

Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)

Chemical stabilization of soils - conventional and alkali-activated materials (review)

Jhonathan F. Rivera¹
Ana Aguirre-Guerrero²
Ruby Mejía de Gutiérrez³
Armando Orobio⁴

¹Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: jhonathan.rivera@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0395-1517>

²Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: ana.aguirre@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9986-6557>

³Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: ruby.mejia@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5404-2738>

⁴Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: armando.orobio@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7166-3061>

Recibido: 18-11-2019 Aceptado: 31-05-2020

Cómo citar: Rivera, Jhonathan; Aguirre-Guerrero, Ana; Mejía de Gutiérrez, Ruby; Orobio, Armando (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (review). *Informador Técnico*, 84(2), 202-226.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2530>

Resumen

El creciente interés por el desarrollo de alternativas frente al uso masivo de cementantes tradicionales en aplicaciones geotécnicas, tales como cemento y cal, se debe en gran medida a los retos ambientales y costos asociados en este tipo de aplicaciones. Los cementantes activados alcalinamente surgen como una de las alternativas de mayor sostenibilidad, particularmente por su bajo consumo energético y en teoría la baja huella de carbono en su fabricación; además, tienen la posibilidad de utilizar residuos y subproductos industriales como materiales precursores en su fabricación. Este artículo presenta un estado del arte de los diversos materiales empleados convencionalmente en la estabilización química de suelos y realiza una revisión de los artículos publicados en relación con la implementación de cementantes activados alcalinamente, su viabilidad técnica, los impactos ambientales asociados y los retos que se deben superar para lograr posicionarlos como una alternativa sostenible para procesos geotécnicos.

Palabras clave: estabilización de suelos; materiales activados alcalinamente; geopolímeros; cemento; residuos industriales.

Abstract

The growing interest in the development of alternatives to the use of traditional binders in geotechnical applications, such as cement and lime, is largely due to the environmental challenges and associated costs in this type of applications. Alkali-activated binders emerge as one of the most sustainable alternatives, particularly because of their low energy consumption and in theory the low carbon footprint in their manufacture. In addition, this type of binders have the possibility of using industrial waste and by-products as precursor materials in

their production process. This article presents a state of the art of the various materials conventionally used in the chemical stabilization of soils and performs a review of published articles in relation to the implementation of alkali-activated binders. The technical feasibility, the environmental impacts associated, the challenges that must be overcome in order to position them as a sustainable alternative for geotechnical processes, and the advantages and disadvantages of its application are considered.

Keywords: soil stabilization; alkali-activated materials; geopolymers; cement; industrial wastes.

1. Introducción

La definición de “suelo” puede interpretarse de diferentes maneras de acuerdo con los intereses o aplicaciones. Para la ingeniería, el suelo es un sustrato terroso o depósito de partículas minerales no consolidado, un sistema que está formado por múltiples fases: sólida, líquida y gaseosa, sobre el cual se realizan diversas obras de ingeniería (Nortcliff *et al.*, 2012). El suelo se considera como el material de construcción más antiguo, complejo y utilizado por los ingenieros, siendo las propiedades fisicoquímicas y mecánicas, tales como la compresibilidad, resistencia, permeabilidad, estabilidad volumétrica y durabilidad, de gran importancia en la ingeniería, ya que prácticamente todas las estructuras civiles están cimentadas sobre la superficie de la tierra o dentro de ella. Además, el suelo, no solo es un elemento de soporte de las construcciones civiles, sino que provee innumerable materia prima para la fabricación de elementos de mampostería y la construcción de estructuras.

El suelo, como elemento portante, juega un papel determinante en las cimentaciones, de sus propiedades depende en gran medida la estabilidad de las estructuras. Las cargas se transmiten a través de la cimentación, esto hace que se generen tensiones y deformaciones, las cuales dependerán de la magnitud de la carga aplicada y de las propiedades del terreno de soporte. Bajo estas condiciones de tensión, la integridad del suelo de soporte se ve afectada principalmente por: la acción no anticipada del agua (Liu *et al.*, 2011), heladas (Jing *et al.*, 2019) y asentamientos excesivos no previstos, entre otros. La pérdida de resistencia del suelo de soporte conlleva daños severos en las estructuras. Solo en los Estados Unidos los costos de los daños producidos a las estructuras por suelos expansivos alcanzan la cifra de 1 billón de dólares al año; en el Reino Unido unos 150 millones de libras esterlinas al año y, en general, ascienden a miles de millones alrededor del mundo (Firoozi; Guney Olgun; Firoozi; Baghini, 2017; Puppala; Pedarla, 2017; Zhao; Ge; Petry; Sun, 2014). En muchos de los proyectos de ingeniería de obras civiles, el suelo nativo no cumple con los requisitos de diseño y por lo tanto es necesario realizar procesos de modificación, estabilización o sustitución para proporcionar a la obra un material de construcción mejorado.

Con la estabilización de suelos se puede incrementar la capacidad de soporte del suelo nativo, mejorar la resistencia al corte, aumentar la resistencia al ablandamiento por acción del agua, proporcionar estabilidad volumétrica ya que se minimiza la permeabilidad del agua, disminuir la plasticidad y aumentar el peso unitario de los suelos tratados (Hall; Najim; Keikhaei, 2012). Los procesos de estabilización de suelos más simples que se han implementado son la compactación y el drenaje de suelos; sin embargo, estas dos técnicas en algunos casos no son suficientes para lograr una buena estabilización de los terrenos, por lo que se recurre a la mejora de la gradación del tamaño de las partículas del suelo, siendo uno de los procesos de estabilización de suelos más utilizados, y se puede lograr agregando aglutinantes (Makusa, 2013). La aplicación de aglutinantes se conoce como estabilización química de suelos, esta metodología utiliza materiales cementantes universales como el cemento Portland y la Cal, aunque también en aplicaciones específicas se han implementado sales como el cloruro de sodio (NaCl) o impermeabilizantes como los productos asfálticos (Hall *et al.*, 2012).

Siendo el cemento Portland uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción en diferentes aplicaciones, entre estas como se mencionó anteriormente, la estabilización de suelos. Debido a que la producción de este ha sido íntimamente relacionada con el calentamiento global asociado a las altas temperaturas utilizadas en el proceso de producción, el excesivo consumo energético y de recursos naturales

(Damtoft *et al.*, 2008), se han desarrollado materiales alternativos que puedan reducir la huella de carbono y además conservar las propiedades aglutinantes del cemento Portland. De ahí, han surgido los materiales activados alcalinamente o también llamados geopolímeros, los cuales se producen por la interacción química de un material tipo aluminosilicato con una solución alcalina activante (Provis; Bernal, 2014; Shi; Fernández-Jiménez; Palomo, 2011). Los principales materiales utilizados como fuente de aluminosilicatos son cenizas volantes, escorias siderúrgicas y metacaolín. En estudios recientes se han utilizado otros materiales como desechos de demolición, residuos de ladrillo y residuos de vidrios, entre otros (Rivera; Cuarán-Cuarán; Vanegas-Bonilla; Mejía de Gutiérrez, 2018; Robayo-Salazar; Rivera; Mejía de Gutiérrez, 2017; Robayo; Mulford; Munera; Mejía de Gutiérrez, 2016). A diferencia del cemento portland, la producción de materiales activados alcalinamente no consume grandes cantidades de energía, ya que se realiza a temperaturas bajas, ofreciendo una alternativa más ecológica. Desde 1930, la comunidad científica ha incrementado su interés en estudiar las propiedades de este tipo de materiales encontrando que presentan generalmente altos desempeños mecánicos, elevada resistencia a ataque químico, así como a altas temperaturas, entre otras propiedades (Wu *et al.*, 2019). La utilización de este tipo de materiales como cementante para la aplicación en la estabilización química de suelos es un concepto relativamente nuevo.

2. Metodología

La metodología seguida en el presente estudio contempla una revisión de la base de datos científicos (Scopus, Elsevier), utilizando como palabras claves “soil stabilization alkali-activated/geopolymer” y “soil stabilization Portland cement”. La revisión, realizada para los últimos nueve años (2010-2019) muestra que el número de las publicaciones relacionadas con la estabilización de suelos utilizando cementos de activación alcalina no sobrepasan los 70 documentos. De acuerdo con la Figura 1 (datos tomados de Scopus), las primeras publicaciones datan del año 2012, y su estudio se ha venido incrementando poco a poco en el tiempo. Cabe anotar, que de las publicaciones a octubre de 2019, tan solo el 72 % corresponden a artículos, el porcentaje restante son capítulos de libros o presentaciones a nivel de conferencias internacionales. Para abril de 2020, ya se ha incrementado en 11 artículos más. En general, la mayoría de artículos se encuentran publicados en revistas de las bases de datos Science Direct (Elsevier) y Springer. En la Figura 1 se observa que la producción científica relacionada a la estabilización química con cemento portland supera en aproximadamente seis veces la de los materiales activados alcalinamente. Sin embargo, aunque esta tecnología es relativamente reciente, los excelentes desempeños mecánicos obtenidos en los diferentes estudios de investigación a nivel global, utilizando diversos tipos de suelos (finos y granulares), ha llevado a considerarla potencialmente viable en la estabilización química de suelos.

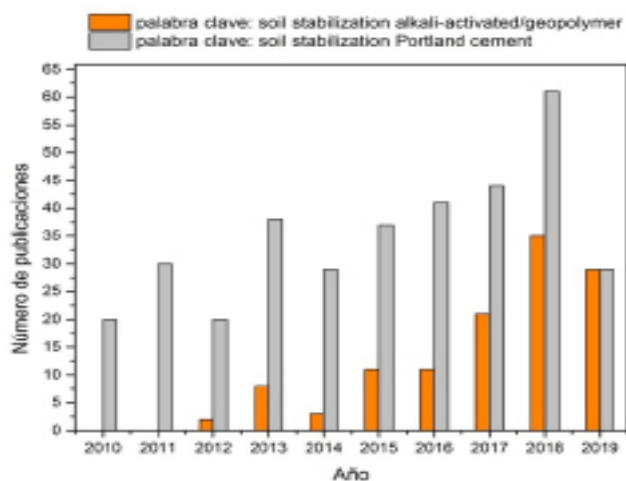


Figura 1. Publicaciones de los últimos 9 años (enero 2010-octubre 2019) en el campo de estabilización de suelos con materiales activados alcalinamente vs. cemento Portland. (Base de registros de Scopus)

Fuente: elaboración propia.

Este *review* presenta una breve descripción de los materiales tradicionalmente utilizados en la estabilización química de los suelos tales como cemento Portland, cal, cenizas volantes (CV), escorias siderúrgicas de alto horno (GBFS) y sales, seguido de la presentación de algunos de los resultados más relevantes de estabilización de suelos utilizando materiales cementantes activados alcalinamente. Adicionalmente, se presentan las posibles ventajas y desventajas de la utilización de este material alternativo, sus oportunidades y retos asociados a su aplicación.

2.1. Metodos de estabilizacion de suelos

Un suelo se considera estable cuando posee la resistencia suficiente para no sufrir grandes deformaciones ni excesivo desgaste en servicio por acción de las condiciones climáticas variables que se puedan presentar, además debe de conservar estas propiedades a través del tiempo. Un suelo natural puede tener a veces la composición granulométrica, la plasticidad y el grado de humedad adecuada, para que, siendo únicamente compactado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como cimentación de una vía o camino. No obstante, si no se logra un adecuado equilibrio entre el rozamiento inter-partículas y su adhesión, no se tendrá la estabilidad esperada. Por tanto, en lo general la estabilización de un suelo es un proceso que permite mejorar la calidad del suelo natural para obtener unas características físicas, químicas y mecánicas estables en relación con las condiciones medioambientales de servicio. Con estos procesos de estabilización puede alterarse una o más propiedades del suelo: controlarse la expansión, incrementar la resistencia, reducir la plasticidad, disminuir la permeabilidad, prevenir la erosión, entre otras propiedades. Por ejemplo, es posible mejorar la resistencia de suelos y convertirlos en materiales apropiados para la construcción, capaces de soportar los efectos del tránsito y del ambiente con excelente durabilidad. Los métodos de estabilización de suelos pueden clasificarse en: mecánicos, físicos, químicos y biológicos.

La estabilización mecánica consiste en compactar el suelo de forma estática o dinámica para aumentar su densidad, su resistencia mecánica, disminuir su porosidad y su permeabilidad. Puede incluir también previamente la mezcla de suelos de diferente gradación para obtener la especificación apropiada. Los objetivos ingenieriles de dicho procedimiento son principalmente a) aumentar su capacidad portante, b) disminuir el asentamiento de las estructuras, c) controlar cambios volumétricos indeseables, d) reducir la permeabilidad al agua, y e) aumentar la estabilidad de los taludes (Das, 2013). La compactación de un suelo depende de la energía de compactación, por el tipo y gradación del suelo, y el grado de compactación depende del contenido de humedad y el peso unitario seco. El grado de compactación es entonces medido en términos del peso unitario del suelo seco.

La estabilización física consiste en modificar las propiedades de los suelos mediante la intervención en algunas de sus propiedades para aportarle características estructurales nuevas. Entre los procedimientos físicos se encuentran el uso de los materiales denominados geosintéticos, tales como los geotextiles, fabricados generalmente de fibras sintéticas como el poliéster o polipropileno; las geomallas, estructuras tridimensionales pero con la característica de ser mono o bi-orientadas y fabricadas en polietileno de alta densidad; las geomembranas, láminas poliméricas impermeables fabricadas en cloruro de polivinilo (PVC), o polietileno de alta o baja densidad (PEAD/PEBD); el geocompuesto, diseñado específicamente para estabilización de suelos donde se requiere tanto refuerzo como separación de una base granular y un subsuelo muy fino, este se produce uniendo un geotextil no tejido a una geomalla, lo que permite una gran interacción con el suelo reforzado; y las geoceldas, que son sistemas tridimensionales de confinamiento celular fabricadas en paneles de polietileno o polipropileno, muy resistentes para el confinamiento de cargas (Liu *et al.*, 2011).

La estabilización química consiste en añadir al suelo otros materiales, o productos químicos, que modifican sus propiedades, ya sea por una reacción fisicoquímica, o mediante la creación de una matriz que aglomere las partículas del suelo (Bahar; Benazzoug; Kenai, 2004; Billong; Melo; Louvet; Njopwouo, 2009). Algunos autores (Bahar *et al.*, 2004; Billong *et al.*, 2009) recomiendan la combinación de dos métodos, el de

estabilización por métodos mecánicos de compactación y vibración y el de estabilización por métodos químicos, para obtener mayor resistencia y durabilidad.

Una última técnica es la estabilización biológica que consiste básicamente en la utilización de enzimas biológicas que al ser incorporadas al suelo actúan aumentando el grado de aglutinamiento y compactación de las partículas del suelo, como consecuencia de un intercambio catiónico en la estructura del suelo que da lugar a un proceso de cementación acelerado.

En los siguientes apartados se detallan los métodos tradicionales y alternativos de estabilización química de suelos, señalando en cada caso sus ventajas y desventajas.

2.1.1. Estabilización química de suelos – métodos tradicionales

La estabilización química se puede utilizar en todos los tipos de suelos para el mejoramiento de sus propiedades geotécnicas, cambiando las propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo nativo con el objetivo de mitigar algunos problemas tales como la inestabilidad volumétrica o incrementar algunas de sus propiedades como la resistencia y durabilidad de los suelos tratados. Este tipo de estabilización incluye la utilización de una amplia gama de materiales, entre los cuales el cemento y la cal han sido los más convencionales; sin embargo, otros productos como sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio) y residuos o subproductos industriales (escoria de alto horno, cenizas volantes) también han sido considerados en la estabilización de suelos para construcción de carreteras (Syed-Zuber *et al.*, 2013). Adicionalmente, la combinación de varias materias primas adecuadamente seleccionadas puede permitir la sinergia de sus propiedades brindando un mejor comportamiento frente a la estabilización de un suelo.

Cabe anotar, que la selección del tipo y porcentaje de estabilizante es función primordial del tipo de suelo o clasificación y por supuesto, en segunda instancia, de la expectativa de mejoramiento requerida para el caso particular. Otros factores importantes son el costo y las condiciones medioambientales. Así, cuando solamente se pretende modificar algunas de sus propiedades, tales como la trabajabilidad, plasticidad o distribución de partícula es posible que se requieran proporciones bajas del aditivo; sin embargo, cuando se desea interactuar con propiedades tales como la resistencia y la durabilidad para incrementar la vida útil en servicio, la cantidad del aditivo puede ser superior. Aunque puede existir más de un estabilizante apropiado para un tipo de suelo determinado, hay algunos lineamientos para seleccionar el estabilizador específico, estos se basan en la granulometría del suelo, su plasticidad y textura.

En general, los criterios para decidir sobre un tipo o no de estabilización química se basan generalmente en los límites de Atterberg, los cuales permiten caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Un suelo puede presentar cuatro estados de consistencia dependiendo de su grado de humedad; seco, semisólido, plástico y líquido. El límite plástico (LP) corresponde al paso de estado semisólido a estado plástico; y el límite líquido (LL) corresponde al paso de estado plástico a estado líquido. El índice de plasticidad (IP) se calcula como la diferencia entre el contenido de humedad en los LL y LP. Algunas normas consideran que el LL no puede superar valores entre 30-40 % y el IP entre el 10-12 %, respectivamente para materiales de subbase y base, y alrededor de 40 y 20 % para materiales subrasantes. Otras características que determinan el tipo de estabilización están relacionadas con la densidad en estado seco y el valor del *California Bearing Ratio* (CBR) del suelo. Estas características, en general, definen la calidad del suelo y su conocimiento es tan importante como escoger bien los materiales para realizar la estabilización. La norma ASTM D4609, la cual evalúa el potencial de los productos utilizados para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, en su apartado 8.1.4 indica que "cualquier producto que consiga un incremento de 345 kPa de la resistencia a compresión del suelo y, además que garantice que, al sumergir las probetas en agua éstas no pierdan significativamente su resistencia, puede considerarse apto para la estabilización". No obstante, es común que, una vez realizada la estabilización química se apliquen métodos mecánicos para compactar el suelo.

2.1.2. Estabilización con Cemento Portland

El cemento Portland (del inglés, *ordinary Portland cement*, OPC) es el aglutinante más utilizado a nivel mundial porque posee la capacidad de estabilizar una amplia variedad de suelos, aunque es mucho más efectivo en suelos arenosos y en suelos arcillosos con índices de plasticidad entre mediano y bajo (Pandey; Rabbani, 2017). Al material generado por la mezcla de suelo con diferentes porcentajes de OPC se le da el nombre de suelo-cemento. Este material se usa en muchos tipos de aplicaciones de infraestructura civil como bases o subbases para construir carreteras, terraplenes, diques y estabilización de cimentaciones, entre otros. Se ha implementado desde hace más de 80 años, y su desarrollo se dio simultáneamente en Estados Unidos e Inglaterra, en donde en el año 1917 aplicaron exitosamente mezclas de suelo arcilloso con cemento para crear caminos; pese a ello, no fue muy utilizado en esa época por el tipo de tráfico. En Estados Unidos los primeros proyectos de los que se tiene registro del uso de suelo-cemento en la construcción de carreteras se realizaron en Dakota del Sur, Iowa, Ohio, California y Texas. A partir de 1935 la Portland Cement Association (PCA) desarrolló una serie de investigaciones que derivaron en los primeros ensayos de humedad-densidad, humedecimiento-secado y hielo-deshielo de diversas mezclas de suelo-cemento y a partir de este trabajo a mediados de 1940 surgen las primeras normas ASTM y AASHTO para este tipo de material (Portland Cement Association, 1992).

Los mecanismos por los cuales el suelo es estabilizado por el cemento son la hidratación, el intercambio catiónico, floculación y aglomeración, carbonatación y reacciones puzolánicas. De estos, el más importante es la hidratación del cemento ya que se generan compuestos de silicato cálcico hidratado (del inglés *calcium silicate hydrate*, C-S-H) que cementan las partículas del suelo generando estabilidad frente a los cambios de humedad en el ambiente. El intercambio catiónico es el segundo mecanismo en importancia cuando se estabilizan suelos cohesivos, los cationes Ca^{++} del cemento llenan los vacíos en la estructura del suelo o se intercambian por algunos cationes del suelo, reduciendo la carga neta superficial haciendo que se genere una menor atracción de moléculas de agua por parte del material (Pandey; Rabbani, 2017). Khemissa y Mahamedi (2014) al tratar suelos expansivos con cemento Portland corroboraron que el índice de plasticidad y el límite líquido de los suelos tratados decrecía apreciablemente (ordenes del 50 %), reduciendo de esta manera su potencial de hinchamiento y volviéndolos menos sensibles al agua con la consecuente mejora en los procesos de compactación de las mezclas de suelo-cemento. La floculación puede cambiar la textura plástica de algunos suelos a una textura fina y granular (Prusinski; Bhattacharja, 2007), mientras que la carbonatación contribuye a la resistencia del material estabilizado y las reacciones puzolánicas contribuyen a la generación de material cementante adicional (C-S-H) conforme pasa el tiempo incrementando la estabilización por cementación de las partículas.

Dependiendo de la proporción de los componentes en la mezcla entre el suelo y el cemento, se generan varias clases de suelo-cemento: suelo-cemento compactado, suelo-cemento plástico y suelo modificado con cemento. El tipo de mezcla más utilizada es el suelo-cemento compactado llamado comúnmente como suelo-cemento, este contiene una proporción de OPC entre 4-25 % en peso de suelo seco y se compacta para lograr mayor resistencia. Los suelos que mejor resultado presentan al ser estabilizados con OPC son los materiales granulares bien gradados con la suficiente cantidad de material fino, para producir una especie de agregados flotantes en la matriz. Según la PCA el tamaño máximo de las partículas del material a estabilizar debe ser de 5.1 cm, el Índice de Plasticidad (IP) para estos materiales debe ser menor de 30, mientras que para materiales más finos el IP debe ser inferior a 20 con Límite Líquido (LL) por debajo de 40 (U.S.Department of Transportation, 1992).

Estudios realizados por Horpibulsuk *et al.* (2010) relacionaron la resistencia de un suelo arcilloso estabilizado con diferentes contenidos de cemento para una determinada cantidad de agua, identificando tres zonas que estaban relacionadas con la cantidad de OPC adicionado al suelo. La primera que denominaron *zona activa*, donde la resistencia de la mezcla incrementa con el contenido de cemento entre 0-10 %, atribuible a los productos de hidratación del OPC (C-S-H). Entre 10 – 30 % de cemento el incremento en la resistencia es casi cero, esto quiere decir que no existe mejora significativa en la resistencia, esta región fue denominada *zona*

inerte. Con contenidos de cemento > 30 % encontraron que la resistencia disminuyó y la denominaron zona de deterioro, esto fue atribuido a una insuficiente cantidad de agua que promueva la hidratación completa del cemento en la mezcla. Con base en lo anterior, definieron como límite máximo el 10 % de cemento.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las diferentes mezclas suelo/cemento, sus propiedades principales y su respectiva aplicación en pavimentos (Quintanilla, 2007).

Tabla 1.
Clasificación y propiedades de diferentes mezclas de suelo/cemento

Clasificación	Materiales	Cantidad de cemento (%w)	Propiedades	Usos
Suelocemento	Suelos finos o granulares y cemento	3-7	>4MPa Compresión	Subbases
Suelo modificado con cemento	Sueos finos o plásticos con excesiva humedad y cemento	Máximo 2 %	Incrementa CBR y disminuye la plasticidad	Subrasantes o explanadas
Suelo estabilizado con cemento	Suelos con fracción granular elevada y cemento	Mínimo 2 %	Incrementa rigidez y resistencia mecánica	Subrasantes o explanadas
Suelocemento plástico	Suelo, cemento y aditivos	-	3-8.5 MPa Compresión	Bases para pavimentos
Base granular tratada con cemento	Agregados y cemento	3- 13 %	3-6 MPa Compresión 7.000-14.000MPa Módulo de elasticidad	Capa de base para pavimentos
Pavimento unicapa de alto desempeño	Suelo existente en la obra y cemento	11-20 %	5-13 MPa Compresion 10.000-20.000 MPa Modulo de elasticidad	Capa de base o capa de rodadura de pavimentos

Fuente: tomado y adaptado de Quintanilla (2007).

Cabe anotar que, los rangos típicos de resistencia a compresión simple a 7 días exigidos por el código ACI 230 depende del tipo de suelo, así para suelos ML y CL es de 17.58 - 35.15 kg/cm²; en suelos MH y CH es de 14.06 - 28.12 kg/cm², y en el resto de los tipos de suelo del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) es de 21.09 - 42.18 kg/cm².

2.1.3. Estabilización de suelos con Cal

La cal es uno de los materiales más utilizados en la estabilización de suelos. Se puede usar en diferentes formas dependiendo del tipo de aplicación, cal viva, como desecante de suelos muy húmedos; cal hidratada y lechada de cal para estabilización de suelos arcillosos de grano fino. Al aplicar la cal a suelos arcillosos inmediatamente sus partículas pierden poder de cohesión transformando al suelo plástico en un material más granular. Los registros de la utilización de cal datan de épocas tan antiguas como la civilización mesopotámica pasando por antiguo Egipto, imperio Romano y la antigua Grecia (McDowell, 1959). En la era moderna, la cal fue utilizada

como agente estabilizador aproximadamente desde los años de 1924, su uso se generalizó a partir de la segunda guerra mundial como químico estabilizador de suelos para construcción de carreteras (Bell, 1996). Al aplicar cal a los suelos, el intercambio catiónico es el primer mecanismo que modifica las propiedades ingenieriles del suelo tratado. Debido a la floculación de sus partículas, se promueve la fijación de los cationes Ca^{++} en la estructura del suelo y esto da lugar a la generación de reacciones puzolánicas responsables de estabilizar al suelo modificando sus propiedades iniciales (Behnood, 2018a; Bell, 1996). Al romper las partículas de arcilla, se liberan la sílice y la alúmina, que reaccionan con el calcio de la cal para formar silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H), que son cementantes análogos a los formados en las reacciones de hidratación del cemento Portland. Estos componentes hidratados forman una matriz con menor índice de plasticidad, la cual contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas con cal y a su menor permeabilidad. La capa de suelo se hace más fácil de trabajar y de compactar. En este tipo de estabilización puede considerarse la cal como un activante alcalino apto para generar un suelo resistente, mecánica y químicamente a partir de su acción con el suelo de carácter arcilloso.

Bell (1996) estudió el efecto de la cal en tres tipos de los minerales más comunes de los suelos finos, montmorillonita, cuarzo y caolinita. El autor reporta una disminución significativa de la plasticidad en el mineral de montmorillonita, pasando del 15 % al 3 % al utilizar un contenido de cal del 10 %, mientras que en la caolinita la reducción fue menor. Al adicionar cal, la caolinita y el cuarzo incrementan su límite líquido mientras que en la montmorillonita se redujo; en esta última, la resistencia incrementa más rápidamente. De acuerdo con Mallela; Quintus y Smith (2004), la estabilización con cal actúa mejor en suelos finos con un contenido mínimo de arcilla del 10 % e IP superior a 10. Al-Mukhtar; Khattab y Alcover, (2012) estabilizaron con cal una arcilla plástica conocida como "FoCa Clay"; después del tratamiento químico el suelo tratado mejoró sus propiedades geotécnicas al reducir su plasticidad y la posibilidad de hinchamiento e incrementar la resistencia, corroborando que inmediatamente al ser tratado el suelo con la cal pierde sus propiedades cohesivas y se transforma en un suelo granular con propiedades geotécnicas mejoradas.

Millogo; Morel; Traoré y Ouedraogo (2012), evaluaron las características microestructurales de suelos lateríticos estabilizados con cal en diferentes proporciones (2, 3, y 8 %); los suelos estaban compuestos por 26 % de caolinita y 42 % cuarzo y sus características físicas fueron: LL 22.5 %, LP 12 %, IP 10.5, CBR 43; los autores reportaron como productos de la reacción calcita (CaCO_3), portlándita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), y silicato cálcico hidratado (C-S-H) pobremente cristalizado, formado este último a partir de la reacción entre la caolinita presente en el suelo y la cal incorporada en la mezcla. Los índices IP, y la densidad máxima seca (del inglés *maximum dry density*, MDD) disminuyen con la adición de cal mientras el contenido óptimo de humedad (del inglés *optimum water density*, OMC) aumenta. En cuanto a las propiedades mecánicas se observó un aumento del índice CBR hasta el 3 % de cal; por lo cual, los autores recomiendan este porcentaje para modificar las gravas lateríticas y usarlas como una opción económica para bases en la construcción de carreteras (Millogo *et al.*, 2012). Ismeik y Shaquor (2020) estudiaron la durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo de un suelo caolinitico estabilizado con diferentes porcentajes de cal; observaron reducción en la plasticidad del suelo nativo en aproximadamente un 50 %, mientras el incremento en la durabilidad y resistencia mecánica dependían del contenido de cal en la mezcla. Reportaron que un 6 % de cal mejoró sustancialmente la durabilidad a los ciclos de hielo-deshielo de la mezcla compactada, concluyendo que este suelo estabilizado podría ser un excelente material para construir bases para pavimentos e incluso cimentaciones. En términos generales, el porcentaje de cal no debe superar el 8 %.

2.1.4. Estabilización de suelos utilizando Cenizas volantes

Las cenizas volantes (CV) fueron implementadas como material para estabilizar suelos debido a los inconvenientes ambientales y económicos que se asociaban a la cal y al cemento Portland, motivando muchas investigaciones alrededor de estos subproductos con el objetivo de desarrollar nuevos cementantes ambientalmente sostenibles para una variedad de aplicaciones ingenieriles. Inicialmente se utilizaban como aditivo para productos a base

de cemento y concreto; posteriormente se comenzaron a implementar como material de relleno estructural en terraplenes; y finalmente, como material estabilizador de suelos en la construcción de carreteras (Babu; Rao, 1996; Behnood, 2018b; Horiuchi; Kawaguchi; Yasuhara, 2000; Kim; Prezzi; Salgado, 2005; Kumar; Chandra; Vishal, 2006; Senol; Edil; Bin-Shafique; Acosta; Benson, 2006). Las cenizas volantes dependiendo de la clase de carbón utilizado en la combustión, se clasifican en cenizas tipo F y cenizas tipo C (ASTM C618); las cenizas tipo F se componen de óxidos de silicio, aluminio y hierro (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 respectivamente), los cuales representan en total un 70 % del material y poseen un contenido de óxido de calcio (CaO) muy bajo (inferiores al 10 %), mientras que las cenizas tipo C presentan un contenido de CaO por encima del 30 % aproximadamente y altos contenidos de óxidos de azufre (SO_3) (Kim *et al.*, 2005; Makusa, 2013; Moghal, 2017).

Por el bajo poder de cementación de las cenizas tipo F, generalmente se mezclan con fuentes de calcio como la cal o el OPC, ya que por su naturaleza puzolánica interactúan con los óxidos de calcio, para generar productos de reacción que cementan las partículas de los suelos tratados (Arora; Aydilek, 2005). El poder de cementación de las cenizas se puede mejorar cuando se adiciona cal junto con yeso, el cual mejora la resistencia en edades tempranas con cantidades de cal moderadas; incluso se observan incrementos muy significativos cuando la fuente de calcio se adiciona en mayores proporciones como lo demostraron Sivapullaiah y Moghal (2010). De acuerdo con Kim *et al.* (2005) la resistencia al corte de suelos estabilizados con cenizas volantes se puede atribuir al ángulo de fricción interna característico de las cenizas de tipo F ya que la resistencia proporcionada se debe a la fricción entre sus partículas, mientras que con las cenizas tipo C se relaciona más con una resistencia por cohesión, gracias a su mayor capacidad de cementación.

La combinación ceniza y cal puede utilizarse exitosamente para estabilizar suelos arenosos y suelos limosos incrementando enormemente la rigidez del suelo estabilizado (Puppala, 2016). Arora y Aidilek (2005) estudiaron mezclas de cenizas tipo F modificadas con OPC y cal con las cuales estabilizaron un suelo arenoso para aplicaciones como capa base para la construcción de carreteras; la resistencia a compresión no confinada y el módulo de resiliencia incrementaron al adicionar hasta 5 % de OPC en la mezcla. En los ensayos de ciclos hielo-deshielo, la resistencia a la compresión incrementó en cada ciclo para las mezclas modificadas con OPC a diferencia de las mezclas modificadas con cal. Por último, después del tratamiento, el espesor de la capa base disminuyó al implementar mezclas de suelo-ceniza modificadas con OPC. Edil; Acosta y Benson (2006) llevaron a cabo un estudio de la efectividad de las cenizas tipo C para estabilizar suelos de grano fino, demostrando que las cenizas estén o no dentro de la especificación de la norma ASTM C618 son igual de efectivas para estabilizar los suelos de grano fino; en todos los casos el suelo presentó incrementos en el CBR y el módulo de resiliencia con cualquiera de las cenizas utilizadas. Un trabajo similar realizaron Joshi; Patel y Shahu (2019) al estabilizar suelos arcillosos para aplicaciones como base o subbases de pavimentos flexibles, en el cual coincide que a medida que se incrementa el contenido de ceniza en la mezcla con el suelo, incrementa el valor de CBR, módulo de resiliencia y resistencia a la compresión no confinada del material estabilizado, con lo que se podrían hacer incluso capas con espesores más delgados permitiendo realizar diseños de pavimentos más rentables económicamente.

2.1.5. Estabilización de suelos utilizando escorias siderúrgicas de alto horno

La escoria granulada de alto horno (del inglés "*granulated blast furnace*", GBFS) es un subproducto de la industria del acero. Se compone principalmente de silicatos y aluminosilicatos cálcicos y es de particular interés por sus propiedades hidráulicas latentes que se pueden desarrollar al combinarse con cemento Portland, cal o agentes alcalinos (Das; Prakash; Reddy, Misra, 2007; Gutt; Nixon, 1979). GBFS se ha utilizado con éxito en la estabilización de suelos expansivos. Estudios realizados por Al-Rawas (2002) demostraron que GBFS es un aditivo efectivo para mejorar este tipo de suelos, al reducir el potencial de hinchamiento del suelo debido a que los iones calcio interactúan con las partículas de suelo para generar flóculos y volverlo menos susceptible a los cambios de volumen por acción del agua. Resultados similares obtuvieron Cokca; Yazici y Ozaydin (2009); Hasan; Chegenizadeh; Budihardjo y Nikraz (2016); Manimaran; Santhosh; Ravichandran (2018), demostrando

que la alteración del tamaño de partícula del suelo al adicionar GBFS no solo disminuye el potencial de hinchamiento sino que incrementa la gravedad específica, reduce el índice de plasticidad, incrementa el CBR y la resistencia mecánica. GBFS en combinación con cemento Portland genera una mayor resistencia, debido a los productos de reacción de carácter puzolánico; el incremento varía en función de parámetros tales como el porcentaje de adición de GBFS y las condiciones de curado. Cuando GBFS se combina con cal proporciona auto regeneración en caso de daños iniciales en la estructura por sobrecarga, además, no es afectada la mezcla por la presencia de sulfatos en el suelo (Higgins, 2005), siendo los principales productos de reacción aluminatos de calcio hidratados (C-A-H), silicatos de calcio hidratados (C-S-H) y silicatos de calcio hidratados ricos en aluminio (C-A-S-H) (Sekhar; Nayak; Preetham, 2017; Yi, Zheng; Liu; Al-Tabbaa, 2015). Recientemente, estudios realizados por Bensaifi; Bouteldja; Nouaouria y Breul (2019) demostraron que GBFS puede activarse con residuos de cáscaras de huevo calcinadas para mejorar las propiedades geotécnicas de un suelo tipo Marl usado para construcción de carreteras; los autores reportan incrementos del CBR de hasta 22 veces con respecto al valor de CBR del suelo sin tratar.

2.1.6. Estabilización de suelos utilizando sales

Como materiales alternativos de bajo costo se han utilizado sales tales como cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (CaCl_2). El objetivo de su uso es retener humedad y mejorar la compactación del material. Además, ayudan a reducir el punto de congelación del agua contenida en el suelo y en zonas muy secas evita la rápida evaporación del agua de compactación (Firoozi *et al.*, 2017). Las propiedades plásticas de suelos arcillosos dependen del intercambio catiónico. Cuando las partículas de arcilla están cubiertas con cargas similares se repelen entre sí; cuando existen partículas con cargas diferentes se atraen; si el entorno es un ambiente ácido, es decir, exceso de H^+ ($\text{pH} < 7$), las partículas tienden a estar cargadas positivamente, lo que conlleva a la floculación de la arcilla, y en un entorno básico resulta una estructura dispersa. Yunus y Zurairahetty (2007) investigaron el uso de la cal mezclada con sales (NaCl y CaCl_2 en rangos de 2 al 10 %) en la estabilización de un suelo arcilloso (57,51 % de limo y 20,78 % de arcilla) con un contenido de material orgánico del 14,41 %, el cual se conoce reduce la efectividad de la cal como estabilizante. En general, la presencia de las sales en órdenes del 10 % aumentó la resistencia de la mezcla, destacándose el desempeño del NaCl; en este sentido afirman que estas sales actúan como acelerantes de las reacciones en la presencia de ácidos húmicos.

El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento. A humedades relativas altas actúa como retenedora del agua debido a su naturaleza higroscópica, reduce la evaporación y evita la formación de polvo. Además, se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal. Entre las limitaciones para su uso se señalan: el medio ambiente debe tener una humedad relativa superior al 30 %; las partículas del suelo deben pasar por malla 200 y reaccionar favorablemente con la sal; y la ausencia de materia orgánica ya que esta inhibe la acción de la sal (Garnica; Pérez; Gómez y Yhaaraby, 2002).

2.1.7. Ventajas y desventajas de los métodos tradicionales de estabilización química de suelos

Las ventajas de los métodos tradicionales de estabilización de suelos es la existencia de una amplia variedad de productos en el mercado desarrollados para mejorar diversos tipos de suelos o ciertas propiedades en algunos tipos de suelos. En referencia a los cementantes más utilizados, OPC y cal, su principal ventaja es que se pueden utilizar prácticamente en casi todas las clases de suelos. Como ventajas técnicas se señala la ganancia de resistencia a edades tempranas y el incremento de la durabilidad de los suelos tratados. En aplicaciones viales se pueden reducir los espesores de las capas de las estructuras de los pavimentos, disminuyendo los costos de la obra. En general, son productos ampliamente difundidos y disponibles comercialmente, y su composición química tiene una variabilidad relativamente aceptable ya que sus procesos de producción están ampliamente desarrollados y controlados.

Como desventaja se señala su impacto ambiental negativo con respecto a su producción e incluso por su costo de fabricación. Solo la industria de producción de OPC genera aproximadamente del 5 – 8 % del total las emisiones mundiales de CO₂ (Andrew, 2017; Gartner, 2004); de acuerdo con Kim y Worrel (2002) y Shi *et al.* (2011) por cada tonelada de OPC producida se emite a la atmosfera entre 0,8 y una tonelada de CO₂, esto se atribuye a la descomposición de las materias primas y el uso de combustibles fósiles en el proceso de fabricación. Otro de los inconvenientes asociados al uso de cementantes a base de calcio es su poca efectividad en suelos con contenidos altos de materia orgánica ya que se afectan las reacciones de hidratación y reacciones puzolánicas necesarias para que el suelo estabilizado alcance la resistencia mecánica apropiada (Tremblay; Duchesne; Locat y Leroueil, 2002). De acuerdo con Ma; Chen y Chen (2016) la resistencia a la compresión de suelos con alto contenido de materia orgánica tratados con cementantes a base de calcio, disminuye a medida que el ácido húmico aumenta por la descomposición de la materia orgánica, esto en ocasiones se compensa con mayor proporción de cemento (Chen; Wang, 2006); sin embargo, es una práctica costosa. Generalmente no se recomienda utilizar cemento para estabilizar suelos con más del 2 % de materia orgánica, tampoco se recomienda usar cemento para estabilizar suelos con un pH ácido debido a que se puede ralentizar o inhibir los procesos de hidratación (Trussell; Spence, 1994).

En respuesta a las desventajas mencionadas anteriormente, la comunidad científica ha centrado esfuerzos en la búsqueda de nuevas tecnologías que se puedan implementar en este tipo de aplicaciones geotécnicas y que de alguna manera mitiguen primordialmente los problemas relacionados con las emisiones de CO₂, disminuya la explotación de recursos naturales, sean económicamente viables e incrementen la durabilidad en servicio de los suelos estabilizados.

2.2. Estabilización química de suelos – activación alcalina

La estabilización química de suelos utilizando la tecnología de activación alcalina es una de las más recientes propuestas de investigación y surge como alternativa a los cementantes tradicionales. La literatura alrededor de esta temática es limitada, como se mencionó anteriormente; a pesar de ello, las investigaciones realizadas han logrado algunos avances significativos mostrando resultados promisorios, tanto a nivel de las propiedades mecánicas como de la durabilidad de los suelos evaluados. Desde el punto de vista ambiental, los cementantes activados alcalinamente se consideran, en teoría, una alternativa más sostenible comparada con los cementantes tradicionales, por su menor consumo de energía en el proceso de producción y a la utilización de precursores derivados de algunos residuos o subproductos industriales (cenizas volantes y escorias siderúrgicas de alto horno, entre otros) para su producción, lo cual mitiga la explotación de recursos naturales. La revisión en la Base de datos Scopus analizada en función del tipo de precursor utilizado en el cementante alcalino usado para los estudios de estabilización de suelos en los últimos 10 años (2010-2020) arroja que el mayor número de artículos utilizan cenizas volantes (CV) y escorias siderúrgicas (GBFS), tal como se puede apreciar en la Figura 2.

2.2.1. Estabilización química de suelos con cementantes activados alcalinamente

Un nuevo enfoque del uso de residuos en los procesos de estabilización química de suelos fue presentado por Hughes y Glendinning (2004), quienes utilizaron GBFS mezcladas con residuos de la producción del titanio y cal, las cuales al ser incorporadas al suelo le otorgaron resistencias mecánicas similares a las obtenidas con OPC y mayor durabilidad; el suelo estabilizado no fue afectado por la humedad ni por los ciclos de hielo-deshielo, y tampoco resultó susceptible al ataque por sulfatos. La implementación de la cal para incrementar el pH del medio y lograr una mejor disolución de los precursores, podría considerarse como el punto de partida para el uso de cementantes activados alcalinamente en aplicaciones geotécnicas, a pesar de que la cal no es un activador fuertemente alcalino como el hidróxido de sodio (NaOH) o el silicato de sodio (Na₂SiO₃), sustancias químicas que son los activadores convencionales.

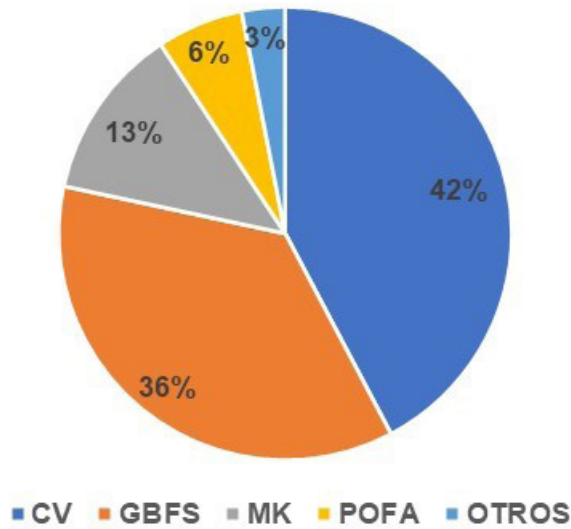


Figura 2. Tipos de precursores utilizados en las investigaciones de estabilización de suelos con materiales activados alcalinamente 2010-2020 (Base de registros de Scopus)
Fuente: elaboración propia.

Cristelo; Glendinning; Fernandes y Pinto (2013) estabilizaron un suelo blando utilizando 20 al 40 % de un cementante activado alcalinamente basado en CV tipo F y activado con NaOH a diferentes concentraciones (10, 12.5 y 15 M), los resultados muestran que la resistencia del suelo estabilizado aumenta al disminuir la relación activador/ceniza, alcanzando 43 MPa al cabo de 365 días. Coudert *et al.* (2019) evaluaron la estabilización de un suelo blando con un cementante activado alcalinamente basado en ceniza volante tipo C adicionada con 20 y 50 % de metacaolin utilizando como activador silicato de sodio; los resultados demostraron que la presencia de metacaolin contribuyó a una reacción rápida de la mezcla obteniendo estructuras mas compactas y menos porosas comparadas con las producidas con 100 % de CV. Cristelo; Glendinning; Fernandes y Teixeira-Pinto (2012); Cristelo; Glendinning y Teixeira-Pinto (2011) al comparar la utilización de CV tipo F con CV tipo C, adicionadas en un rango de 10-40 % en peso del suelo, reportan que a edades tempranas los suelos estabilizados con cenizas volantes tipo C evidencian mayor resistencia frente a los estabilizados con cenizas tipo F; sin embargo, a edad de 365 días los suelos estabilizados con cenizas tipo F alcanzan un valor superior y superan al obtenido en los mismos suelos estabilizados con cal y con cemento, lo cual atribuyen a la elevada acción puzolánica de este tipo de CV.

Cristelo *et al.* (2012) evaluaron la efectividad del activador alcalino al adicionar hidróxido de calcio, cloruro de sodio y un superplastificante para estabilizar un suelo residual granítico, los resultados presentados demostraron que al adicionar hidróxido de calcio en la mezcla se aceleraban las reacciones al igual que en el caso de las cenizas volantes tipo C, y como conclusión general plantean que no se justifica el uso de este tipo de aditivos en la mezcla, ya que no se observaron resistencias significativas a edades avanzadas.

Sargent; Hughes; Rouainiy White (2013) estudiaron la estabilización de un suelo artificial limoso empleando un cementante basado en escorias siderúrgicas de alto horno activadas con una solución alcalina mezcla de NaOH:Na₂SiO₃. El suelo tratado con 100 % de escoria presentó la mayor resistencia y rigidez; además, mostró mejor desempeño en ciclos hielo-deshielo y humedecimiento-secado. Zhang *et al.* (2013) utilizaron una mezcla de suelo arcilloso y metacaolin (3-15 % en peso) activado con hidróxido de sodio (NaOH), encontrando que la mezcla es mucho más estable que el suelo sin estabilizar e incluso un 5 % más estable que el suelo estabilizado con cemento portland. La resistencia a la compresión del suelo se incrementa con la proporción del metacaolin y la fragilidad del suelo se ve reducida, con una deformación al momento de fallar los especímenes de 0.08 % para suelos sin metacaolin hasta aproximadamente 3.00 % para suelos estabilizados con 5 y 8 % de

metacaolin, propiedades deseables en la aplicación de pavimentos flexibles. Ghadir y Ranjbar, (2018) utilizaron cenizas volcánicas activadas alcalinamente y reportan el incremento de la resistencia del suelo en un 200 % con respecto al suelo estabilizado con cemento Portland. Abdullah; Shahin; Sarker (2019) evaluaron el efecto de un cementante alcalino basado en la mezcla de CV y GBFS, adicionado al suelo en proporciones hasta de un 30 % respecto al peso de suelo; los autores mencionan que aunque la adición de un 10 % genera una resistencia a 28 días de 1103 kPa, valor comparable al obtenido con 6 % de OPC, en términos de durabilidad es recomendable utilizar un 20 % del cementante, alcanzando resistencias de 2100 kPa, valor que supera el obtenido con 9 % de OPC. Cabe anotar que el contenido óptimo de GBFS en el cementante fue del 20 %.

La implementación de los cementantes activados alcalinamente en la fabricación de elementos de mampostería de tierra compactada y estabilizada igualmente ha sido estudiada por diferentes investigadores. Silva *et al.* (2015) reportaron valores aceptables de propiedades mecánicas (compresión y flexión) de elementos de mampostería producidos con tierra compactada y estabilizada con cenizas volantes tipo F activadas alcalinamente. Muñoz; Easton y Dahmen (2015) exploraron la posibilidad de usar aluminosilicatos recuperados de residuos de canteras (residuos de roca triturada y suelos arcillosos) para la fabricación de elementos de mampostería estabilizados y compactados, los resultados fueron prometedores. No obstante, debido a la naturaleza de los precursores fue necesario adicionar nanopartículas de feldespatos y nanosílice para incrementar la reactividad de la mezcla con el activador alcalino, mejorando la resistencia de los especímenes entre 60-80 % y alcanzando resistencias por encima de 8 MPa a temperaturas de curado entre 50 y 60 °C. Palanisamy y Kumar (2018), utilizaron suelos arenosos y compactación manual para la producción de bloques de tierra compactada incorporando ceniza volante tipo C y escoria granulada de alto horno activadas alcalinamente con una mezcla de hidróxido de sodio y silicato de sodio; las resistencias obtenidas fueron superiores a las de bloques de suelo-cemento; además, los autores reportaron un incremento en la resistencia del 20 % al usar 1 % en volumen de residuos de fibras de coco.

Omar-Sore *et al.* (2018) realizaron la estabilización de suelos de tipo laterítico para fabricar bloques de tierra compactada utilizando metacaolin como precursor y NaOH como activador. Las proporciones adicionadas de cementante alcalino al suelo variaron desde 5 hasta 20 % en peso y como material de referencia utilizaron bloques compactados y estabilizados con 8 % de OPC; concluyeron que la adición de 15 % de metacaolin y una temperatura de curado de 60 °C da lugar a incrementos en la resistencia mecánica y mayor estabilidad al agua; además, la conductividad térmica fue similar a la de bloques de suelo sin estabilizar. Las propiedades térmicas de bloques de tierra compactada y estabilizada fueron también evaluadas por Leitão *et al.* (2017), utilizando bloques estabilizados con cementantes activados alcalinamente basados en cenizas volantes; los autores reportaron que, aunque el desempeño fue menos aislante que el de los materiales de construcción convencionales, el coeficiente de transferencia fue de 2.94 W/m²°C que comparado con ladrillos cerámicos (1.74 W/m²°C) o ladrillos de concreto (2.70 W/m²°C) puede considerarse apto para construcciones en países con clima templado o mediterráneo. Se destaca que los materiales de tierra compactada tienen como papel principal proporcionar capacidad térmica para almacenar energía y provocar inercia térmica contra las fluctuaciones de temperatura, más que comportarse como aislantes térmicos.

Otro tipo de aplicaciones que han involucrado suelos estabilizados usando cementantes activados alcalinamente es en el mejoramiento de bases, subbases, subrasantes en el diseño de vías e incluso suelos estabilizados como capa de rodadura en vías terciarias. Rios; Cristelo; Viana da Fonseca y Ferreira (2015); Rios; Cristelo; Viana da Fonseca y Ferreira (2016); Rios *et al.* (2019) realizaron una serie de estudios en suelos de tipo limo arenoso estabilizado con un cementante activado alcalinamente a base de cenizas volantes tipo F y silicato e hidróxido de sodio como activador, para evaluar su posible aplicación en la construcción de carreteras en vías terciarias no pavimentadas o como reemplazo del suelo-cemento en aplicaciones viales como bases o subbases. Los resultados demostraron que la resistencia y la rigidez incrementaban significativamente; la diferencia más marcada entre este sistema de estabilización y el convencional fue la velocidad en la que las mezclas ganaban resistencia mecánica, siendo más progresiva y constante para los suelos estabilizados con cementos activados alcalinamente. El comportamiento del material a ciclos de humedecimiento y secado fue

muy similar al mostrado por mezclas de suelo-cemento de referencia. El uso de altas temperaturas de curado incrementa la cinética de la reacción, lo cual da lugar a resistencias mayores a edades más cortas (Bakharev, 2005; Criado; Fernández-Jiménez; Palomo, 2010; Singh; Subramaniam, 2019). Esta condición hace que este tipo de aplicaciones sean competitivas frente a los métodos tradicionales en lugares con clima cálido y que cuenten con la disponibilidad de cenizas volantes de calidad óptima para ser activadas alcalinamente.

Singhi; Laskar y Ahmed (2017) evaluaron mezclas binarias de GBFS-CV activadas alcalinamente con una solución de hidróxido de sodio para estabilizar suelos de tipo arcilloso con el objetivo de mejorar la capa subrasante para la construcción de carreteras; este estudio corroboró lo publicado por anteriores investigaciones en cuanto al incremento de la resistencia mecánica por parte del suelo estabilizado; respecto a la durabilidad en presencia de sulfatos del suelo activado resultó ser más resistente que el suelo-cemento de referencia. En este tipo de aplicaciones viales, los suelos lateríticos, característicos en zonas tropicales y que presentan algunos problemas de estabilización, con los cementantes tradicionales pueden ser estabilizados con estos cementantes alternativos.

Autores como Phummiphan *et al.* (2017) realizaron ensayos de resistencia a la compresión no confinada de suelos lateríticos estabilizados con cementantes activados alcalinamente basados en cenizas volantes, demostrando que los resultados eran comparables a los exigidos por las especificaciones nacionales tailandesas para este tipo de materiales, al cumplir los requisitos mínimos de resistencia a 7 días en condiciones saturadas para fabricación de carreteras de alto y bajo volumen; la adición de GBFS aceleró la reacción y produjo un incremento en los productos de reacción del cementante, geles de silicatos de calcio hidratado (C-S-H) y aluminosilicatos de sodio hidratados (N-A-S-H).

Además de suelos de tipo arenoso y lateríticos se ha investigado la estabilización de suelos altamente expansivos utilizando cenizas volcánicas activadas alcalinamente con hidróxido de potasio e hidróxido de calcio. Miao *et al.* (2017), demostraron que con este cementante se logró reducir la plasticidad del suelo desde 34,8 hasta 14,2 % y con respecto a los activadores utilizados en esta investigación el hidróxido de potasio fue más efectivo por su alto carácter alcalino; también se redujo el potencial de hinchamiento del suelo estabilizado, la resistencia a 90 días de este suelo estabilizado fue de 16,55 MPa. Abdeldjouad *et al.* (2019) analizaron el efecto del contenido de arcilla en la estabilización del suelo con y sin cenizas de aceite de palma (POFA) mezcladas con un activador alcalino a base de potasio (KOH) de concentración 10M. Los resultados mostraron que los minerales arcillosos juegan un papel importante en la estabilización del suelo con activación alcalina; y en general las mayores resistencias (150 y 600 kPa a 7 días y entre 900 y 2000 kPa a 28 días) fueron obtenidas con el cementante álcali-activado. En el mismo sentido, Pourakbar *et al.* (2016) reportaron que un 15 % de POFA contribuye al aporte de sílice y alumina reactiva, lo que induce que la resistencia del suelo luego de su estabilización incremente a 359 kPa a 7 días; así mismo los autores recomiendan el uso de una solución 10 M de NaOH como activador considerando el menor costo comparado al KOH.

Un artículo publicado recientemente por Miranda *et al.* (2020) presenta los resultados de la construcción de 80 m² de una capa estabilizada, de 2,5 m de ancho, utilizando diferentes cementantes, tres de los cuales se basan en el uso de ceniza volante activada alcalinamente y los dos restantes corresponden a OPC y cal considerados como materiales de referencia. En este estudio además de los ensayos técnicos, que indican que el desempeño mecánico del suelo estabilizado con ceniza activada es similar al estabilizado con los cementantes tradicionales, se realizaron análisis financieros y medioambientales. Los autores informan que las metodologías de aplicación, equipos y procedimientos pueden ser las mismas tradicionales, pero recomiendan reducir las proporciones de activadores alcalinos o su reemplazo por activadores sólidos y ambientalmente más sostenibles para lograr menores costos e impacto ambiental.

2.2.2. Ventajas y desventajas de la estabilización química de suelos usando cementantes activados alcalinamente

La ventaja más significativa del uso de cementantes activados alcalinamente en los procesos de estabilización de suelos radica principalmente en la utilización de subproductos o residuos de procesos industriales, tales como cenizas volantes, escorias siderúrgicas, residuos de demolición, residuos de vidrio y en teoría cualquier material compuesto por aluminosilicatos, lo cual contribuye a disminuir la explotación de recursos naturales y las emisiones de CO₂, a la par que se valorizan este tipo de residuos, es decir se minimiza el impacto ambiental. McLellan *et al.* (2011) realizaron un estudio del ciclo de vida y del costo de cementantes activados alcalinamente vs OPC, encontrando que bajo las condiciones estudiadas los productos de cementos activados alcalinamente reducían entre 44-64 % la emisión de gases de efecto invernadero con respecto a OPC, pero los costos asociados se incrementaron casi al doble en comparación con los productos de OPC; estos resultados coinciden con los estudios realizados por Cristelo *et al.* (2015).

Entre las desventajas de usar cementantes activados alcalinamente en aplicaciones de estabilización de suelos, aparte de los costos posibles de fabricación, se puede mencionar el uso de silicato de sodio como activador, el cual afecta los indicadores ambientales ya que es el componente que aporta a las emisiones de CO₂, debido a las altas temperaturas requeridas en su proceso de producción, y a su vez eleva los factores de toxicidad (Habert; D'Espinose De Lacaillerie; Roussel, 2011) tanto en humanos como en fuentes agua y en los suelos. Con el objetivo de minimizar o eliminar el uso del silicato, se han adelantado varias investigaciones por parte de la comunidad científica en las que se han evaluado algunos residuos para usarlos como activadores alcalinos o generadores de sílice reactiva en la mezcla con los precursores. Torres-Carrasco y Puertas (2014) realizaron un estudio del proceso de solubilidad de varios tipos de residuos de vidrio en soluciones alcalinas con el objetivo de generar soluciones de silicato de sodio para usarlas como activador en la preparación de cementantes y concretos; los autores concluyeron que, para lograr una buena solubilidad de los residuos, se debe implementar un proceso con temperaturas por encima de 80 °C, además, los residuos de vidrio deben tener tamaños de partícula inferiores a 45 µm para garantizar una solubilidad de aproximadamente el 60 %. Torres-Carrasco y Puertas (2015), realizaron la caracterización mecánica y microestructural de un cementante activado alcalinamente a base de ceniza volante, usando como activador alcalino una mezcla de NaOH con residuos de vidrio y concluyeron que este tipo de residuos de vidrio puede ser un excelente sustituto del silicato de sodio comercial para activar cenizas volantes. Fernández-Jiménez; Cristelo; Miranda y Palomo (2017); Cristelo *et al.* (2019), hicieron estudios de la sustentabilidad de utilizar residuos industriales como precursores y activadores para sintetizar cementantes a base de cenizas volantes; los autores emplearon residuos de vidrio, residuos de anodizado de aluminio y residuos de solución de limpieza de moldes de aluminio como remplazo del silicato de sodio y NaOH en la mezcla; los resultados de las resistencias fueron muy similares a las obtenidas utilizando cementantes activados con las soluciones activadoras convencionales. El uso de residuos agroindustriales como la ceniza de cascarilla de arroz y residuos de la producción de caolín fueron evaluados por Passuello *et al.* (2017); en un análisis de ciclo de vida realizado por los autores se demostró que, frente al silicato de sodio comercial, las cenizas de cascarilla de arroz reducían seis de las nueve categorías de impacto en aproximadamente un 60 %.

Aunque los cementantes activados alcalinamente se han estado desarrollando desde hace ya varios años, esta es una tecnología que tiene mucho por ser explorada ya que como se puede apreciar existen varios estudios que demuestran sus excelentes propiedades aglomerantes en diversas aplicaciones y en especial el uso potencial de estos cementantes para la estabilización de suelos y sus aplicaciones geotécnicas. En general, los esfuerzos de los investigadores se deben centrar en la búsqueda de cementantes que sean viables tanto en lo económico, como en lo técnico y ambiental. La optimización de las mezclas entre precursores y activadores, el uso de activadores que disminuyan los impactos en su fabricación y la disponibilidad de encontrar precursores o residuos disponibles de buena calidad, son algunos de los retos que se deben superar si se quiere pensar en este tipo de cementantes como un remplazo efectivo al uso de cementantes a base de calcio. Otro reto importante de

la aplicación de este tipo de cementantes es la preparación en obra, ya que principalmente se utilizan soluciones alcalinas acuosas, que generalmente son corrosivas, viscosas y difíciles de manejar en aplicaciones de gran magnitud.

En estudios recientes, se han reportado los denominados “*one-part geopolimer*”, estos materiales solo necesitan agregar agua para ser utilizados en servicio (Luukkonen *et al.*, 2018) ya que sus componentes principales son de carácter sólido y se activan, de igual manera que el cemento, al incorporar el agua en la mezcla. Sin embargo, este tipo de materiales aún están en fase de desarrollo. Es importante mencionar que aún hace falta investigaciones sobre las propiedades de durabilidad en la estabilización de suelos con este tipo de cementantes alternativos y a su vez, se requiere la normalización del producto en el campo de aplicación.

3. Conclusiones y líneas de investigación futura

Con base en la revisión de los artículos publicados en las bases de datos se puede extraer las siguientes conclusiones, así como identificar los futuros campos de investigación y retos que deben ser revisados para lograr la implementación de la tecnología de activación alcalina en los procesos de estabilización de suelos:

- Los estudios sobre la aplicación de cementantes activados alcalinamente en el proceso de estabilización de suelos ha venido incrementando en el tiempo de manera notable, particularmente por la posibilidad de hacer uso como precursores del cementante de algunos residuos o subproductos, minimizando el consumo de recursos naturales y contribuyendo a menores consumos energéticos. Sin embargo, algunos de los residuos estudiados hasta ahora, no cuentan con la calidad, cantidad y homogeneidad suficiente para su utilización masiva en todos los países, lo cual implica que se deben identificar fuentes de precursores viables locales que, cumpliendo con criterios de calidad, permitan la implementación de la tecnología. Por ejemplo, debe investigarse el uso de residuos cerámicos o de construcción y demolición y de puzolanas volcánicas, materiales que han demostrado ser excelentes precursores de cementantes alcalinos para otros tipos de usos y cuya disponibilidad puede ser factible en numerosas regiones.

- Así mismo, cabe mencionar, la posibilidad de combinar los tipos de estabilización química convencional con el alternativo de activación alcalina. De existir sinergia entre estos, su aplicación contribuiría a la reducción del consumo de cemento y cal, lo cual generaría menores impactos ambientales y probablemente menores costos. Este es por tanto, una línea necesaria de investigación futura.

- A partir del análisis de los resultados obtenidos en los diferentes estudios, en general, se aprecia que la tecnología de activación alcalina es viable como método alternativo en la estabilización de suelos, aunque aun existen una serie de retos que deben ser superados para su implementación. Entre los retos a abordar se pueden señalar los siguientes: el desarrollo de activadores alternativos con menores impactos ambientales en su producción; los estudios de durabilidad a largo plazo de los suelos activados alcalinamente; y la validación de los resultados de investigación con pruebas en campo.

- Adicionalmente, es importante la formulación de normas y especificaciones aplicables a estos nuevos materiales, tomando en consideración las normas y códigos constructivos vigentes, así como evaluar los costos financieros y ambientales de la tecnología para lo cual se hace necesario incorporar estudios de ciclo de vida de los proyectos y productos.

Referencias

- ASTM International. (2017). Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization (ASTM D4609). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2018). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618). West Conshohocken, PA.
- Abdeldjouad, Lokmane; Asadi, Afshin; Nahazanan, Haslinda; Huat, Bujang; Dheyab, Wisam; Elkhebu, Ahmed (2019). Effect of Clay Content on Soil Stabilization with Alkaline Activation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, 4.
<https://doi.org/10.1007/s40891-019-0157-y>
- Abdullah, Hayder; Shahin, Mohamed; Sarker, Prabir (2019). Use of Fly-Ash Geopolymer Incorporating Ground Granulated Slag for Stabilisation of Kaolin Clay Cured at Ambient Temperature. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 721-740.
<https://doi.org/10.1007/s10706-018-0644-2>
- Al-Mukhtar, Muzahim; Khattab, Suhail; Alcover, Jean-Francois (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- Al-Rawas, Amer (2002). Microfabric and mineralogical studies on the stabilization of an expansive soil using cement by-pass dust and some types of slags. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1150-1167.
<https://doi.org/10.1139/t02-046>
- Andrew, Robbie (2017). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 1-52.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.831455>
- Arora, Sunil; Aydilek, Ahmet (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 640-649.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2005\)17:6\(640\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:6(640))
- Babu, K. G.; Rao, G. S. N. (1996). Efficiency of fly ash in concrete with age. *Cement and Concrete Research*, 26(3), 465-474.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85034-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85034-4)
- Bahar, Ramdane; Benazzoug, M.; Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*, 26, 811-820.
<https://doi.org/doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224-1232.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>
- Behnood, Ali (2018a). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, 14-32.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>

- Behnood, Ali (2018b). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, 17, 14–32.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>
- Bell, F.G. (1996). Lime Stabilization of Clay Minerals and Soil. *Engineering Geology*, 42(42), 223–237.
[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bensaifi, E.; Bouteldja, F.; Nouaouria, M. S.; Breul, P. (2019). Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. *Transportation Geotechnics*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100244>
- Billong, Ndigui; Melo, U. C.; Louvet, F.; Njopwouo, D. (2009). Properties of compressed lateritic soil stabilized with a burnt clay-lime binder: Effect of mixture components. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2457-2460.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.017>
- Chen, Huie; Wang, Qing (2006). The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 445–448.
<https://doi.org/10.1007/s10064-005-0030-1>
- Cokca, Erdal; Yazici, Veysel; Ozaydin, Vehbi (2009). Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-Cement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(4), 489–499.
<https://doi.org/10.1007/s10706-008-9250-z>
- Coudert, Elodie; Paris, Michael; Deneele, Dimitri; Russo, Giacomo; Tarantino, Alessandro (2019). Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution. *Construction and Building Materials*, 201, 539-552.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.188>
- Criado, M.; Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. (2010). Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. *Fuel*, 89(11), 3185–3192.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.051>
- Cristelo, Nuno; Fernández-Jiménez, Ana; Castro, Fernando; Fernandes, Lisete; Tavares, Pedro (2019). Sustainable alkaline activation of fly ash, aluminium anodising sludge and glass powder blends with a recycled alkaline cleaning solution. *Construction and Building Materials*, 204, 609–620.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.226>
- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Fernandes, Lisete; Teixeira-Pinto, Amândio (2012). Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 29, 167–174.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049>
- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Fernandes, Lisete; Teixeira-Pinto, Amândio (2013). Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica*, 8(4), 395–405.
<https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9>
- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Miranda, Tiago; Oliveira, Daniel; Silva, Rui (2012). Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727–735.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>

- Cristelo, Nuno; Glendinning, Stephanie; Teixeira-Pinto, Amândio (2011). Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 164(2), 73–82.
<https://doi.org/10.1680/grim.900032>
- Cristelo, Nuno; Miranda, Tiago; Oliveira, Daniel; Rosa, Ivo; Soares, Edgar; Coelho, Paulo; Fernandes, Lisete (2015). Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO₂ (eq) emissions. *Journal of Cleaner Production*, 102, 447–460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.102>
- Damtoft, J. S.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.; Gartner, E. M. (2008). Sustainable Development and Climate Change Initiatives. *Cement and Concrete Composites*, 38(2), 115–127.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- Das, Braja (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Auckland, Nueva Zelanda: Global Engineering.
- Das, Biki; Prakash, S.; Reddy, Palli; Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 40–57.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>
- Edil, Tuncer; Acosta, Hector; Benson, Hector (2006). Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 283–294.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:2\(283\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:2(283))
- Fernández-Jiménez, Ana; Cristelo, Nuno; Miranda, Tiago.; Palomo, Ángel (2017). Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1200–1209.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.151>
- Firoozi, Ali; Guney, Olgun; Firoozi, Ali; Baghini, Mojtaba (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26.
<https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Garnica, P.; Perez, A.; Gómez, J.A.; Yhaaraby, E. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Instituto Mexicano Del Transporte, N°201, 68. Retrieved from
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt201.pdf>
- Gartner, Ellis (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
- Ghadir, Pooria; Ranjbar, Navid (2018). Clayey soil stabilization using geopolymers and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361–371.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>
- Gutt, W.; Nixon, P. J. (1979). Use of waste materials in the construction industry Analysis of the RILEM Symposium by Correspondence. *Matériaux et Construction*, 12(70), 255–306.
<https://doi.org/doi:10.1007/bf02473543>
- Habert, G.; D’Espinoza De Lacaille, J. B.; Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>

- Hall, M. R.; Najim, K. B.; Keikhaei, P. (2012). Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. In *Modern earth buildings* (pp. 222–255). Woodhead Publishing Limited.
<https://doi.org/doi:10.1533/9780857096166.2.222>
- Hasan, Umair; Chegenizadeh, Amin; Budihardjo, Mochamad; Nikraz, Hamid (2016). Experimental Evaluation of Construction Waste and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Alternative Soil Stabilisers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 1707–1722.
<https://doi.org/10.1007/s10706-016-9983-z>
- Higgins, D. (2005). *Soil stabilisation with ground granulated blastfurnace slag*. UK Cementitious Slag Makers Association (CSMA). Retrieved from
http://www.ukcsma.co.uk/files/csma_report_on_soil_stabilisation.pdf
- Horiuchi, Sumio; Kawaguchi, Masato; Yasuhara, Kazuya (2000). Effective use of fly ash slurry as fill material. *Journal of Hazardous Materials*, 76(2–3), 301–337.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00205-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00205-3)
- Horpibulsuk, Suksun; Rachan, Runglawan; Chinkulkijniwat, Avirut; Raksachon, Yuttana; Suddeepong, Apichat (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011–2021.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>
- Hughes, Paul; Glendinning, Stephanie (2004). Deep Dry Mix Ground Improvement of a Soft Peaty Clay Using Blast Furnace Slag and Red Gypsum. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37(1996), 205–216.
- Ismeik, Muhannad; Shaqour, Fathi (2020). Effectiveness of lime in stabilising subgrade soils subjected to freeze-thaw cycles. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 42–60.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1479289>
- Jing, Ruxin; Zhang, Feng; Feng, Decheng; Liu, Xueyan; Scarpas, Athanasios (2019). Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Compacted Silty Clay Subjected to Freeze–Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019244.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002893](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002893)
- Joshi, Amruta; Patel, Satyajit; Shahu, Jagdish (2019). Utilization of Class ‘C’ Fly Ash in Flexible Pavement System – A Review. In: Sundaram R., Shahu J., Havanagi V. (eds). *Geotechnics for Transportation Infrastructure*, 29, 629–638.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7_50
- Khemissa, Mohamed; Mahamedi, Abdelkrim (2014). Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. *Applied Clay Science*, 95, 104–110.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.017>
- Kim, Bumjoo; Prezzi, Monica; Salgado, Rodrigo (2005). Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 914–924.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:7(914))
- Kim, Yeonbae; Worrell, Ernst (2002). CO2 emission trends in the cement industry: An international comparison. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(2), 115–133.
<https://doi.org/10.1023/A:1022857829028>

- Kumar, Praveen; Chandra, Satish; Vishal, R. (2006). Comparative Study of Different Subbase Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 576–580.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:4\(576\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:4(576))
- Leitão, Dinis; Barbosa, José; Soares, Edgar; Miranda, Tiago; Cristelo, Nuno; Briga-Sá, Ana (2017). Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated fly ash. *Energy and Buildings*, 139, 44–52.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.068>
- Liu, Jin; Shi, Bin; Jiang, Hongtao; Huang, He; Wang, Gonghui; Kamai, Toshitaka (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117(1–2), 114–120.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.011>
- Luukkonen, Tero; Abdollahnejad, Zahra; Yliniemi, Juho; Kinnunen, Paivo; Illikainen, Mirja (2018). One-part alkali-activated materials : A Review. *Cement and Concrete Research Journal*, 103, 21–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- Ma, Cong; Chen, Bing; Chen, Longzhu (2016). Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 123, 414–423.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.018>
- Makusa, Gregory (2013). *State of the Art Review Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice* (tesis de pregrado). University of Technology, Luleå, Sweden.
- Mallela, J.; Quintus, H. Von; Smith, K. L. (2004). *Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design* (tesis de pregrado). University Avenue , Virginia, USA.
- Manimaran, A.; Santhosh, S.; Ravichandran, P. T. (2018). Characteristics study on sub grade soil blended with ground granulated blast furnace slag. *Rasayan Journal of Chemistry*, 11(1), 401–404.
<https://doi.org/10.7324/RJC.2018.1112044>
- McDowell, Chester (1959). Stabilization of Soils with Lime, Lime-Flyash, and Other Lime Reactive Materials. *Highway Research Board Bulletin*, 231, 60–66. Retrieved from
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/231/231-004.pdf>
- McLellan, Benjamin; Williams, Ross; Lay, Janine; Van Riessen, Arie; Corder, Glen (2011). Costs and carbon emissions for geopolymers pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Miao, Shiding; Wei, Cundi; Shen, Zhaopu; Wang, Xuelian; Luo, Feng; Huang, Xiaoming (2017). Stabilization of Highly Expansive Black Cotton Soils by Means of Geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002023](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002023)
- Millogo, Younoussa; Morel, Jean-Claude; Traoré, Karfa; Ouedraogo, Raguilnaba (2012). Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials*, 26(1), 663–669.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.069>

- Miranda, Tiago; Leitão, Dinis; Oliveira, Joel; Corrêa-Silva, Manuela; Araújo, Nuno; Coelho, João; Fernández-Jimenez, Ana; Cristelo, Nuno (2020). Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118427.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>
- Moghal, Arif (2017). State-of-the-Art Review on the Role of Fly Ashes in Geotechnical and Geoenvironmental Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017072.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001897](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001897)
- Muñoz, J. F.; Easton, T.; Dahmen, J. (2015). Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials. *Construction and Building Materials*, 95, 86–95.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.144>
- Nortcliff, Stephen; Hulpke, Herwig; Bannick, Claus; Terytze, Konstantin; Knoop, Gerhard; Bredemeier, Michael; Schulte-Bisping, Hubert (2012). Soil, 1. Definition, Function, and Utilization of Soil. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 33, 399–419.
<https://doi.org/10.1002/14356007.b07>
- Omar-Sore, Seick; Messan, Adamah; Prud'homme, Elodie; Escadeillas, Gilles; Tsobnang, François (2018). Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Construction and Building Materials*, 165, 333–345.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>
- Palanisamy, P.; Kumar, P. S. (2018). Effect Molarity in Geopolymer earth Brick Reinforced With Fibrous Coir Wastes Using Sandy Soil and Quarry Dust as Fine Aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 347-358.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.01.009>
- Pandey, Anil; Rabbani, Ahsan (2017). Stabilisation of Pavement Subgrade Soil Using Lime and Cement : Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 5733–5735.
- Passuello, Ana; Rodríguez, Erich; Hirt, Eduardo; Longhi, Marlon; Bernal, Susan; Provis, John; Kirchheim, Ana (2017). Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Production*, 166, 680–689.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.007>
- Phummiphan, Itthikorn; Horpibulsuk, Suksun; Rachan, Runglawan; Arulrajah, Arul; Shen, Shui-Long; Chindaprasirt, Prinya (2017). High Calcium Fly Ash Geopolymer Stabilized Lateritic Soil and Granulated Blast Furnace Slag Blends as a Pavement Base Material. *Journal of Hazardous Materials*, 341, 257–267.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.067>
- Portland Cement Association. (1992). *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Illinois: Engineering Bulletin.
- Pourakbar, Shahram; Huat, Bujang; Asadi, Afshin; Fasihnikoutalab, Mohammad (2016). Model Study of alkali-Activated Waste Binder for soil stabilization. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(4), 35.
<https://doi.org/10.1007/s40891-016-0075-1>
- Provis, John; Bernal, Susan (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Reviews of Materials Research*, 44, 299-327.
<https://doi.org/doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>

- Prusinski, Jan; Bhattacharja, Sankar (2007). Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1652(1), 215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
- Puppala, Anand (2016). Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. *Transportation Geotechnics*, 9, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.004>
- Puppala, Anand; Pedarla, Aravind (2017). Innovative ground improvement techniques for expansive soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2, 24. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0079-2>
- Quintanilla, C.A. (2007). *El Estado del Arte del Suelo-Cemento en Estructuras de Pavimentos*. FICEM, Federación Interamericana del Cemento (Federación). Panamá. Retrieved from https://www.ibch.com/index.php?option=com_remository&Itemid=&func=startdown&id=14
- Rios, Sara; Cristelo, Nuno; Viana da Fonseca, António; Ferreira, Cristiana (2015). Structural Performance of Alkali-Activated Soil Ash versus Soil Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001398](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001398)
- Rios, Sara; Cristelo, Nuno; Viana da Fonseca, António; Ferreira, Cristiana (2016). Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. *International Journal of Geomechanics*, 17(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000783](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000783)
- Rios, Sara; Ramos, Catarina; Viana da Fonseca, António; Cruz, Nuno; Rodrigues, Carlos (2016). Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads. *Procedia Engineering*, 143, 1392–1400. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.164>
- Rios, Sara; Ramos, Catarina; Viana da Fonseca, António; Cruz, Nuno; Rodrigues, Carlos (2019). Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(2), 245–267. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1275987>
- Rivera, Jhonathan; Cuarán-Cuarán, Zuleny; Vanegas-Bonilla, Nathalie; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2018). Novel use of waste glass powder: Production of geopolymeric tiles. *Advanced Powder Technology*, 29, 3448–3454. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>
- Robayo-Salazar, Rafael; Rivera, Jhonathan; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2017). Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.122>
- Robayo, Rafael; Mulford, Alexandra; Munera, Jorge; Mejía de Gutiérrez, Ruby (2016). Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023>
- Sargent, Paul; Hughes, Paul; Rouainia, Mohamed; White, Maggie (2013). The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Engineering Geology*, 152, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.013>

- Sekhar, Darshan; Nayak, Sitaram; Preetham, H. K. (2017). Influence of Granulated Blast Furnace Slag and Cement on the Strength Properties of Lithomargic Clay. *Indian Geotechnical Journal*, 47(3), 384–392. <https://doi.org/10.1007/s40098-017-0228-8>
- Senol, Aykut; Edil, Tuncer; Bin-Shafique, Sazzad; Acosta, Hector; Benson, Craig (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.005>
- Shi, Caijun; Jiménez, A. F.; Palomo, Angel (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41, 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
- Silva, Rui; Soares, Edgar; Oliveira, Daniel; Miranda, Tiago; Cristelo, Nuno; Leitão, Dinis (2015). Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 75, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.038>
- Singh, G. V. P. B.; Subramaniam, K. V. L. (2019). Influence of processing temperature on the reaction product and strength gain in alkali-activated fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 95, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.010>
- Singhi, Binod; Laskar, Aminul; Ahmed, Mokaddes (2017). Mechanical Behavior and Sulfate Resistance of Alkali Activated Stabilized Clayey Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 1907–1920. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0216-x>
- Sivapullaiah, P. V.; Moghal, A. A. B. (2010). Role of Gypsum in the Strength Development of Fly Ashes with Lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(2), 197–206. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000158](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000158)
- Syed-Zuber, S. Z.; Kamarudin, H.; Mustafa, A.; Abdullah, M.M.A.B; Bingussain, M; Salwas, M. (2013). Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7, 258-265.
- Torres-Carrasco, Manuel; Puertas, F. (2014). Sodium silicate solutions from dissolution of glasswastes. Statistical analysis. *Materiales de Construcción*, 64(314), e014. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.05213>
- Torres-Carrasco, Manuel; Puertas, F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of Cleaner Production*, 90, 397–408.
- Tremblay, Hélène; Duchesne, Josée; Locat, Jacques; Leroueil, Serge (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 535–546. <https://doi.org/10.1139/t02-002>
- Trussell, S.; Spence, R. D. (1994). A Review of Solidification/Stabilization Interferences. *Waste Management*, 14(6), 507–519. [https://doi.org/doi:10.1016/0956-053X\(94\)90134-1](https://doi.org/doi:10.1016/0956-053X(94)90134-1)
- U.S.Department of Transportation. (1992). *Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations*. Volume II, Mixture Desing Considerations. 400 Seventh Street, SW.: Washington, D.C. 20590.

- Wu, Yanguang; Lu, Bowen; Bai, Tao; Wang, Hao; Du, Feipeng; Zhang, Yunfei; Cai, Lu; Jiang, Can; Wang, Wenjun (2019). Geopolymer, green alkali-activated cementitious material synthesis, applications and challenges. *Construction and Building Materials*, 224, 930–949.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.112>
- Yi, Yaolin; Zheng, Xu; Liu, Songyu; Al-Tabbaa, Abir (2015). Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil. *Applied Clay Science*, 111, 21–26.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.023>
- Yunus, Mohd; Zurairahetty, Nor (2007). *Stabilization of Organic Clay Using Lime-Added Salt*. Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering. Retrieved from
<http://eprints.utm.my/id/eprint/11383/>
- Zhang, Mo; Guo, Hong; El-Korchi, Tahar; Zhang, Guoping; Tao, Mingjiang (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47, 1468–1478.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>
- Zhao, Honghua; Ge, Louis; Petry, Thomas; Sun, Yi-Zhen (2014). Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 1009–1017.
<https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>