4060 psi.

- Expansión máxima de la barra de mortero a los 14 días de 0.02 %, según el método de la NTG 41014 h3 o la ASTM C1036

VIII. Normativa

A. Código NTG 41095

Según lo estipulado en el código NTG 41095: “Esta norma establece los requisitos que deben cumplir los cementos hidráulicos de aplicación general y los de aplicaciones especiales, tanto de fabricación nacional como importados. No contiene restricciones sobre la composición del cemento o de sus componentes.” Esta norma especifica las propiedades físicas de los cementos, incluyendo métodos de ensayo. Para las propiedades químicas se exige analizar químicamente el cemento, para los óxidos presentes en mayor cantidad y que sumen un mínimo del 98 % de la masa total del cemento, según los métodos de ensayo estipulados en el código ASTM C114. Según la clasificación de cementos que esta norma establece, las mezclas con cemento de escoria activada con silicato de sodio o con hidróxido de sodio pueden cumplir con el cemento tipo AR (alta resistencia inicial), siempre que se resuelva el problema del agrietamiento mediante aditivos, como se discute en la sección [IX.A.4](#) [\[7\]](#)

B. Código ASTM C989/C989M

Este es el código estadounidense que describe los requerimientos necesarios para el uso de un cemento de escoria activada para concreto y morteros, incluyendo especificaciones para tres grados de resistencia para escoria de alto horno granulada fina. Este código estipula los límites de contenido de sulfuro de azufre y de sulfato en la composición química de la escoria. Se incluyen los requerimientos para sus características físicas, de acuerdo a la finura requerida y según la permeabilidad al aire, el contenido de aire, el índice de actividad de la escoria y la resistencia a la compresión. [\[ASTMC989\]](#)

C. Código ASTM C1073

Este código describe el método de ensayo utilizado para determinar la actividad hidráulica de un cemento de escoria, para el control de calidad de la producción de cemento de escoria proveniente de una sola fuente específica, como complemento a los ensayos estipulados en el código ASTM C989M/C989M. Es posible utilizar este método una vez ya se haya desarrollado una correlación de la actividad hidráulica entre cementos de varias finuras, de una sola fuente y molidas en un laboratorio específico. La información proveída por este método puede utilizarse para determinar la finura que un fabricante debe alcanzar para mantener un nivel deseado de actividad hidráulica en el cemento de escoria. [\[40\]](#)

IX. Ventajas y desventajas

Una mezcla de concreto con cemento de escoria activada por alcalinos mostrará altos valores de resistencia a largo plazo, así como mayor resistencia a la tensión que el cemento portland. También es posible modificar el activador agregado y la temperatura de curado para acelerar el fraguado y para mejorar la resistencia temprana. Por estas razones es posible utilizar la escoria como un reemplazo parcial del cemento portland para mejorar la resistencia a largo plazo del concreto. Además, un concreto de escoria activada tendrá una mayor resistencia a la penetración de cloruros, ataque químico de sustancias externas, así como dilatación por congelamiento y deshielo. [2]

Además, según el reporte del ACI para cementos alternativos, el cemento de escoria activado experimenta un fenómeno que aumenta la resistencia a largo plazo de las mezclas de concreto: El agua liberada durante el fraguado procede a reaccionar con partículas de cemento sin hidratar, lo cual aumenta la resistencia progresivamente con el paso del tiempo. [6]

Otra característica ventajosa de este tipo de cemento es la reducción en el fenómeno del cambio de volumen causado por la reacción álcali/sílice. En mezclas de concreto que utilizan cemento portland, esta reacción ocurre entre los agregados que sean potencialmente reactivos y los álcalis presentes en el cemento. Ya que esta reacción es perjudicial para la resistencia a largo plazo del concreto, es importante reducirla. Se encontró en un estudio que mezclas de concreto con cemento alcalino activado muestran una reducción en el cambio de volumen causado por la reacción antes descrita, en comparación con el concreto de cemento portland. [17]

A. Contracción, velocidad de fraguado y trabajabilidad

1. Contracción autógena y por secado

Entre las desventajas del uso de cemento de escoria activada, se ha demostrado que las mezclas de concreto con este cemento experimentan una mayor contracción en comparación con el cemento portland, especialmente al utilizar silicato de sodio como activador. En las mezclas de este concreto se forma un mayor número de poros con diámetro entre 1.25 y 25 nanómetros que el cemento portland. Los poros entre estos diámetros se conocen como **mesoporos**, y una mayor proporción de ellos es comúnmente asociada con una mayor contracción por secado. Cabe notar que si se tiene un tamaño mayor en los poros con diámetro entre 25 y 5000 nanómetros (llamados **macroporos**) se facilita la pérdida de agua de los **mesoporos** en cualquier tipo de mezcla de concreto. [15], [17]

Las mezclas de concreto de cemento de escoria suelen tener mayor proporción de microporos (con diámetro menor a 1.25 nanómetros) y de **mesoporos** que el cemento Portland. Debido a la naturaleza única de esta estructura de poros, los productos y técnicas tradicionalmente utilizados para reducir la contracción son ineficaces. Se ha demostrado que el curado a temperatura ayuda a reducirlo, pero aún así se experimenta una contracción considerable. También es posible reducir la contracción al agregar cal hidratada a la mezcla, pero esto causa un incremento en la contracción plástica del concreto. [2], [17]

En un estudio se determinaron las causas principales del esfuerzo de tensión (el cual causa la contracción y el consecuente agrietamiento) en mezclas restringidas uniaxialmente, de mortero y

Cuadro 2

Parámetros y coeficientes de correlación de un análisis de regresión según la ecuación (17).

Módulo de SSL	A	a	$\varepsilon_{s,\infty}$	R^2
0	0.708	-0.0589	1164.0	0.956
0.5	0.915	-0.0736	1987.6	0.965
1.0	0.982	-0.0305	1250.9	0.997
1.5	1.003	-0.0093	1027.5	0.991

de concreto con escoria, a una edad temprana. Se encontró que la deformación térmica es el principal causante del esfuerzo de tensión para las mezclas de mortero, mientras que en las mezclas de concreto el causante es la **contracción autógena**. Se encontró que existe una relación lineal entre el esfuerzo de tensión y la **contracción** para las mezclas restringidas uniaxialmente, sin importar el contenido de agua en la mezcla. Según los resultados, el cemento de escoria desarrolla agrietamiento más tarde que el cemento Portland, debido a que con la escoria se experimenta un menor efecto por temperatura a edad temprana. El agrietamiento del cemento de escoria se debe principalmente a la **contracción autógena** y está relacionada a la velocidad de la **contracción** en vez de la magnitud de la **contracción**. [41]

En un estudio realizado por la Sociedad Americana de Cerámicos se investigó el uso de un agente que reduzca la **contracción** en mezclas de mortero con escoria activada por alcalinos, incluyendo un agente de magnesia, con el objetivo de medir la efectividad en la reducción de la **contracción autógena** y de la **contracción** por secado, se utilizó solución líquida de silicato de sodio como activador. Se encontró que al utilizar un activador con un módulo (relación molar SiO_2/Na_2O) entre 0 y 0.5, la **contracción** por secado aumentó consistentemente. Al elevar el módulo hasta 1.5, se redujo la **contracción autógena**. Sin embargo, la **contracción** por secado aumentó consistentemente con el incremento del módulo, por lo que no se reducen ambos tipos de **contracción** al modificar el activador utilizado. De los agentes utilizados, un agente reductor basado en alcohol oxialquileno presentó una disminución significativa en la **contracción autógena** y por secado, como resultado de una reducción en la tensión por **capilaridad** y en la pérdida de masa de la mezcla. Por otro lado, el agente de magnesia también presentó una reducción en la **contracción**, pero no fue tan efectivo como el otro agente. En resumen, ambos agentes reducen la **contracción autógena** y por secado en morteros con escoria activada por alcalinos, aunque el más efectivo es el agente basado en alcohol oxialquileno. [19]

En el estudio antes mencionado también se evaluaron diferentes modelos matemáticos que podrían ser adecuados para describir la **contracción autógena** en mezclas de concreto con escoria activada por alcalinos. Se concluyó que el modelo mostrado en la ecuación (17) es el más adecuado para representar el comportamiento encontrado en los resultados experimentales del estudio, en los que se utilizó silicato de sodio líquido (SSL) como activador. En el Cuadro 2 se muestran los valores de las constantes usadas en el modelo según el módulo de relación molar SiO_2/Na_2O del SSL. [19]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_s(1 - A \cdot \exp(at)) \quad (17)$$

Donde ε_s es la **contracción autógena** última, A y a son parámetros relacionados a las propiedades y componentes de los materiales, según el Cuadro 2 [19]

Cuadro 3

Parámetros y coeficientes de correlación de un análisis de regresión según la ecuación (18).

Módulo de SSL	a	b	$\varepsilon_{s,\infty}$	R^2
0	0.969	-0.0765	1762.76	0.995
0.5	1.062	-0.1322	2624.87	0.976
1.0	0.954	-0.1778	4150.34	0.989
1.5	1.017	-0.3573	4989.89	0.982

[19]

De la misma manera el estudio se determinó un modelo adecuado para describir la contracción por secado, causada por la disminución del volumen ocurrida durante la reacción química del fraguado y el intercambio de humedad con el ambiente. Se concluyó que el modelo de la ecuación (18) se apegaba más a los resultados experimentales, entre todos los modelos evaluados. [19], [42]

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{s,\infty}(1 - ae^{bt}) \quad (18)$$

Donde $\varepsilon_{s,\infty}$ es el valor total de contracción por secado, a y b son constantes y t es el tiempo transcurrido en días. Los valores de estas constantes se muestran en el Cuadro 3. [19], [42]

2. Velocidad de fraguado

También se debe tomar en cuenta la velocidad de fraguado de este cemento, que es considerablemente alta en comparación con el cemento portland. Ya que es común agregar grandes cantidades de **activador alcalino** para alcanzar la resistencia deseada, esto reduce considerablemente el tiempo de endurecimiento del concreto, especialmente al usar silicato de sodio como activador. La mezcla puede llegar a endurecerse completamente en 10 minutos. Esta baja trabajabilidad limita las aplicaciones del cemento de escoria activada, especialmente porque es posible que los aditivos comúnmente utilizados para mejorar la trabajabilidad del cemento Portland no sean efectivos en el ambiente alcalino del cemento de escoria. Sin embargo, también debe tomarse en cuenta que el cemento de escoria provoca un aumento en la reología del concreto, lo cual ayuda en el bombeo y en la liberación de burbujas de aire por medio de la compactación. Además, el rápido endurecimiento es una característica útil para aplicarse en elementos prefabricados de concreto, ya que se acelera la producción de estos. [2], [6], [12], [17]

Una forma de incrementar el tiempo de fraguado en mezclas activadas con silicato de sodio es aumentando el tiempo de mezclado. En un estudio se determinó que al ocupar de 3 a 10 minutos de mezclado se incrementa el tiempo de fraguado inicial en más de 40 minutos (el tiempo en que la mezcla comienza a perder su plasticidad y forma una pasta) y se incrementa el tiempo de fraguado final en más de 4 horas (el tiempo en que la mezcla pierde por completo su plasticidad y queda endurecida). Al mezclar durante 30 minutos, el tiempo de fraguado inicial y final se incrementan en 2 y 8 horas respectivamente. Adicionalmente, en un estudio realizado con mezclas de mortero con el mismo activador, se determinó que al mezclar durante 30 minutos se incrementa la resistencia en aproximadamente un 11 % y se reduce la contracción por secado en un 16 % (la diferencia en la contracción se midió en comparación con morteros mezclados durante 3 a 10 minutos) debido a la reducción en la cantidad de poros por debajo de 50 nanómetros. También se determinó que

ocupar 30 minutos de mezclado no genera cambios en la composición química o mineralógica de los productos generados en la reacción de fraguado. [15], [16], [21]

3. Trabajabilidad

Además, en un estudio se determinó que es posible reducir el esfuerzo de fluencia de una mezcla, la fuerza requerida para que una sustancia fluya libremente, con hidróxido de sodio como activador. Este aumento en la fluidez de la mezcla puede ser de gran importancia en procesos de fundición para que esta pueda verterse fácil y rápidamente en un molde o formaleta. También es importante para mezclas de mortero, ya que aumentar la fluidez de este brinda una facilidad al trabajo en campo que normalmente se obtiene aumentando el contenido de agua, lo cual reduce la resistencia del mortero. En el estudio se encontró que al usar un derivado de naftaleno formaldehído como aditivo, se redujo el esfuerzo de fluencia en un 80 %. Cabe notar que estos resultados solamente se observaron al utilizar hidróxido de sodio como activador y que al usar silicato de sodio no se obtuvo ningún cambio en la trabajabilidad de la mezcla. Este es un ejemplo de cómo diferentes activadores cambian la composición química de la mezcla, por lo que diferentes aditivos tendrán efectos distintos según el activador que se utilice. Existen estudios donde se ensayaron mezclas con distintos aditivos, pero cada estudio solamente cubre algunos de los activadores existentes y es posible que no exista un estudio donde se utilicen el activador y aditivos que se desee implementar en un proyecto específico. Por estas razones, es importante realizar ensayos para mezclas individuales en las mezclas antes de aplicarlas en un proyecto, para determinar los efectos del activador y aditivos que se utilicen y asegurar que sus características sean las deseadas. [16]

4. Aditivos

Existen diversos aditivos utilizados para mitigar los problemas dados en mezclas de cemento de escoria de alto horno. Al usarse individualmente, el ácido fosfórico es capaz de retardar el tiempo de fraguado, y el yeso reduce la contracción por secado, al usarse en conjunto con silicato de sodio como activador. Sin embargo, al utilizar ambos aditivos simultáneamente en la misma mezcla, se obtienen resultados distintos. En un estudio se encontró que se reduce el tiempo de fraguado al incluir una mezcla de ácido fosfórico y yeso como aditivos, contrariamente al efecto retardante del ácido fosfórico cuando se usa por sí solo. Además, al usar ambos aditivos se produjo una reducción en la resistencia. [21], [43]

En otro estudio se determinó que al utilizar nano-partículas de óxido de zinc (Nano-ZnO) como aditivo se retarda el endurecimiento de la escoria, ya que se afecta la nucleación del gel $C - (N) - A - S - H$ al adherir Ca^{2+} a una fase de zincato de calcio. Entre otros aditivos retardantes están el fosfato de sodio (ensayado en un estudio con lodo rojo como activador) y el ácido fosfórico (ensayado con silicato de sodio como activador). Para los retardantes basados en fósforo se ha propuesto que el mecanismo retardante consiste en la formación de fases temporales y ligeramente solubles de $Ca(H_2PO_4)_2$ y $CaHPO_4$. Otros potenciales retardantes son el ácido málico, el cloruro de sodio y otras sales inorgánicas, las cuales actúan como aceleradores en bajas dosificaciones, y como retardantes en altas dosis, al usarse con natrosilita ($Na_2Si_2O_5$) como activador. Otro potencial retardante es el ácido tartárico. [11], [44]-[49]

B. Durabilidad

Uno de los fenómenos que afectan la durabilidad de las mezclas de concreto de escoria activada es la **carbonatación**, que produce una reducción en la alcalinidad, lo cual reduce la protección a la corrosión de las barras de acero. La **carbonatación** en este cemento ocurre de forma diferente a lo conocido en el cemento portland, por lo que se han realizado diferentes estudios para poder comprenderla mejor, pero estos han mostrado conflictos entre ellos. Sin embargo, algunas estructuras presentes en Rusia, Ucrania y China han demostrado una alta resistencia a **carbonatación** y a corrosión a lo largo del tiempo. Por lo tanto, queda en duda si la **carbonatación** es una problemática significativa experimentada por este tipo de cemento, aunque se ha comprobado que aumentar la cantidad de escoria reduce la **carbonatación**. [2], [6], [17]

En un estudio Colombiano se evaluó la corrosión de aceros en concreto de escoria activada, por medio de un ensayo electroquímico en cilindros de concreto de escoria de alto horno (GBFS), con silicato de sodio como activador, en acorde a el código ASTM C989-99. Se utilizaron mezclas de concreto con grava y arena de río como agregados, con una relación de agua/cementante de 0.4 y varillas de acero estructural ASTM A706 de 6.35mm de diámetro. Estos se compararon con cilindros de concreto Portland tradicional. El concreto se curó a una humedad relativa entre 90 % y 100 % durante 28 días. Se utilizó una cámara de **carbonatación** a condiciones controladas, este método consiste en acelerar el proceso naturalmente retardado de **carbonatación** de forma artificial, lo cual aumenta la exposición de dióxido de carbono para que sus efectos sean más visibles y medibles al final de los ensayos. [50]

Cabe destacar que este método no es representativo de condiciones de servicio realistas que ocurren de manera más lenta y a una exposición natural de dióxido de carbono, donde el exceso de alcalinos presentes en los poros del cemento tendrán el potencial de mantener el pH interno a un nivel lo suficientemente alto para proteger al acero de manera pasiva. Esto se evidencia en los resultados del estudio Colombiano, donde las probetas de concreto de escoria activada expuestas al medio ambiente presentaron un comportamiento de **pasivación** que perduró durante todo el tiempo de evaluación (1050 horas). [17], [50]

Para las probetas de concreto de escoria activada expuestas a la cámara de carbonatación acelerada, se generó corrosión activa desde las 350 horas de exposición y se estabilizó la pérdida de **pasivación** a partir de las 700 horas, lo cual preservó el estado pasivo hasta la finalización del ensayo. Al comparar con las probetas de concreto Portland, se observó **pasivación** desde el momento de inicio del ensayo (desde la hora 0), que perduró hasta las 2600 horas, donde se observó corrosión activa. Es decir que el concreto de escoria activada mostró una menor resistencia a la carbonatación que el concreto Portland. [50]

En otro estudio separado, se evaluó la durabilidad de varios morteros de diferentes cementos alternativos por medio de pruebas de carbonatación y pruebas de degradación en ácido sulfúrico con pH de 0.5. Se utilizó como activador una solución a base de potasio, oxígeno, hidrógeno y sílice y se encontró que aumentar el contenido de sílice del activador se produjo una mayor degradación en el mortero de escoria activada. Esto parece contradecir lo presentado por el estudio Colombiano descrito anteriormente. Sin embargo, ya que se utilizó un activador distinto, basado en potasio, las propiedades del mortero en este caso no serán las mismas que las del estudio Colombiano, donde se usó silicato de sodio. Además, en ambos estudios se utilizó el método de carbonatación acelerada, que puede no ser indicativo de condiciones realistas de servicio, como se explicó anteriormente y

como se concluyó por [50]. [51]

C. Permeabilidad

La permeabilidad es un parámetro que indica el potencial del concreto de transportar sustancias corrosivas por medio de la penetración de agua o gas dentro de sus poros, que puedan dañar el acero de refuerzo en su interior. A mayor permeabilidad, mayor será el ingreso de sustancias corrosivas como el nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, agua, entre otras. El transporte de estas sustancias depende de diferentes características y del concreto, según se listan a continuación en sus respectivos niveles de dependencia: [52]

- Cobertura del concreto.
 - Estructura de los poros.
 - Conectividad entre poros.
 - Dimensiones.
 - Grosor de la cobertura.
 - Agrietamiento.
- Mecanismos de adhesión del cemento.
 - Tipos de partículas transportadas (átomos, moléculas o iones).
- Condiciones climáticas en la superficie del concreto (microclima).
 - Disponibilidad de agua y de agentes agresivos.
 - Temperatura y presión.
 - Poros llenos de agua.
 - Campos eléctricos.
- Mecanismos de transporte de partículas.
 - **Difusión**
 - Absorción por capilaridad.
 - Penetración por presión hidráulica.
 - Transporte por diferenciales de potencial eléctrico.

En un estudio se determinó el **orden de magnitud** de la permeabilidad de una mezcla de concreto de cemento de escoria activada con silicato de sodio, por medio del método de la flexión de viga. Este método no destructivo consiste en construir una vara esbelta de cemento sin refuerzo, saturarla de agua y someterla a flexión al aplicarle carga en tres puntos. Luego se genera una curva de la relajación hidrodinámica de esfuerzo, la cual gráfica la relajación de esfuerzos conforme el tiempo, causada por una deformación interna del material por el movimiento de agua a través sus poros. En este estudio se determinó que la permeabilidad será reducida al aumentar la cantidad de sílice libre en la solución activadora, por lo que el uso de silicato de sodio es beneficioso en este aspecto en

comparación con otros activadores que no contengan sílice. Además, se compararon los resultados de permeabilidad obtenidos en los ensayos con los resultados ya existentes de pruebas de flexión de viga realizadas en cemento Portland, lo cual indica que el cemento de escoria activada con silicato de sodio alcanza valores de permeabilidad con el mismo **orden de magnitud** que el cemento Portland. Es decir que la mezcla utilizada de cemento de escoria será igual de resistente a la intrusión de sustancias corrosivas que el Portland. [18]

D. Impacto ambiental

De acuerdo con un artículo donde se evaluó el impacto ambiental de diferentes mezclas de cementos alternativos con cemento Portland (comparándolos con el Portland por sí solo), para la producción de una mezcla de escoria (en un 30 %) y cemento Portland se ven menores emisiones de gases de efecto invernadero (en un 25 %). En el artículo también se evaluó el gasto de combustible en la extracción de materiales, generación de energía, transporte, calcinación y curado. Sin embargo, esta sección fue modelada de acuerdo a la ciudad de California, donde no se produce escoria, por lo que se asumió que la escoria sería transportada desde Pensilvania, aumentando considerablemente el consumo de combustible en comparación con otras mezclas. Esto quiere decir que el gasto de combustible en aplicaciones reales será dependiente de la cercanía del sitio donde se produzca la escoria, de forma que esto determinará si se gastará más combustible que con una mezcla tradicional de cemento Portland. [4]

X. Características y diseño de mezclas

Existen varios tipos de escorias de las que se puede producir cemento: fosfórica, de acero y de alto horno, entre otras. La escoria tratada en este trabajo es la escoria de alto horno, siendo la más utilizada en mezclas de escoria activada.

En un estudio se evaluó la influencia de la relación agua/cemento en la trabajabilidad y resistencia de morteros de cemento de escoria activada por silicato de sodio, En este se alcanzó una mayor resistencia con una relación de 0.3. [15], [29]

A continuación se listan las características que debe cumplir una escoria para presentar actividad cementante satisfactoria [13], [39]:

- Debe ser granulada o moldeada en píldoras, con un contenido de fase vítrea entre 85 y 95 %.
- Debe exhibir desorden en su estructura, ya que una menor polimerización en el sílice ocasiona una mayor actividad hidráulica.
- Debe tener un pH básico, es decir que debe contener una razón de $CaO + MgO/SiO_2 > 1$. La escoria básica tiene un mayor potencial hidráulico, ya que el contenido de cal controla su activación, aunque una escoria ácida también puede ser activada mediante un activador alcalino.
- Debe ser granulada a una superficie específica de $400 - 600m^2/kg$, este parámetro tiene un gran impacto en la intensidad y velocidad de activación de la reacción hidráulica.

Las características del gel $C-A-S-H$ y el desempeño del sistema pueden predecirse mediante la razón de $[CaO]/[SiO_2]_{reactivo}$. El contenido de sílice del gel determina su polimerización. A mayor cantidad de sílice, y menor valor de la razón CaO/SiO_2 , se generan cadenas de silicato de mayor longitud. Por lo tanto, un método común para modificar la razón de CaO/SiO_2 en estos sistemas es agregar silicato soluble, lo cual se logra con el uso de silicato de sodio como activador. Al aumentar el contenido de sílice se forman geles más compactos, densos, y más polimerizados con buenas propiedades mecánicas, alcanzando una resistencia mayor a 80 MPa a los 28 días. [13], [34], [53]

A. Composición química del activador

Los efectos en la micro estructura de la mezcla dependen en gran medida del anión presente en el activador utilizado, a continuación se describen los efectos de diferentes aniones en la microestructura de las mezclas.

1. Efecto del OH^-

Este anión está presente en el hidróxido de sodio y es un catalizador de la disolución de los cationes Si^{4+} y Al^{3+} . Este anión cataliza las reacciones hidrolíticas involucradas en varias etapas de la activación alcalina, al mismo tiempo que eleva el pH a los niveles requeridos para que se genere

la disolución del silicato y para otras reacciones consecuentes. Un pH básico (arriba de 11) favorece la disolución de la escoria y la formación de hidratos estables, lo cual aumenta las propiedades cementantes en la mezcla. [13], [14], [54], [55]

El aluminio experimenta una mayor solubilidad en valores bajos y altos de pH, con una menor solubilidad alrededor del pH de 6.3. La solubilidad favorece la formación de compuestos que contienen el Al^{3+} y que reaccionan con el sílice. Esto, a su vez, favorece la polimerización y formación de geles $N - A - S - H$ o $C - A - S - H$, los cuales son determinantes para las propiedades de resistencia de las mezclas. [13]

Sin embargo, no es favorable tener altas concentraciones de OH^- , ya que el calcio se hace menos soluble conforme aumenta el pH, hasta llegar al pH de 6.3 donde comienza a aumentar la solubilidad. Ya que el cemento de escoria tiene altas cantidades de calcio, es beneficioso tener concentraciones bajas del activador para disminuir el pH y mejorar la solubilidad del calcio. En consecuencia, la concentración de hidróxido de sodio requerida para activar el cemento de escoria es menor que para otros cementos alternativos con menores cantidades de calcio. Sin embargo, al utilizar altas concentraciones del activador (por encima del 5 % del peso de la escoria) no se produce un aumento significativo en la resistencia de una mezcla, mientras que se aumenta la fragilidad del material y el costo de producción, ya que altas dosis de activador tendrá un mayor costo. [13]

2. Efecto de los silicatos

Las soluciones de silicatos (como el silicato de sodio) son comúnmente utilizadas como activadores alcalinos. En este tipo de sistemas, el sílice soluble es importante para la trabajabilidad, velocidad de fraguado y desarrollo de resistencia de las mezclas, ya que afecta la composición del gel y la micro-estructura del material. [13]

La fórmula general para las soluciones de silicatos es la siguiente: $xSiO_2/R_2O$, donde $R = Na, K$ o Li ; y x = la razón molar. De estas tres opciones, el Na es la más comúnmente utilizada, formando silicato de sodio. Todas estas soluciones pueden modificarse por dilución en agua desionizada o agregando alcalinos adicionales para cambiar la razón molar. Las soluciones con una razón molar baja (no más de 1/1) consisten de monómeros (SiO_4^{4-}) y dímeros ($Si_2O_5^{2-}$), mientras que una solución con una razón molar mayor (al menos 3.3/1) tiene una mayor proporción de polímeros. El pH de la solución depende de la razón molar de SiO_2/R_2O . En valores de pH menores de 10, la solución comienza a consolidarse en un gel. Para evitar esto, es necesario controlar la razón de SiO_2/R_2O y elevar el pH. Esto usualmente se logra agregando alcalinos en la forma de una solución de $NaOH$. El resultado es una solución que entra en la categoría conocida como “waterglass” en inglés ($xSiO_3.yNa_2O.nH_2O$), o silicato de sodio en español. [13]

Las soluciones de silicato de sodio contribuyen al desarrollo de resistencia en dos maneras: actuando como activador alcalino e induciendo la formación de un gel primario con alto contenido de sílice. Este gel se forma cuando los sílices solubles reaccionan con los iones Ca^{2+} presentes en la escoria para formar un silicato hidratado de calcio de tipo $C - S - H/C - A - S - H$ rico en sílice. Los productos formados presentan alta resistencia y una alta contracción por secado, como se ha discutido anteriormente. [13]

El contenido óptimo de Na_2O en la solución es alrededor de 4 % del peso de la escoria, dependiendo de la naturaleza y finura de esta, así como de las condiciones de curado. Además, el

contenido óptimo de SiO_2/Na_2O está alrededor de 0.75 a 1.25 para escoria ácida, 0.9 a 1.3 para escoria neutra y 1 a 1.5 para escoria básica. [13], [56], [57]

3. Efecto de los carbonatos

El uso de carbonatos como activadores alcalinos se ha investigado debido a que su producción tiene un menor impacto ambiental que los silicatos y los hidróxidos. Sin embargo, han tenido menos uso que otros activadores debido a que generan un desarrollo de resistencia mucho más lento que los hidróxidos y los silicatos. A pesar de esto, se ha utilizado en proyectos, edificaciones y en obra civil en Europa central y en Europa del este los últimos 50 años. [58], [59]

Al inicio de la reacción entre la escoria y el carbonato (Na_2CO_3), los carbonatos de calcio y combinaciones de carbonatos de sodio y carbonatos de calcio forman sales dobles, debido a la interacción entre el CO_3^{2-} presente en el activador y el Ca^{2+} liberado por la escoria. Debido a la formación de estos carbonatos y al pH más bajo de esta solución, se experimenta una mayor pérdida en la plasticidad de la mezcla y un período de inducción más largo (el período de tiempo justo después de la hidratación inicial de la mezcla en el que la cantidad de calor liberado y la velocidad de hidratación son bajos. Este período dura de una a dos horas para el cemento Portland, durante el cual la mezcla tiene buena trabajabilidad). Sin embargo, la mezcla no se endurece rápidamente, tardando hasta más de 3 días en casos extremos. Como resultado, en mezclas activadas con carbonatos se genera una menor resistencia inicial que en mezclas con hidróxido de sodio o con silicato como activador, aunque la resistencia a largo plazo puede ser mayor que cuando se activa con hidróxido de sodio. Esto quiere decir que las mezclas activadas con carbonatos pueden ser útiles para aplicaciones donde se requiera un tiempo de fraguado más largo, o donde se requiera que la mezcla mantenga su trabajabilidad por más tiempo. [13]

B. Mezclas de varios tipos de cementos con cemento de escoria

Estos tipos de mezclas son cubiertas por la ASTM C595/C595M. A partir del año 2007, estas mezclas se clasifican bajo el nombre de “Type IS(X)-portland blast furnace slag cement”, donde la “X” es igual al porcentaje de escoria usada en la mezcla. En el año 2009 se agregó la clasificación “Type IT(X)(Y)” para mezclas con tres tipos de cementos, la cual incluye el Portland y la escoria, donde la “Y” es igual al porcentaje del material cementante terciario utilizado. Estas logran una alta resistencia a la corrosión y una baja permeabilidad. [10], [60]

En el proceso de molienda, se pueden moler de forma conjunta el cemento Portland con el cemento de escoria hasta la finura deseada, o se pueden moler ambos cementos por separado, hasta lograr la finura deseada para cada uno, o se pueden combinar ambos procesos, al moler por separado y también en conjunto. [10]

1. Comportamiento hidráulico

En estas mezclas binarias, el cemento Portland tiene suficiente alcalinidad para acelerar la reacción de hidratación de la escoria, lo cual elimina la necesidad de uso de un activador alcalino. Esta

hidratación depende de la descomposición de la estructura de la escoria, por medio de iones de hidroxilo liberados durante la hidratación del cemento Portland. ([10], p. 5)

Varios estudios realizados en los años 80 implican que la hidratación de la escoria en combinación con cemento Portland sucede en dos fases. En la hidratación temprana, la reacción con hidróxido alcalino es la predominante, pero el resto de la reacción es principalmente con cal hidratada. Durante ambas fases, la hidratación de la escoria es más lenta que la del cemento Portland. ([10], p. 5)

Al aumentar la temperatura, los hidróxidos alcalinos del cemento tienen mayor solubilidad. Por esta razón, predominan en la generación de las reacciones tempranas del cemento de escoria. La contribución de la escoria a la formación de una mayor resistencia temprana es más significativa a temperaturas altas de curado, como sucede en la fundición de elementos estructurales de gran tamaño. Ya que en los ensayos de cubos estándar se utilizan muestras pequeñas, esta característica de elevar la resistencia temprana a altas temperaturas no será evidente en estos ensayos. ([10], p. 5; [61])

2. Comportamiento mecánico

Debido al uso común de cemento de escoria en combinación con cemento Portland y gracias a la variedad de estudios que se han realizado para analizar las propiedades de estas mezclas, se conoce que la adición de escoria puede mejorar el rendimiento del concreto, tanto fresco como endurecido, además de generar una trabajabilidad mejorada, una mayor resistencia última y una mayor resistencia al ataque de sulfatos y a la penetración de iones cloruros. Además, se experimenta una menor temperatura de fraguado, una menor permeabilidad y una mayor resistencia a largo plazo. Por estas razones se han utilizado estas mezclas para estribos de puentes colocados sobre ríos, así como edificaciones en regiones donde las condiciones climáticas requieren resistencia a sulfatos. Se puede asumir que estas mezclas podrán cumplir con la clasificación MRS (moderada resistencia a sulfatos) de el código NTG 41014. ([10], [61]-[63])

Entre los factores que determinan las propiedades cementantes de las mezclas binarias se incluyen: la composición química del cemento de escoria y del cemento Portland, la concentración de iones alcalinos del sistema de reacción, el contenido de sílice en el cemento de escoria, la finura de ambos cementos y la temperatura durante las etapas tempranas del proceso de hidratación. Debido a la complejidad de los factores influyentes, se ha determinado que las formas más satisfactorias de medir la efectividad del cemento de escoria en concreto y mortero son las evaluaciones directas de trabajabilidad, resistencia y durabilidad. Para evaluar el potencial relativo de actividad cementosa de un cemento de escoria específico, comúnmente se utiliza el índice de actividad planteado en la ASTM C989/C989M. Además, para determinar las proporciones de una mezcla para lograr ciertos requerimientos de desempeño, se deben realizar pruebas con concreto que incluya los mismos materiales a utilizar en la fundición. Entre otras normas a tomar en cuenta está la ASTM C595/C595M, que cubre mezclas de varios tipos de cementos, y la ASTM C1157/C1157M que cubre las especificaciones de desempeño para cementos hidráulicos para mezclas binarias y terciarias, entre otros temas. ([10], p. 5-6)

Según un estudio incluido en la revista de materiales del ACI donde se utilizaron 15 mezclas en condiciones adiabáticas con cemento Portland y cemento de escoria, con resistencias esperadas de 5075, 10,150 y 14500 psi, de las cuales el porcentaje de escoria del contenido total de cemento era de 0, 20, 35, 50 y 70 por ciento; se obtuvo una resistencia temprana más baja al aumentar la cantidad

de escoria, para las mezclas curadas a 20°C. Por otro lado, para las mezclas curadas a temperaturas más altas, entre 20° y 45°, se obtuvieron resistencias tempranas más altas al aumentar el contenido de escoria. Además, se produjo una reducción en el calor liberado en el fraguado, especialmente en las mezclas de resistencia mayor a 10,150 psi con 50 % y 70 % de escoria según el total de material cementante. Estos resultados evidencian que se alcanzan mayores resistencias tempranas al aumentar la cantidad de escoria y en temperaturas altas de curado, al mismo tiempo que se reduce el pico de temperatura alcanzado en el fraguado. Se argumenta que las condiciones adiabáticas de este estudio serán similares a las de un caso de fundiciones masivas de concreto, donde es común utilizar altas cantidades de escoria para reducir el pico de temperatura liberada en el fraguado, lo cual reducirá el riesgo de agrietamiento por temperatura. [61]

En el estudio también se buscó encontrar un modelo matemático que predijera el desarrollo de resistencia de las mezclas binarias en función al tiempo de maduración, de acuerdo a los resultados experimentales de las pruebas de resistencia a compresión realizadas. Sin embargo, se concluyó que las funciones existentes que se utilizan con el cemento Portland no logran predecir la resistencia de las mezclas con cemento de escoria con suficiente precisión. [61]

C. Mezclas con cemento de escoria y un activador sólido

En años recientes se han desarrollado nuevos tipos de mezclas que utilizan un activador en estado sólido incorporado con el cemento, en vez de una solución líquida, de manera que se evite la necesidad de manejar estas soluciones que son corrosivas y difíciles de manejar en trabajos de fundición en obra. Estas mezclas nuevas están compuestas de un precursor de aluminosilicato (escoria de alto horno, ceniza volante, etc.), un activador sólido granulado, agregados, agua y aditivos según se requiera. Ya que estas mezclas se endurecen solo agregando agua, se facilita el manejo en fundiciones “in situ”. [11]

El precursor más comúnmente utilizado para estas mezclas es la ceniza volante, pero también existen las mezclas con cemento de escoria de alto horno por sí solo, así como escoria adicionada con ceniza volante clase F (con bajo contenido de calcio según el estándar ASTM C618), ya que la escoria mejora la reactividad de la ceniza. Además, al utilizar escoria más fina se incrementa la resistencia a la compresión. Al incluir silicato de sodio sólido como activador, se ha demostrado que la razón óptima de peso de escoria contra el peso del activador es de 5:1, para maximizar la resistencia a la compresión, mientras que una razón de 4:1 o de 6:1 resulta en una menor resistencia. [11], [64]

1. Activadores alcalinos

Los activadores sólidos utilizados para este tipo de mezclas pueden ser cualquier sustancia que provee cationes alcalinos, que eleve el pH y que facilite la disolución. Entre los activadores sólidos comúnmente utilizados con diferentes precursores están los siguientes: hidróxido de sodio ($NaOH$), silicato de sodio (Na_2SiO_3), metasilicato de sodio pentahidratado ($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$), carbonato de sodio (Na_2CO_3), aluminato de sodio ($NaAlO_2$), sulfato de calcio ($CaSO_4$), sulfato de sodio (Na_2SO_4), hidróxido de potasio (KOH), lodo rojo (un subproducto de la producción de alúmina usando bauxita, por medio del proceso de Bayer), tallo de maíz y cenizas de mazorca, (ambos residuos provenientes de actividades agrícolas). Los activadores que han sido utilizadas con

la escoria en diferentes estudios son los siguientes: silicato de sodio, $(Na_2SiO_3)_nO$, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, cal y cal hidratada. Para los silicatos de sodio sólidos de uso comercial, se tiene un módulo (razón de SiO_2/Na_2O) entre 0.93 y 3.32 en diferentes estudios. El silicato de sodio, con un módulo de 0.93, resultó en una mayor resistencia a la compresión y una mejor trabajabilidad que el $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ (módulo de 1.00) y que el $Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$ (módulo de 2.06) según un estudio realizado en mezclas con ceniza volante y en mezclas con escoria, con y sin lima hidratada. En cuanto a los otros activadores, la cal y la cal hidratada aportan cationes alcalinotérreos en lugar de cationes alcalinos, lo cual facilita la formación de diferentes fases de unión en el gel del cemento en comparación con sistemas con un bajo contenido de calcio. En un estudio se demostró la cal es un activador más eficiente para la escoria de alto horno que la cal hidratada, aunque la cal genera una mayor temperatura de fraguado. El carbonato de sodio se extrae de recursos geológicos en la forma de trona ($Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3 \cdot 2H_2O$), por lo que es una alternativa viable para la activación alcalina de la escoria. Finalmente, el $NaAlO_2$ tiene la propiedad beneficiosa de proporcionar aluminio reactivo al sistema. Cada activador tiene diferentes propiedades y beneficios, sin embargo, la elección del activador utilizado dependerá de las características deseadas en la mezcla y de la disponibilidad en el mercado. [11], [65]-[67]

a. Desventajas de los activadores:

- *NaOH* sólido: Es corrosivo, higroscópico (es decir que absorbe humedad), y forma carbonato de sodio cuando está expuesto a dióxido de carbono. Actualmente la producción mundial de este material es limitada, se producen unas 60 megatoneladas por año por medio del proceso de cloro-álcali, el cual genera cloro (Cl_2) como un subproducto y el mercado mundial para este cloro es limitado. Por lo tanto, la producción de *NaOH* es limitada por la velocidad con la que se puede vender el cloro generado, según la demanda del mercado. [11], [68], [69]
- Silicatos alcalinos sintéticos (Na_2SiO_3 , $(Na_2SiO_3)_nO$): La producción de estas sustancias tiene un alto gasto energético, causando altos costos y una alta huella de carbono.
- Carbonato de sodio (Na_2CO_3): Libera dióxido de carbono si se utiliza con la calcinación a altas temperaturas de los precursores. [11]

Para evitar la liberación de dióxido de carbono con el carbonato de sodio, en un estudio se utilizó escoria de alto horno y vapor de sílice como precursores sin calcinar, así como carbonato de sodio sólido y cal muerta como activadores, resultando en una resistencia a compresión a los 28 días de 50 y 85 MPa aproximadamente (7250 y 12330 psi) a 25 y 85°C de temperatura de curado respectivamente. Se puede observar que se alcanzó una mayor resistencia con un curado a alta temperatura. [11], [70]

2. Aditivos

Así como con los activadores líquidos, las mezclas con activadores sólidos no son compatibles con muchos aditivos reductores de agua, debido a la alta alcalinidad presente en las mezclas.

Una de las características principales de estas mezclas es que se endurecen rápidamente, debido al calor generado por la disolución del activador sólido, por lo que puede ser beneficioso utilizar un

aditivo retardante. [11] Sin embargo, no se cuenta con información de investigaciones que estudien retardantes para las mezclas con activadores sólidos, según [11] no existían tales estudios en el año 2018. Por lo tanto, si se requiere utilizar un retardante en un proyecto para una mezcla de activador sólido, una posible alternativa es utilizar aquellos que funcionan con mezclas de activador líquido, pero será necesario realizar ensayos para determinar que la mezcla tenga las propiedades deseadas de resistencia, velocidad de fraguado, contracción, etc. En la sección IX.A.4 se describen algunos aditivos con diversos efectos sobre las mezclas con activadores líquidos.

3. Mezclas con cemento Portland

En un estudio se prepararon dos mezclas compuestas de un 20 % de cemento Portland ordinario y 40 % de escoria de alto horno, así como un 40 % de caolín deshidroxilado (metacaolín) o de bentonita respectivamente. Ambas mezclas contenían 5 % de carbonato de sodio sólido como activador. La mezcla con metacaolín contenía un 50 % de agua según el contenido de sólido, mientras que la mezcla con bentonita contenía un 30 % de agua. Esto resultó en una diferencia en la resistencia a la compresión de las mezclas, 32 MPa y 15 MPa respectivamente, demostrando el efecto del contenido de agua sobre el desarrollo de productos y de resistencia en los sistemas. [11], [71]

XI. Otras aplicaciones

A. Uso en reparación de estructuras de concreto expuestas a fluidos corrosivos

Para la remediación de concretos en contacto directo con agua de mar, una alternativa es una mezcla de recubrimiento compuesta por metacaolín y escoria con un activador alcalino. Al aplicar una o varias capas de mezcla se puede reducir o hasta detener la inserción de fluidos corrosivos al concreto. Para esta aplicación se debe utilizar una mezcla que tenga una baja permeabilidad, un bajo nivel de contracción, que logre una unión fuerte con el concreto existente y que complete el fraguado en menos de 6 horas (la mitad del tiempo en el que cambian las mareas). Al utilizar metacaolín con un 50 % de escoria se logran tiempos de fraguado inicial y final de 35 y 55 minutos respectivamente, aunque se recomienda limitar el contenido de escoria a menos de 30 % (si no se utilizan otros aditivos que afecten el tiempo de fraguado) para evitar problemas en obra por el rápido endurecimiento. Cabe notar que el activador utilizado en el estudio que produjo estos resultados fue silicato de sodio. [60], [72]

Otro factor que afecta el tiempo de fraguado es la temperatura de curado. En el estudio anteriormente mencionado, usando metacaolín y escoria a 90 % y 10 % respectivamente, se reduce el tiempo de fraguado final a menos de la mitad (unos 150 minutos) al aumentar la temperatura de 20° a 25°C. Al curar a 35°C se reduce el tiempo de fraguado final a una hora, de forma que el fraguado final ocurre unos pocos minutos después del fraguado inicial. Sin embargo, un tiempo menor a 30 minutos puede evitar que la mezcla humedezca el concreto y penetre en él adecuadamente. Por lo tanto, para lograr un tiempo de fraguado aceptable, por debajo de 6 horas y por encima de 30 minutos, es necesario ajustar la proporción de escoria utilizada, la concentración del activador y su proporción de SiO_2/Na_2O . [60], [73], [74]

El problema mas importante para esta aplicación es la contracción, tanto por secado como la contracción autógena, debido a que forma grietas por las que fluidos corrosivos pueden penetrar en el concreto y corroer el acero de refuerzo. Para la mezcla evaluada anteriormente se determinó que se experimenta una contracción nula al curar por sumergido en agua de mar, mientras que al curar al aire libre se obtuvo un 0.21 % de contracción volumétrica. Se comprobó que el principal factor que afecta a esta contracción es la humedad del ambiente. Sin embargo, se logró controlar esta contracción (en condiciones de laboratorio) agregando un 0.4 % de fibras de polipropileno y de 1 a 2 % de agentes de expansión basados en MgO . [60], [72]

B. Uso en estabilización de suelos

Existe una gran variedad de estudios donde se evaluó el desempeño de las mezclas de cemento de escoria de alto horno, en conjunto con otros compuestos, para la estabilización química de suelos. Se han utilizado mezclas de escoria y yeso rojo, alcanzando la mayor resistencia al cortante a una razón de yeso rojo-escoria de 10:90; o si se busca utilizar la mayor cantidad de escoria posible, 50:50, donde de igual manera se alcanzó buena resistencia. En ensayos posteriores se encontró que se alcanzan resistencias menores en suelo saturado al usar escoria en comparación con el cemento Portland. Sin embargo, la escoria alcanzó una mayor resistencia que el Portland en suelo no saturado. En otros estudios se ha utilizado escoria de alto horno activada con cal, escoria y cemento Portland (categoría CEM-II de menor calor de hidratación), escoria y cal viva, así como escoria y

ceniza volante pulverizada. [75]-[77]

Debido a la necesidad de un alto pH para la reacción de fraguado de la escoria, si un suelo contiene un pH bajo, se recomienda utilizar un activador alcalino, (se ha utilizado cal en ciertos estudios de estabilización de suelos) y comprobar por medio de ensayos que se logre la resistencia deseada. En un estudio se alcanzó una resistencia al cortante baja en dos suelos específicos, un suelo arcilloso de Londres y un suelo turboso, para este último se atribuyen los resultados al alto contenido de agua y de materia orgánica y al bajo pH del suelo. Se puede concluir que se requiere de mas investigación para determinar un método apropiado para estabilizar estos suelos. Por lo tanto, para el uso de cemento de escoria de alto horno en futuras aplicaciones de estabilización de suelos es importante realizar un estudio de suelos previo para determinar las características químicas del suelo, de forma que se conozca el pH, contenido de agua y contenido de materia orgánica, para poder determinar si será efectivo el cemento de escoria para dicha aplicación, ya que es común que se obtengan diferentes resultados de resistencia según el tipo de suelo, la humedad y la mezcla utilizada. De todas maneras, se han alcanzado resistencias mas altas en comparación con el cemento Portland (categoría CEM-I y CEM-II) y la cal en varios estudios donde la composición química del suelo fue compatible con la escoria. [75]-[79]

XII. Casos de uso en proyectos de construcción

Según la información proporcionada por la “Slag Cement Association”, el cemento de escoria de alto horno ha sido utilizado en diversos proyectos en los Estados Unidos, incluyendo carreteras de concreto, aeropistas, puentes, edificios, entre otras estructuras varias. A continuación se describen algunos casos notorios, según la información disponible en su sitio web. Cabe destacar que esta información es proporcionada por la misma organización que produce y vende el cemento de escoria, por lo que existe un conflicto de interés que pone en duda la veracidad de lo estipulado. Aún así se incluye a continuación para proveer un marco de referencia de posibles casos de uso para el cemento de escoria activada en combinación con cemento Portland y se recomienda verificar por medio de ensayos cualquiera de las características declaradas.

A. Embalse Akron Hazel

Un embalse de almacenamiento para aguas residuales, con una capacidad de 17 millones de litros. La construcción incluyó $8000m^3$ de concreto fundido en obra, de los cuales se incluyó cemento de escoria en las masas de concreto, en los muros estructurales y en los accesorios de concreto para cumplir con los requerimientos de encogimiento, permeabilidad y temperatura de fraguado de las masas de concreto, para lo cual fue beneficiosa la escoria. Se utilizaron mezclas con una resistencia de 3000 a 8000 psi (21 a 55 MPa), con 18 a 35 % de escoria como reemplazo de cemento. [80]

B. Puente CSVT

Construido sobre el Río Susquehanna en el estado de Pensilvania, Estados Unidos, es un puente de 15 luces compuesto por estribos o pilares de concreto de 20 a 60 metros de alto, con vigas de acero en su sección transversal. El proyecto contiene $47000m^3$ de concreto reforzado con cemento de escoria, (de 25 a 50 % del total de material cementante), reduciendo la permeabilidad y la corrosión del acero de refuerzo y generando mejoras en la resistencia, en la durabilidad y en la resistencia a los **desheladores** (utilizados para reducir la formación de hielo y escarcha en el concreto en regiones con bajas temperaturas). Para este proyecto se tuvo que bombear la mezcla durante las inundaciones de invierno y primavera, para lo cual fue necesario diseñar una mezcla especializada con cemento de escoria, que cumpliera con el requerimiento de reología. [81]

C. Edificio El Lumen

Es un edificio de 121 m de alto en el “Playhouse Square” en Cleveland, Ohio. Es un proyecto de $56,000m^2$, incluyendo un parqueo para 528 automóviles. Para el concreto fundido en obra se utilizaron resistencias de 6000, 8000 y 10,000 psi (41, 55 y 69 MPa) incluyendo losas interiores post-tensadas y reemplazando de 20 a 40 % del cemento con cemento de escoria. La escoria proveyó mayor resistencia y durabilidad, así como una menor permeabilidad y esfuerzos internos por temperatura (reduciendo el agrietamiento por temperatura). Adicionalmente, la escoria causa un color más claro en el concreto, lo cual fue favorable para el diseño arquitectónico del edificio. Para la cimentación, se utilizó un sistema de cimentación flotante con una resistencia de 6000 psi, en la

que se utilizó un 40 % de cemento de escoria para mejorar la resistencia y reducir los esfuerzos por temperatura. Para los parqueos se utilizó un 20 % de escoria en las losas post-tensadas y vigas post-tensadas para asegurar la protección contra el ataque de sulfatos, como es necesario con el clima de Cleveland. Para las losas post-tensadas de los demás pisos se utilizó un 22 % de escoria, junto con un superplastificante de policarboxilato (aumenta la reología) y aditivos acelerantes, para lograr una fundición a paso rápido, de forma que se endurecieran las losas en un solo día. [82]

XIII. CONCLUSIONES

- Las mezclas con cemento de escoria presentan diferentes características dependiendo del activador utilizado, de su concentración y su cantidad. La composición química de la escoria varía según la fuente del material y según las impurezas presentes, lo cual puede causar inconsistencias en el comportamiento de las mezclas con el cemento de escoria. Por esta razón es necesario realizar ensayos para comprobar las características físicas y químicas de la escoria, así como el comportamiento mecánico de las mezclas, para garantizar que se cumplan los requerimientos de un proyecto específico. Aumentar la finura de la escoria mejora su reactividad, así como la resistencia, velocidad de fraguado y requerimiento de agua de las mezclas. Para alcanzar una trabajabilidad aceptable con buena resistencia temprana se recomienda una finura alta, con superficie menor a $1500 \text{ m}^2/\text{kg}$.
- Al utilizar silicato de sodio como activador en mezclas con escoria de alto horno como único cemento, se presenta una mayor resistencia, pero se acelera el fraguado y se presenta una mayor contracción y agrietamiento. Para retardar el fraguado es útil aumentar el tiempo de mezclado e incluir aditivos como las nano-partículas de óxido de zinc o el ácido fosfórico. Para reducir la contracción son útiles los agentes reductores basados en alcohol oxialquileno y el agente de magnesia. Sin embargo, si se desean aplicar estos aditivos en un proyecto será necesario realizar ensayos para comprobar que se generen los resultados deseados, ya que es posible que los distintos aditivos no funcionen apropiadamente al combinarse entre sí. Existen otras sustancias alcalinas que pueden actuar como activadores para el cemento de escoria, formando mezclas con distintas características y composición química, pero son menos comunes y se requieren más estudios para demostrar sus efectos al combinarse con diversos aditivos.
- En mezclas de cemento de escoria sin cemento Portland, para alcanzar una resistencia adecuada se recomienda utilizar una relación agua/cemento de 0.3. Se recomienda utilizar el curado a alta temperatura para mayores resistencias, aunque si se utiliza curado a temperatura ambiente se puede compensar la pérdida de resistencia correspondiente aumentando la concentración del activador. Por otro lado, al alterar la composición química de una mezcla sin Portland se pueden obtener diferentes características. Al agregar óxido de magnesio a pastas de cemento activadas con silicato de sodio se aumenta la resistencia a los 28 días de 50 a 80 %. Al agregar óxido de aluminio se retarda el fraguado y se disminuye la resistencia temprana en morteros, mientras que en concreto se eleva la resistencia a 28 días hasta un 31 % según resultados experimentales. Para estas mezclas el producto principalmente responsable de la formación de resistencia es el gel $C - A - S - H$ o $N - A - S - H$, distintos al gel $C - S - H$ característico del cemento Portland.
- Entre la normativa que rige el uso del cemento de escoria de alto horno se incluye el código Guatemalteco NTG 41095, que incluye requerimientos para cementos hidráulicos sin limitar los componentes del cemento, el código Norteamericano ASTM C989/C989M que especifica características físicas y químicas para la escoria específicamente, así como el código ASTM C1073 que describe el método de ensayo usado para determinar la actividad hidráulica de una escoria y la finura requerida. Además, en estudios se han desarrollado ecuaciones empíricas para mezclas con únicamente cemento de escoria activada, para predecir la resistencia a la compresión ($f'c$) y la resistencia a la tensión (ft) a lo largo del tiempo, la resistencia al cortante directo (τ) y la adherencia acero-concreto (τ'), así como el esfuerzo según la deformación.

Sin embargo, estas solamente pueden utilizarse para mezclas que usen los mismos activadores que se incluyeron en los estudios donde fueron determinadas (hidróxido de calcio adicionado con silicato de sodio o carbonato de sodio). Es posible desarrollar nuevas ecuaciones para mezclas que usen otros activadores mediante el método de redes neuronales artificiales y el método de sistemas interfaciales neuro-difusos adaptativos (modelos computacionales que utilizan una inteligencia artificial con aprendizaje autónomo) para modelar la resistencia a la compresión, así como el método de empuje para la resistencia al corte directo, entre otros métodos.

- Las mezclas con cemento Portland adicionado con cemento de escoria (regidas por el código ASTM C595/C595M) son capaces de cumplir con la clasificación de cementos MRS (moderada resistencia a los sulfatos) según el grado de resistencia a sulfatos que logren desarrollar. Además, las mezclas de cemento de escoria activada con silicato de sodio o con hidróxido de sodio pueden cumplir la clasificación de cemento AR (de alta resistencia inicial), por el fraguado rápido que experimentan, si se incluyen aditivos para corregir la contracción y agrietamiento. Al activarse con carbonato de sodio, pueden cumplir con la clasificación de cemento tipo UG. Todo esto deberá comprobarse con ensayos de laboratorio según la normativa.

XIV. RECOMENDACIONES

- La información proveída por este trabajo profesional cubre solamente a la escoria de alto horno de la fundición de hierro, no se cubren otros tipos de escoria, como la escoria del horno de arco eléctrico o la escoria de la fundición de otros metales, ya que estas tendrán diferentes composiciones químicas y distintas interacciones con aditivos y con activadores, por lo que no deben confundirse con la escoria de alto horno. Para poder utilizar otros tipos de escoria se deberán realizar investigaciones y/o estudios para determinar sus características de forma previa a su uso en proyectos.
- Para implementar un cemento de escoria activada en un proyecto en Guatemala, será necesario determinar el activador más apropiado según la disponibilidad y el precio en el mercado local del proyecto, ya que los costos de producción y de transporte serán determinantes en la rentabilidad del proyecto.
- Es necesario realizar ensayos según la normativa antes descrita para determinar las propiedades en una mezcla en caso que no se utilice un activador convencional, si se opta por combinar dos activadores o si se incluyen aditivos no mencionados en este trabajo o alguna combinación de los mencionados.
- Para utilizar una escoria de alto horno como cemento, es necesario procesarla y granularla de forma apropiada, como se describió anteriormente en este documento, para asegurar la actividad cementante y una actividad hidráulica aceptable.
- Los cementos alternativos son materiales que tienen potencial para su uso en proyectos en Guatemala, por ende se recomienda realizar mayor investigación sobre estos cementos, incluyendo el cemento de escoria, para que puedan ser implementados en este y en otros países de Latinoamérica.

XV. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Kühl, *No Title*, 1908.
- [2] R. J. Thomas, H. Ye, A. Radlińska y S. Peethamparan, “Alkali-Activated Slag Cement Concrete: A closer look at a sustainable alternative to portland cement,” *Concrete International*, n.º January, págs. 33-38, 2016.
- [3] A. R. Sakulich, S. Miller y M. W. Barsoum, “Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 93, n.º 6, págs. 1741-1748, 2010, ISSN: 00027820. DOI: [10.1111/j.1551-2916.2010.03611.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03611.x).
- [4] S. A. Miller y R. J. Myers, “Environmental Impacts of Alternative Cement Binders,” *Environmental Science and Technology*, vol. 54, n.º 2, págs. 677-686, 2020, ISSN: 15205851. DOI: [10.1021/acs.est.9b05550](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05550).
- [5] R. J. Becker, T. C. Holland y F. S. Malits, “Structural Concrete Using Alternative Cements,” n.º June, págs. 39-44, 2019.
- [6] ACI (American Concrete Institute), *ACI ITG-10R-18 Practitioner’s Guide for Alternative Cements*. Farmington Hills, MI, 2018, ISBN: 978-1-64195-009-1.
- [7] COGUANOR (Comisión Guatemalteca de Normas), *NTG 41095 Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*. Guatemala, 2018.
- [8] Cementos Progreso, *CEMENTO UGC*. dirección: <http://elmastilgt.com/web/products/cemento-ugc/> (visitado 07-09-2020).
- [9] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese y J. Tanesi, “Cementos Portland, Cementos Adicionados y otros Cementos Hidráulicos,” *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, págs. 25-76, 2004.
- [10] ACI (American Concrete Institute), *233R-17 Guide to use of slag cement in concrete and mortar*. Farmington Hills, MI, 2017, págs. 0–15.
- [11] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen y M. Illikainen, “One-part alkali-activated materials: A review,” *Cement and Concrete Research*, vol. 103, n.º October 2017, págs. 21-34, 2018, ISSN: 00088846. DOI: [10.1016/j.cemconres.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001).
- [12] Slag Cement Association, *Producing and Placing Slag Cement Concrete*, 2021. dirección: <https://www.slagcement.org/aboutslagcement/is-05.aspx>.
- [13] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo y A. Fernández-Jiménez, *Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders*. Woodhead Publishing Limited, 2015, págs. 49-73, ISBN: 9781782422884. DOI: [10.1533/9781782422884.1.49](https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.49), dirección: <http://dx.doi.org/10.1533/9781782422884.1.49>.
- [14] F. Puertas, “Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico,” *Materiales de construcción*, vol. 43, n.º 229, págs. 37-48, 1993.

- [15] M. Komljenović, *Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders*. 2015, págs. 171-215, ISBN: 9781782422884. doi: [10.1533/9781782422884.2.171](https://doi.org/10.1533/9781782422884.2.171).
- [16] M. Palacios, P. F. Banfill y F. Puertas, "Rheology and setting of alkali-activated slag pastes and mortars: Effect of organic admixture," *ACI Materials Journal*, vol. 105, n.º 2, págs. 140-148, 2008, issn: 0889325X. doi: [10.14359/19754](https://doi.org/10.14359/19754).
- [17] O. A. Mohamed y M. M. Mustafa, "A review of alkali-activated slag as cement replacement," *Key Engineering Materials*, vol. 803 KEM, págs. 262-266, 2019, issn: 16629795. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.803.262](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.803.262).
- [18] A. Blyth, C. A. Eiben, G. W. Scherer y C. E. White, "Impact of activator chemistry on permeability of alkali-activated slags," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 100, n.º 10, págs. 4848-4859, 2017, issn: 15512916. doi: [10.1111/jace.14996](https://doi.org/10.1111/jace.14996).
- [19] X. Hu, C. Shi, Z. Zhang y Z. Hu, "Autogenous and drying shrinkage of alkali-activated slag mortars," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 102, n.º 8, págs. 4963-4975, 2019, issn: 15512916. doi: [10.1111/jace.16349](https://doi.org/10.1111/jace.16349).
- [20] A. R. Elmore, "Final report on the safety assessment of Potassium Silicate, Sodium Meta-silicate, and Sodium Silicate," *International Journal of Toxicology*, vol. 24, n.º SUPPL. 1, págs. 103-117, 2005, issn: 1092874X. doi: [10.1080/10915810590918643](https://doi.org/10.1080/10915810590918643).
- [21] M. Palacios y F. Puertas, "Effectiveness of mixing time on hardened properties of waterglass-activated slag pastes and mortars," *ACI Materials Journal*, vol. 108, n.º 1, págs. 73-78, 2011, issn: 0889325X. doi: [10.14359/51664218](https://doi.org/10.14359/51664218).
- [22] C. D. Atiş, C. Bilim, Ö. Çelik y O. Karahan, "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar," *Construction and building materials*, vol. 23, n.º 1, págs. 548-555, 2009.
- [23] A. Brough y A. Atkinson, "Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure," *Cement and concrete research*, vol. 32, n.º 6, págs. 865-879, 2002.
- [24] D. Kržan, M. Komljenović y B. Živanović, "The influence of different parameters on the hydration process of binders based on alkali activated slag," *Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 70, n.º 1, págs. 97-105, 2005.
- [25] S.-D. Wang, K. L. Scrivener y P. Pratt, "Factors affecting the strength of alkali-activated slag," *Cement and concrete research*, vol. 24, n.º 6, págs. 1033-1043, 1994.
- [26] F. Collins y J. G. Sanjayan, "Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder," *Cement and concrete research*, vol. 29, n.º 3, págs. 459-462, 1999.
- [27] N. Lim, S. Jeong, J. Her y K. Ann, "Properties of cement-free concrete cast by finely grained nanoslag with the NaOH-based alkali activator," *Construction and Building Materials*, vol. 35, págs. 557-563, 2012.

- [28] R. Kumar, S. Kumar, S. Badjena y S. Mehrotra, “Hydration of mechanically activated granulated blast furnace slag,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 36, n.º 6, págs. 873-883, 2005.
- [29] K. H. Yang, J. K. Song, K. S. Lee y A. F. Ashour, “Flow and compressive strength of alkali-activated mortars,” *ACI Materials Journal*, vol. 106, n.º 1, págs. 50-58, 2009, ISSN: 0889325X. doi: [10.14359/56316](https://doi.org/10.14359/56316).
- [30] A. Nazari, F. Pacheco-Torgal, A. Cevik y J. G. Sanjayan, *Prediction of the compressive strength of alkali-activated geopolymeric concrete binders by neuro-fuzzy modeling: A case study*. Woodhead Publishing Limited, 2015, págs. 217-233, ISBN: 9781782422884. DOI: [10.1533/9781782422884.2.217](https://doi.org/10.1533/9781782422884.2.217). dirección: <http://dx.doi.org/10.1533/9781782422884.2.217>.
- [31] M. B. Haha, B. Lothenbach, G. Le Saout y F. Winnefeld, “Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part I: Effect of MgO,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n.º 9, págs. 955-963, 2011.
- [32] M. B. Haha, B. Lothenbach, G. Le Saout y F. Winnefeld, “Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part II: Effect of Al₂O₃,” *Cement and Concrete Research*, vol. 42, n.º 1, págs. 74-83, 2012.
- [33] COGUANOR, “NTG 41017 h26 Método de ensayo. Resistencia a la extracción por deslizamiento (Pull-out) del concreto endurecido.” n.º 502, 2015.
- [34] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico y J. Rodríguez, “A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, n.º 12, págs. 2043-2056, 2011, ISSN: 09552219. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036).
- [35] K. H. Yang y J. K. Song, “Empirical equations for mechanical properties of Ca(OH)₂-based alkali-activated slag concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 109, n.º 4, págs. 431-440, 2012, ISSN: 0889325X. doi: [10.14359/51683918](https://doi.org/10.14359/51683918).
- [36] ACI (American Concrete Institute), *318-19 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Farmington Hills, MI, 2019, ISBN: 978-1-64195-060-2.
- [37] A. Nazari y F. P. Torgal, “Predicting compressive strength of different geopolymers by artificial neural networks,” *Ceramics International*, vol. 39, n.º 3, págs. 2247-2257, 2013.
- [38] ACI (American Concrete Institute), *ACI PRC-209-92: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (Reapproved 2008)*. Farmington Hills, MI, 1992, pág. 47, ISBN: 9780870311222.
- [39] F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo y P. Chindaprasit, *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier, 2014.
- [40] ASTM International, *ASTM C1073-18, Standard Test Method for Hydraulic Activity of Slag Cement by Reaction with Alkali*. West Conshohocken, PA, 2018. doi: [10.1520/C1073-18](https://doi.org/10.1520/C1073-18). dirección: www.astm.org.

- [41] Y. Wei y W. Hansen, "Early-age strain-stress relationship and cracking behavior of slag cement mixtures subject to constant uniaxial restraint," *Construction and Building Materials*, vol. 49, 2013, ISSN: 09500618. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2013.08.061](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.061).
- [42] Z. P. Bazant, *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. Wiley, 1988.
- [43] J. J. Chang, W. Yeih y C. C. Hung, "Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, n.º 1, págs. 85-91, 2005.
- [44] N. Garg y C. E. White, "Mechanism of zinc oxide retardation in alkali-activated materials: an in situ X-ray pair distribution function investigation," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, n.º 23, págs. 11 794-11 804, 2017.
- [45] C. Gong y N. Yang, "Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n.º 7, págs. 1013-1016, 2000.
- [46] J.-J. Chang, "A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n.º 7, págs. 1005-1011, 2003.
- [47] L. Kalina, V. Bilek, R. Novotn, M. Mončeková, J. Másilko y J. Koplík, "Effect of Na₃PO₄ on the hydration process of alkali-activated blast furnace slag," *Materials*, vol. 9, n.º 5, pág. 395, 2016.
- [48] A. Brough, M. Holloway, J. Sykes y A. Atkinson, "Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n.º 9, págs. 1375-1379, 2000.
- [49] J. S. J. Van Deventer, D. Feng y P. Duxson, *Dry mix cement composition, methods and systems involving same*, US Patent 7,691,198, abr. de 2010.
- [50] W. Aperador Chaparro, M. Gordillo y J. H. Bautista Ruiz, "Evaluación de la corrosión del acero embebido en concreto AAS, expuesto a carbonatación mediante un experimento factorial con medidas repetidas," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 9, n.º 17, págs. 237-260, 2013, ISSN: 17949165. DOI: [10.17230/ingciencia.9.17.12](https://doi.org/10.17230/ingciencia.9.17.12).
- [51] F. Jirasit, "DURABILITY PERFORMANCE OF ALKALI-ACTIVATED METAKAOLIN, SLAG, FLY ASH, AND HYBRIDS," *Ceramic Engineering Science Proceedings*, vol. 37, n.º 7, págs. 3-12, 2016, ISSN: 2252-634X. DOI: DOI:, dirección: lib.unnes.ac.id/6871/1/8479.pdf%5C%0Ahttp://www.albayan.ae.
- [52] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri y R. B. Polder, "Transport Processes in Concrete," *Corrosion of Steel in Concrete*, págs. 21-48, 2005. DOI: [10.1002/3527603379.ch2](https://doi.org/10.1002/3527603379.ch2).
- [53] A. Fernández-Jiménez, F. Puertas, I. Sobrados y J. Sanz, "Structure of Calcium Silicate Hydrates Formed in Alkaline-Activated Slag: Influence of the Type of Alkaline Activator.," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 86, n.º 8, pág. 1389, ago. de 2003, ISSN: 00027820. dirección: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=10544076&lang=es&site=ehost-live>.
- [54] V. Glukhovskiy, "Soil silicate articles and structures," *Russian, Budivel'nyk Publish.*, Kiev, 1967.

- [55] A. M. Fernández Jiménez, “Cementos de escorias activadas alcalinamente: influencia de las variables y modelización del proceso,” 2000.
- [56] S.-D. Wang, X.-C. Pu, K. Scrivener y P. Pratt, “Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems,” *Advances in cement research*, vol. 7, n.º 27, págs. 93-102, 1995.
- [57] S.-D. Wang y K. L. Scrivener, “Hydration products of alkali activated slag cement,” *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n.º 3, págs. 561-571, 1995.
- [58] P. V. Krivenko, “Alkaline cements,” en *Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994*, VIPOL Stock Company, vol. 1, 1994, págs. 11-129.
- [59] C. Shi, P. Krivenko y D. Roy, *Alkali-Activated Cements and Concretes*. 2006.
- [60] Z. Zhang y H. Wang, *Alkali-activated cements for protective coating of OPC concrete*, 1. Woodhead Publishing Limited, 2015, págs. 605-626, ISBN: 9781782422884. DOI: [10.1533/9781782422884.4.605](https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.605). dirección: <http://dx.doi.org/10.1533/9781782422884.4.605>.
- [61] S. J. Barnett, M. N. Soutsos, J. H. Bungey y S. G. Millard, “Fast-track construction with slag cement concrete: Adiabatic strength development and strength prediction,” *ACI Materials Journal*, vol. 104, n.º 4, págs. 388-396, 2007, ISSN: 0889325X. DOI: [10.14359/18828](https://doi.org/10.14359/18828).
- [62] G. Osborne, “Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, n.º 1, págs. 11-21, 1999.
- [63] Slag Cement Association, *Case Studies*, 2021. dirección: <https://www.slagcement.org/casestudies.aspx>.
- [64] P. Duxson y J. L. Provis, “Designing precursors for geopolymer cements,” *Journal of the american ceramic society*, vol. 91, n.º 12, págs. 3864-3869, 2008.
- [65] B. Nematollahi, J. Sanjayan y F. U. A. Shaikh, “Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate,” *Ceramics International*, vol. 41, n.º 4, págs. 5696-5704, 2015.
- [66] C. Li, H. Sun y L. Li, “A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements,” *Cement and concrete research*, vol. 40, n.º 9, págs. 1341-1349, 2010.
- [67] M. S. Kim, Y. Jun, C. Lee y J. E. Oh, “Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag,” *Cement and concrete research*, vol. 54, págs. 208-214, 2013.
- [68] J. Provis, “Alkali-activated binders,” *Cement Concr. Res.*, vol. 114, págs. 40-48, 2018.
- [69] J. Davidovits, “Geopolymer Chemistry and Applications. 4-th edition,” *J. Davidovits.–Saint-Quentin, France*, 2015.
- [70] M. Kovtun, E. P. Kearsley y J. Shekhovtsova, “Dry powder alkali-activated slag cements,” *Advances in Cement Research*, vol. 27, n.º 8, págs. 447-456, 2015.

- [71] I. Garcia-Lodeiro, A. Fernández-Jimenez y A. Palomo, “Cements with a low clinker content: versatile use of raw materials,” *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 4, n.º 2, págs. 140-151, 2015.
- [72] Z. Zhang, X. Yao y H. Zhu, “Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: I. Microstructure and anticorrosion mechanism,” *Applied clay science*, 2010.
- [73] S. Aydin y B. Baradan, “Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, págs. 166-172, 2014.
- [74] S. Hu, H. Wang, G. Zhang y Q. Ding, “Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag,” *Cement and concrete composites*, vol. 30, n.º 3, págs. 239-244, 2008.
- [75] P. Sargent, *The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation*. Woodhead Publishing Limited, 2015, págs. 555-604, ISBN: 9781782422884. DOI: [10 . 1533 / 9781782422884.4.555](https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.555), dirección: <http://dx.doi.org/10.1533/9781782422884.4.555>.
- [76] P. Hughes y S. Glendinning, “Deep dry mix ground improvement of a soft peaty clay using blast furnace slag and red gypsum,” *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 37, n.º 3, págs. 205-216, 2004.
- [77] P. N. Hughes, S. Glendinning, D. A. Manning y M. L. White, “Use of red gypsum in soil mixing engineering applications,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, vol. 164, n.º 3, págs. 223-234, 2011.
- [78] A. Wilkinson, A. Haque y J. Kodikara, “Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: part B,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, vol. 163, n.º 3, págs. 165-172, 2010.
- [79] P. Sargent, P. N. Hughes, M. Rouainia y M. L. White, “The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils,” *Engineering geology*, vol. 152, n.º 1, págs. 96-108, 2013.
- [80] Slag Cement Association, *SLAG CEMENT STORAGE BASIN - Slag Cement Case Study*, 2021. dirección: <https://www.slagcement.org/casestudies/id/94/akron-hazel-storage-basin.aspx#prettyPhoto> (visitado 18-02-2022).
- [81] —, *Slag Cement used in CVST River Bridge Construction - Slag Cement Case Study*, 2021. dirección: <https://www.slagcement.org/casestudies/id/99/csvt-river-bridge.aspx> (visitado 18-02-2022).
- [82] —, *The Lumen at Playhouse Square - Slag Cement Case Study*, 2021. dirección: <https://www.slagcement.org/casestudies/id/105/the-lumen-at-playhouse-square.aspx> (visitado 21-02-2022).
- [83] E. Vidaud, “El “creep” en el concreto Factores que influyen en su desarrollo,” *Construcción y Tecnología en Concreto*, págs. 22-25, 2012.

- [84] *Capilaridad* | Definición de Capilaridad por Oxford Dictionaries en Lexico.com también significado de Capilaridad, Oxford-Dictionaries. Accessed Enero 07, 2021. [Online]. dirección: <https://www.lexico.com/es/definicion/capilaridad>.
- [85] R. Giani, B. Navarrete y J. Bustos, “La retracción autógena y su relación con la tendencia a la fisuración a temprana edad en pavimentos de hormigón,” *Revista de la Construcción*, vol. 7, n.º 2, págs. 62-71, 2008, ISSN: 07177925.
- [86] Cargill Incorporated, *What are liquid deicers?* 2022. dirección: <https://www.cargill.com/what-are-liquid-deicers> (visitado 22-02-2022).
- [87] *Dímero* | Definición de Dímero por Química.es en química.es también significado de Dímero, Química.es. Accessed Octubre 11, 2021. [Online]. dirección: <https://www.quimica.es/enciclopedia/D%C3%ADmero.html>.
- [88] O. Burciaga-Díaz, J. I. Escalante-García y R. X. Magallanes-Rivera, “Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura,” *Revista ALCONPAT*, vol. 5, n.º 1, págs. 58-72, 2015, ISSN: 2007-6835. doi: [10.21041/ra.v5i1.77](https://doi.org/10.21041/ra.v5i1.77).
- [89] *Monómero* | Definición de Monómero por Oxford Dictionaries en Lexico.com también significado de Monómero, Oxford-Dictionaries. Accessed Octubre 11, 2021. [Online]. dirección: <https://www.lexico.com/es/definicion/mon%C3%B3mero>.
- [90] *PASSIVATE* | Definición de PASSIVATE por Oxford Dictionary en Lexico.com y también el significado de PASSIVATE. dirección: <https://www.lexico.com/definition/passivate> (visitado 19-04-2022).

XVI. APÉNDICES

 Hapag-Lloyd HAPAG-LLOYD GUATEMALA S.A. 12 CALLE 2-25 ZONA 10, EDIFICIO AVIA TORRE 3, NIVEL 11, OFICINA 1103, 01010 GUATEMALA CITY GUATEMALA +502 2439 4562 +502 2360 2559	VALID FROM 7/2/2022	VALID TO 8/31/2022	ISSUED ON 7/2/2022
	TELEPHONE +502 24 394562	EMAIL Donny.Rodriguez@hlag.com	
	QUOTATION NO. W220700072324/1		

Unless otherwise specified, all mentioned freight rates are subject to all export/import/freight surcharges valid at time of shipment. Current applicable surcharges are reflected in the below table:

Srv ID	Charge Type	Container	Export Haulage	Import Haulage	Port of Loading	Via Port	Port of Discharge	T/I*	Commodity	Charge Code	Curr.	Amount	Unit of Measure	Not Subject to Charges	Out of Gauge
1	Freight Rate	20'OT	Port	Port	RIZHAO	QINGDAO, CN, MANZANILLO (PA), PA	PORT EVERGLADES, FL	36	FAK		Lumpsum	USD	4000 CTR	THD	N
1	Export Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	ESF	CNY	30 CTR			
1	Export Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	THO	CNY	624 CTR			
1	Freight Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	ACO	USD	768 CTR			
1	Freight Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	CSF	USD	13 CTR			
1	Freight Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	SEP	USD	900 CTR			
1	Freight Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	MFR	USD	583 CTR			
1	Freight Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	PSS	USD	1000 CTR			
1	Import Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	TSD	USD	7 CTR			
1	Export Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	MTD	CNY	400 BIL			
1	Freight Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	SMD	USD	35 BIL			
1	Import Surcharge	20'OT	Port	Port	RIZHAO		PORT EVERGLADES, FL	36	FAK	VAD	USD	1480 CTR			

Chairman of the Supervisory Board: Michael Behrendt
 Executive Board: Rolf Habben Jansen(CEO), Donya-Florence Amer, Mark Frese, Dr. Maximilian Rothkopf
 Registered Office: Hamburg, Company Register: Amtsgericht Hamburg HRB 97937

Figura 1. Cotización de transporte marítimo de 1000 toneladas de escoria, desde el puerto Rizhao, China, hasta el puerto Everglades, Florida.

Cuadro 4
*Concentración de Ciertos Elementos (en %) y las relaciones Ca/Si y Ca/Al de las mezclas de concreto
 producidas con las fórmulas A y C después de 20 meses.*

Fórmula A	Escoria	Cemento - 20 meses		Concreto - 20 meses	
		Producto interno	Producto externo	Producto interno	Producto externo
# de puntos	30	40	40	40	40
Al (%)	4.6±0.3	4.1±0.5	4±0.2	3.9±0.5	4.1±0.4
Si (%)	12.8±0.4	12±1.3	16±1	11.6±1.5	14.5±3.0
Ca (%)	1.5±1	11.9±3.4	3±0.4	11.0±4.0	1.5±0.5
Na (%)	-	1.6±1	5.1±0.6	1.6±1	3.3±1.1
Ca/Si	1.2	1	0.2	0.9	0.1
Ca/Al	3.3	2.9	0.8	2.8	0.4

Fórmula B	Escoria	Producto interno	Producto externo	Producto interno	Producto externo
# de puntos	30	40	40	-	-
Al (%)	4.6±0.2	3.8±0.4	3.2±0.2	-	-
Si (%)	13.2±0.5	11.2±1.1	16.4±1.5	-	-
Ca (%)	17±1	10.4±2.4	2±0.3	-	-
Na (%)	-	3±1	7±1	-	-
Ca/Si	1.3	0.9	0.1	-	-
Ca/Al	3.6	2.8	0.5	-	-

Fórmula C	Escoria	Producto interno	Producto externo	Producto interno	Producto externo
# de puntos	30	40	41	40	40
Al (%)	4.7±0.3	4±0.4	3.1±0.3	4.6±0.6	4.5±0.8
Si (%)	13.2±0.3	10±1.4	9±1	11.8±1.7	11±2
Ca (%)	16±1	9±3	9±1	10.6±3.1	5.3±1.4
Na (%)	-	2±1	3.1±0.3	0.9±0.4	1.7±0.4
Ca/Si	1.2	0.8	1±0.2	0.9	0.5
Ca/Al	3.5	2.2	2.9	2.3	1.2

Fórmula D	Escoria	Producto interno	Producto externo	Producto interno	Producto externo
# de puntos	31	40	40	-	-
Al (%)	4.6±0.3	3.8±0.4	2.9±0.3	-	-
Si (%)	13.2±0.6	11.2±1.6	12±2	-	-
Ca (%)	12±2	12±3	8±1.3	-	-
Na (%)	-	2.2±1.5	4±0.4	-	-
Ca/Si	1.3	1	0.7	-	-
Ca/Al	3.7	3.1	2.7	-	-



CQ-040511

Feel free to call us @ **1-800-CROWLEY**.
(1-800-276-9539) within the US and Canada.
Outside US and Canada: [Click here](#)

Name:	NA	Quotation Date:	Jul 05, 2022
Email Id:	matthew.ortiz@crowley.com	Quotation No.:	CQ-040511
Phone Number:	NA	Case Number:	NA
Account Name:	NA	Cargo Ready For Transport:	Jul 05, 2022
Contract Number:	NA	Valid From - To:	Jul 05, 2022 - Aug 04, 2022
Created By:	Crowley Site Guest User	Port of Loading:	Port Everglades, FL (USPEF)
		Port of Discharge:	Santo Tomas de Castilla, Guatemala (GTSTC)
		Origin Drayage:	NA
		Destination Drayage:	NA

Port	Transit Time	Port	Place of Receipt	Pre-carriage Mode	On-carriage Mode
PORT EVERGLADES, FL (USPEF)	0 Day 19 Hours	SANTO TOMAS DE CASTILLA, Guatemala (GTSTC)	PORT EVERGLADES, FL (USPEF)	NA	NA

Items	Qty	Rates (USD)
1 20' Dry Container (Building Materials, Scrap, Auto Parts, Chemicals, Machinery)	1	\$ 4,129.00
Ocean Freight		\$ 2,691.00
Marine Cargo Insurance 2: Up to \$50K		\$ 688.00
Vessel Fuel Surcharge		\$ 550.00
Terminal Handling Charge - Destination		\$ 200.00
Sub Total		\$ 4,129.00
EEl Preparation / Filing		\$ 75.00
Bill of Lading Fee		\$ 75.00
Total		\$ 4,279.00

Figura 2. Cotización de transporte marítimo de 1000 toneladas de escoria, desde el puerto Everglades, Florida, hasta el Puerto Santo Tomás de Castilla, Guatemala

XVII. Glosario

“Creep”: “...el incremento de las deformaciones que experimenta el concreto en estado endurecido cuando se somete a un estado de cargas permanente o sostenido en el tiempo.” [83]. [18]

Activador alcalino: Una solución a base un alcalino que provoca la activación alcalina, como las soluciones de hidróxido de sodio y silicato de sodio.. [10, 26]

Capilaridad: “Propiedad en virtud de la cual la superficie libre de un líquido puesto en contacto con un sólido sube o baja en las proximidades de este, según que el líquido lo moje o no; sus efectos son especialmente aparentes en el interior de los tubos capilares o entre dos láminas muy próximas.” [84]. [25]

Carbonatación: Es una reacción química en la que el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y forma carbonato cálcico insoluble y agua. [12, 28]

Cemento alternativo: Un cemento inorgánico que se puede usar como un reemplazo completo del cemento portland o los cementos hidráulicos combinados, y que no está cubierto por las especificaciones aplicables para el cemento portland o los cementos hidráulicos combinados.. [6, 7]

Contracción autógena: La retracción del concreto atribuida a la reducción de volumen que ocurre cuando el agua se combina químicamente con el cemento. [85]. [12, 25]

Deshelador: Compuesto líquido diluido que tiene la propiedad de rebajar la temperatura de congelamiento del agua, ayudando a impedir que esta se congele. [86]. [40]

Difusión: El movimiento de partículas desde una región de mayor concentración a una región de menor concentración.. [11, 29]

Dímero: “...una molécula compuesta por dos unidades similares o monómeros enlazados.” [87]. [32]

Geopolímero: “Los geopolímeros son polímeros inorgánicos formados por unidades tetraédricas de aluminio y silicio condensadas a temperatura ambiente, que resultan de la disolución de materias primas selectas (que pueden ser desechos industriales y/o arcillas naturales) en presencia de soluciones con pH elevado.” [88]. [7]

Macroporos: Poros con diámetro entre 25 y 5000 nanómetros.. [24]

Mesoporos: Poros con diámetro entre 1.25 y 25 nanómetros.. [24]

Monómero: “Molécula simple, generalmente de peso molecular bajo, que forma cadenas lineales o ramificadas de dos, tres o más unidades.” [89]. [32]

Orden de magnitud: El orden de magnitud de un número es el valor de la potencia decimal del número en cifras significativas.. [29] [30]

Pasivación: Proceso en el que se hace que un metal u otra substancia no reaccione con otras sustancias, al alterar su capa superficial o al cubrirla con una capa fina de una sustancia inerte. [90]. [28]

Recarbonatación: Es una reincidencia del fenómeno de carbonatación.. [13]