

# Uso de estabilizadores de suelo: una revisión del impacto al corte y asentamiento

## Use of soil stabilizers: a review of the impact on cutting and settlement

Yeimi Viviana Noriega Armas <sup>1</sup>, Junior Arturo Vives Arroyo <sup>2</sup>, Muñoz Pérez Sócrates Pedro <sup>3</sup>

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-1280-3375>, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Lambayeque Perú, [Narmasyeim@crece.uss.edu.pe](mailto:Narmasyeim@crece.uss.edu.pe)

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-9167-0381>, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Lambayeque Perú, [varroyoj@crece.uss.edu.pe](mailto:varroyoj@crece.uss.edu.pe)

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Lambayeque Perú, [msocrates@crece.uss.edu.pe](mailto:msocrates@crece.uss.edu.pe)



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6856>

Cómo citar: Muñoz Pérez, S. P. (2022). Uso de estabilizadores de suelo: una revisión del impacto al corte y asentamiento.: Uso de estabilizadores. Avances Investigación En Ingeniería, 19(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6856>.

## Resumen

Este documento presenta una revisión de la literatura sobre el uso de estabilizadores tradicionales, no tradicionales y mixtos que se aplican a suelos blandos y arcillosos para mejorar las propiedades mecánicas. Los suelos expansivos tienen una alta resistencia, pero se vuelven problemáticos en presencia de agua; se expanden y se contraen en condiciones húmedas y secas respectivamente, por tal motivo es necesario aplicar estabilizadores a los suelos con la finalidad de mitigar el comportamiento peligroso que estos presentan. Los estabilizadores pueden ser: (1) estabilizadores tradicionales tales como el cemento y la cal, (2) estabilizadores no tradicionales tales como las cenizas volantes, los polímeros, las bioenzimas y otros y (3) estabilizadores mixtos que viene hacer la combinación de los estabilizadores tradicionales y no tradicionales. Este documento tiene como objetivo describir y analizar el comportamiento mecánico que se realizaron en las investigaciones encontradas usando las pruebas de corte directo y consolidación unidimensional. Se revisaron 50 artículos indexados entre los años 2014 al 2020 los cuales se distribuyen de la siguiente manera: 38 artículos son de Scopus, 2 de Scielo, 8 de ScienceDirect y 2 de EBSCO sobre estabilizadores en suelos arcillosos, estabilizadores químicos y naturales.

**Palabras clave:** estabilizadores tradicionales, estabilizadores no tradicionales, estabilizadores mixtos, resistencia al cizallamiento y asentamiento.

## Abstract

This document presents a review of the literature on the use of traditional, non-traditional, and mixed stabilizers applied to soft and clay soils to improve mechanical properties. Expansive soils have a high resistance, but become problematic in the presence of water; they expand and contract in humid and dry conditions respectively, for this reason it is necessary to apply stabilizers to the soils in order to mitigate the dangerous behavior they present. The stabilizers can be: (1) traditional stabilizers such as cement and lime, (2) non-traditional stabilizers such as fly ash, polymers, bioenzymes and others

and (3) mixed stabilizers that come from the combination of traditional and non-traditional stabilizers. The objective of this document is to describe and analyze the mechanical behavior that was carried out in the investigations found using direct shear and one-dimensional consolidation tests. 50 articles indexed between the years 2014 to 2020 were reviewed and are distributed as follows: 38 articles are from Scopus, 2 from Scielo, 8 from ScienceDirect and 2 from EBSCO on stabilizers in clay soils, chemical and natural stabilizers.

**Keywords:** traditional stabilizers, non-traditional stabilizers, mixed stabilizers, resistance to shear and settlement.

---

## 1. Introducción

El gran déficit que enfrenta la sociedad en diversas partes del mundo y destaca, es la ausencia de rutas pavimentadas por falta de conexiones regionales y asociado a su vez a los problemas más frecuentes que se da en las carreteras es la inestabilidad y/o deslizamientos de tierra, que generan peligros geológicos e impactos negativos también en el ámbito socio- económico y ambiental. Poniendo en riesgo las pérdidas de vida de muchas personas [1]. Cuyas desventajas se han visto sobre todo en las zonas rurales o pueblos aledaños, es la falta de integración de comunidades y territorios, falta de comunicación vial, generando que no permita el desarrollo de las actividades cotidianas, no incrementando el desarrollo económico y actividades productivas en la población.

En Perú, como en gran parte de América Latina, existe un gran déficit en la infraestructura vial, en mayor medida se destaca la ausencia de rutas pavimentadas para conexiones regionales, alcanzando un total de 141,603.00 km de red de carreteras sin pavimentar [2].

La inestabilidad y/o deslizamiento del suelo presentes en la infraestructura vial y laderas se produce debido a diversos factores como la naturaleza de los materiales involucrados ante fenómenos geológicos y lo que más destacamos es la falta de identificación de los tipos de suelos que posee un comportamiento característico en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Una de los tipos de suelos que se presenta en las propiedades físicas y resalta en las carreteras son los suelos arcillosos lo cual significa una gran dificultad, ya que representan baja resistencia al corte y alto potencial expansivo [3]. Los daños asociados con los suelos expansivos no se deben a la falta de soluciones de ingeniería inadecuadas, sino a la falta de identificación de la existencia y magnitud de la expansión de estos suelos en la etapa inicial de la planificación del proyecto. [4].

Es así por lo que es un reto tanto para comunidad y para los gobiernos proponer soluciones para construir carreteras accesibles, duraderas y que durante las etapas de ejecución de los proyectos viables se vean obligados a evaluar métodos y nuevas técnicas de estabilización como solución. [4]

## 2. Metodología

El presente documento se elaboró usando las bases de datos Scopus, Scielo, ScienceDirect y EBSCO. Se encontraron 50 artículos indexados y distribuidos de la siguiente manera, 38

artículos en Scopus, 02 artículos en Scielo, 8 artículos en ScienceDirect y 2 artículos en EBSCO, donde se encontraron 18 artículos del 2020, 16 del 2019, 3 del 2018, 7 del 2017, 3 del 2016 y 3 del 2014. Para la búsqueda de los artículos se usaron las siguientes palabras claves: stabilizers in clay soils, soil stabilization, direct cut resistance. Para un mejor detalle en la tabla 1 se muestra los artículos usados como literatura según base de datos y años de publicación.

**Tabla 1.** Artículos usados como literatura, según base de datos y año de publicación.

Base de datos	Años de publicación						Total
	2014	2016	2017	2018	2019	2020	
Scopus	2	1	5	3	14	13	38
Scielo	-	-	-	-	-	2	2
Science Direct	1	1	2	-	2	2	8
Ebsco	-	1	-	-	-	1	2
Total	3	3	7	3	16	18	50
- Ningún documento encontrado							

### 3. Estabilizaciones no tradicionales en suelos.

Esta metodología de estabilización de suelo se ha realizado desde la antigüedad cuando los pobladores eran cazadores o cuando comenzaron a poblar Mesopotamia donde los suelos eran muy fértiles en la agricultura pero tenían baja resistencia para sus construcciones, realizando estabilizaciones con madera, cenizas y arcillas marinas como se reporta en el trabajo de Ekinci en el 2020 en su investigación titulada "Strength, Stiffnes and Microstructure of Wood-Ash Stabilized Marine Clay," que tuvo como finalidad evaluar la resistencia al corte en condiciones de drenaje consolidado, la muestra que se utilizó fue de 5% de ceniza de madera y 10% de muestras reemplazadas con cemento de ceniza de madera con 7 días de curado, se obtuvo que la cohesión aumentó debido al incremento del contenido de cemento, la sustitución del cemento con un 5% de ceniza de madera dio lugar a un aumento adicional de la cohesión, el adicional de ceniza de madera al 10% resultó una cohesión reducida, el aumento de la cohesión con un 5% de sustitución de cenizas de madera indica la introducción de una fuerza de unión con las partículas de arcilla, estabilizando la arcilla marina con sólo el cemento resultó un aumento del ángulo de fricción de 27<sup>a</sup> a 42<sup>a</sup> [5].

En el Perú también se realizaron estudios de estabilizaciones no tradicionales utilizando cenizas de las ladrilleras y cenizas de madera con carbón con la finalidad de aprovechar los residuos de las ladrilleras y solucionar el problema de la inestabilidad de los suelos arcillosos. Ayala en el 2019 en "Study of the effect of the addition of ash from artisan brick kilns in the stabilization of clay soils for pavements," señala que el deterioro de los pavimentos se debe a la presencia de suelos arcillosos los cuales se destacan por poseer baja resistencia al corte y alto potencial expansivo, siendo un reto en los proyectos de obras civiles. En este estudio propuso la estabilización de suelos haciendo uso de un material residual como es la ceniza de ladrillo artesanal con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y expansivas del suelo [6]. y Aponte y sus colaboradores en el 2019 en su investigación «Estudio experimental del comportamiento geotécnico de suelo arenoso con ceniza de madera y carbón proveniente de ladrilleras artesanales,» se realizaron ensayos de Proctor estándar, corte directo y triaxial consolidado no drenado (CU) y concluyeron que el diseño ideal para la estabilización es con

la utilización del 10% de cenizas, con un tiempo de curado de 7 días cabe destacar que si aumentamos el tiempo de curado la resistencia del suelo puede incrementar, siendo así que para un 10% de cenizas se logró una cohesión de 0.98 kg/cm<sup>2</sup> y un ángulo de fricción de 35.93, así mismo menciona que la muestra suelo ceniza ofrece mayores valores de esfuerzo cortante en confinamientos bajos y si aumenta en confinamiento este se puede igualar al esfuerzo cortante del suelo puro, siendo así una solución sostenible ante la contaminación del aire y la inestabilidad de suelos arcillosos [7]. También menciona Álvarez 2019 que una forma de estabilizar suelos arcillosos es haciendo uso de residuos plásticos o tereftalato de polietileno (PET) la cual puede aumentar la resistencia al corte y a la vez solucionar los problemas de contaminación ambiental e incentivar el reciclaje de plásticos [8].

Dentro de otros insumos no tradicionales para la estabilización de suelos tenemos las cenizas volantes que fueron utilizadas por Seyrek 2018 en su artículo «Engineering behavior of clay soils stabilized with class C and class F fly ashes.» en la cual menciona que en la incorporación de cenizas volantes tipo C mejora los parámetros físicos de los suelos arcillosos [9], mientras que Coudert y sus colaboradores en el 2019 en su trabajo «Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution,» evaluó la estabilización de suelos blandos o arcillosos utilizando como aglutinante cenizas volantes con alto contenido de calcio activado por álcali o tipo C mezclado con metacaolín y concluyeron que la incorporación del 20 y 50 % de meta caolín más el activador silicato de sodio, ocasiona una reacción química obteniendo nuevos compuestos como la tenardita Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y un silicato amorfo dando una estructura tridimensional rígida con menos contenido de poros capaz de mejorar sus propiedades mecánicas y resistencia al corte [10].

Otra forma de estabilizar suelos arcillosos se hizo mediante desechos industriales utilizando ceniza de bagazo, escoria de acero y escoria de horno, la cual fue reportada por Gandhi en 2020 en su trabajo «Performance evaluation of optimum mix of different waste materials for bagasse ash stabilized expansive soil,» en sus resultados menciona que la escoria de acero en forma de polvo es menos efectiva en combinación con ceniza de bagazo, para mejorar la arcilla recomendó usar 15% de ceniza de bagazo, el 10% de la escoria de alto horno granulada molida y 7.5% de la escoria de cemento, esta combinación es efectiva para estabilizar suelos arcillosos o expansivos [11]. Un trabajo para suelos arenosos bien graduados lo realizó Simatupang en el 2020 en “The Mechanical Properties of Fly-Ash-Stabilized Sands,» donde incorporo cenizas volantes a las muestras y las cuales fueron sometidas a corte directo y resistencia a la compresión. Las muestras ensayadas tuvieron una edad de 7, 14, 28 y 56 días., con el ensayo de corte directo se determinó que un contenido más alto de cenizas volantes y tiempo de curado la resistencia al cizallamiento aumenta [12].

Otro material alternativo para poder estabilizar suelos arcillosos o blandos es la ceniza de la hoja del bambú que es un recurso natural muy abundante. En forma de ceniza, la hoja de bambú contiene alto contenido de sílice que podría usarse como material de puzolana, Wijaya en el 2020 realizó pruebas de relación de soporte de california variando las cenizas de la hoja de bambú en concentraciones de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% como sustituto del cemento que está contenido en el suelo en una proporción del 12% de la masa del suelo seco. En su investigación indico que el 25% de la sustitución de cemento por ceniza de hoja de bambú mejora el valor de relación de soporte de california tanto en condiciones secas como críticas. Además, disminuye el porcentaje de hinchamiento en la mezcla con un 25% de contenido de cenizas de hojas de bambú [13].

Otras investigaciones sugieren que los residuos o subproductos industriales se pueden usar para estabilizar suelos como es el caso de los cementantes activados, lodos aceitosos provenientes de petroleras y la combinación de alcohol polivinílico con carbonatos. En el estudio de Rivera y sus colaboradores en el 2020. En «Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión),» menciona que los cementantes activados alcalinamente son una solución sostenible debido al bajo consumo de energía, baja huella de carbono, y la posibilidad de utilizar residuos y subproductos industriales. Sin embargo, su uso sigue siendo limitado por que no cuentan con la suficiente calidad, cantidad y homogeneidad que son requisitos suficientes para la utilización masiva en todos los países [14]. Alarcón y sus colaboradores en el 2020 en su estudio «Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso,» que se llevó a cabo en Tunja, Colombia utilizó este insumo con la finalidad de reemplazar los materiales convencionales para mejorar la subrasante y a la vez aprovechar los residuos de la extracción del petróleo, en su estudio se realizó ensayos de CBR y módulo de resiliencia y determinó que la adición del 6% de lodo aceitoso mejora la resistencia y la plasticidad del material granular con un tiempo de curado de 26 días [15].

Zhang en el 2019 en su trabajo “Stabilization of Expansive Soil with Polyvinyl Alcohol and Potassium Carbonate,” incorporó alcohol polivinílico y carbonato para la estabilización de suelos expansivos realizando ensayos como, pruebas de hinchamiento libre, compresión no confinada, cizallamiento directo y la resistencia al cizallamiento. Donde evaluó las microestructuras del suelo estabilizado con fotos SEM, mediante una pequeña columna de 1 metro de altura como simulación. Se determinó que de la prueba de oleaje libre resultó ser eficaz la mezcla de los dos componentes (polivinilo y carbonato) que, por separado, de la prueba Edométrica se dedujo que es recomendable porque se podrá controlar el cambio de volumen que generan estos tipos de suelos [16].

Para la estabilización de suelos también se puede utilizar insumos como el aserrín Kerving que fue utilizada en la investigación de Niyomukiza en el 2019 utilizando como muestras suelos de apariencia negro grisáceo encontradas en la carretera Semarang- Purwodadi provincia de Java Central, estos suelos se caracterizan por tener alta plasticidad y bajas propiedades mecánicas, en su investigación incorporó aserrín kerving en proporciones de 0, 3, 5 y 7% las cuales fueron sometidas a los ensayos de límites de Atterberg, prueba de compactación, UCS, CBR. Mediante los ensayos concluyeron que el índice de plasticidad disminuyó, mejoró la trabajabilidad, la resistencia ( $f'c$ ) no confinada y la resistencia al corte [17].

Otras investigaciones relata sobre el uso de materia orgánica como la cascara de huevo para la estabilización de suelos de tipo arcilloso como Índico Alzaidy en el 2019 en “Experimental study for stabilizing clayey soil with eggshell Powder and plastic wastes,» en su investigación uso productos orgánicos y reutilizables en reemplazo de los aditivos químicos, como la cáscara de huevo (PCH) en reemplazo de la cal (CL) y tiras desechos plásticos (TDP), para reducir la fragilidad del suelo estabilizado por el (PCH), sus muestras contenían 2%, 5% y 8% en peso de tierra seca de (PCH) y en (TDP) en 0.25%, 0.5% y 1% en peso seco del suelo. Mediante los ensayos como resistencia al corte directo (RCD), resistencia a la compresión no confinada (RCNC), potencial de hinchamiento (PI), compactación (C) y CBR.

Demostaron que mientras más incrementaba el tiempo de curado más aumentaba los parámetros de la (RCD) y a la (RCNC) del suelo arcilloso estabilizado [18], la investigación de

Bensaifi y sus colaboradores en el 2019 en «Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl,» menciona que las margas son suelos con alta plasticidad que pueden ser tratadas con ligante hidráulico compuesto por Escoria de Alto Horno Granulada Triturada (CGBS) y activadas por Residuos Calcinados de Cáscara de Huevo (CES). Sus muestras se sometieron a los ensayos de resistencia a la compresión no confinada (UCS), pruebas de California Bearing Ratio (CBR) empapado y pruebas de corte triaxial para diferentes períodos de curado y determinaron que con un 15% del ligante se logró incrementar el índice CBR 22 veces su valor inicial, mejorando la cohesión y el ángulo de fricción interna, demostrando que ligante hidráulico compuesto por Escoria de Alto Horno Granulada Triturada (CGBS) activa por Residuos Calcinados de Cáscara de Huevo (CES) es eficaz para la estabilización de suelos arcillosos [19].

En la actualidad se vienen realizando estudios de estabilización de suelos arcillosos con Nanosílice y Bioenzimas reemplazando parcial o total los aditivos tradicionales y así reducir el efecto perjudicial de la adición excesiva de estos a la tierra. El trabajo de Thomas y Rangaswamy en el 2020 en «Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay,» demostró que el uso de Nanosílice y Bioenzimas junto con 1% de cemento mejora el módulo de cizallamiento y la relación de amortiguación del suelo, porque la disipación de la tensión y la absorción de energía se deben más a la densificación de partículas, la reducción del volumen de poros y una mejor unión entre las partículas cementadas [20].

Este hallazgo coincide con Shahsavani y sus colaboradores en el 2020 en «The effect of wetting and drying cycles on the swelling-shrinkage behavior of the expansive soils improved by nanosilica and industrial waste,» en su trabajo se empleó Nanosílice como estabilizador de suelos arcillosos severamente expansivos el cual tuvo buenos resultados en pruebas de consolidación unidimensional, que indico que el potencial de hinchamiento de las muestras curadas en 1 día que contienen 0,5% de Nanosílice disminuyó desde un valor inicial de 75,26% a 58,1%. La mejora mediante un 0,5% de Nanosílice y un 20% de escoria de horno de arco eléctrico disminuyó el potencial de hinchamiento de un valor inicial de 75,26% a un 17,11% [21].

En el caso de suelos expansivos para proyectos residenciales a menudo se tratan con estabilizador de suelo iónico líquido utilizando un método de inyección a presión profunda. Los estabilizadores de suelo iónicos líquidos tienen una larga historia de aplicación. Sin embargo, existe un conocimiento limitado y evidencia experimental de su mecanismo de estabilización. Los resultados de las pruebas antes y después del tratamiento se analizaron para dos proporciones de tratamiento diferentes: 1: 300 y 1: 150, mostrando una reducción de hinchamiento del 53% para el suelo tratado compactado al contenido de óptimo de humedad para el suelo tratado una reducción del hinchamiento del 25% para suelo tratado compactado al contenido óptimo de humedad para el suelo no tratado. No mejoro la resistencia a la compresión no confinada, pero si mejoro en la rigidez [22].

Otra metodología novedosa es la bioestabilización que es una alternativa viable y amigable con el medio ambiente, Los suelos bioestabilizados ayudan a preservar el medio ambiente y los recursos naturales debido a que se reduce significativamente el uso de estabilizantes tradicionales como el cemento y la cal, cuyos procesos de producción generan alta contaminación ambiental. [23]. Los suelos bioestabilizados se logra mediante la aplicación de microorganismo usando la metodología de biogrouting, esta metodología se aplicó en

suelos blando, la función de estos microorganismos es producir  $\text{CaCO}_3$  que es capaz de llenar los espacios vacíos y unir las partículas del suelo, el microorganismo usado es *Bacillus Subtilis*. Widjajakusuma en el 2019 en "Study on tropical organic soil stabilization based on biogrouting," realizó ensayos de Triaxial no consolidado no drenado y corte directo, usando muestras que contenían 6 ml y 12 ml de *Bacillus subtilis*, con tiempo de curado de 7, 14, 28 días. Sus ensayos demostraron que los suelos aumentaban su resistencia al aumentar más cantidad de microorganismos y tiempo de curado mayor, siendo así que una muestra natural sin tratar su cohesión fue de 0.2317 kg / cm<sup>2</sup> mientras que la adición de 6 ml de microorganismo aumento a 0.4132 kg / cm<sup>2</sup> y con la incorporación de 12 ml se llegó a una cohesión de 0.6155 kg / cm<sup>2</sup>, con respecto al ángulo de fricción no varió mucho, para una muestra natural se llegó a 25°, para una muestra de 6ml aumento a 26° y con una adición de 12 ml se llegó a 27° respectivamente [24].

#### 4. Estabilizaciones tradicionales en suelos

Muchos de los problemas presentados en las vías urbanas son la presencia de suelos blandos, con alta plasticidad y baja resistencia como son las arcillas, que están presentes en Colombia, donde el 7% de la red vial se encuentran pavimentadas y las vías terciarias mucho menos. Un estudio realizado por Gómez en el 2016 en «Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante,» realizó muestras de suelo preparadas con cal y cemento en dosificaciones de 2 a 6% para la cal y 2 a 16% para el cemento estos diseños se evaluaron mediante los exámenes de laboratorio de límites de plasticidad, corte directo, compresión inconfiada y CBR los resultados de corte directo afirma que la dosificación aumenta el ángulo de fricción y de forma proporcional aumenta el valor de cohesión, el tiempo de curado de 7, 14, 28 días aumenta la cohesión pero disminuye el ángulo de fricción, es decir para un 2% de cal se consiguió 36.97 de ángulo de fricción de 7 días y con el pasar de los días disminuye a 29.66, mientras que una muestra con 6% de cal se obtuvo un ángulo de fricción de 56.53 y a los 28 días disminuyó a 51.35, con respecto a la cohesión del suelo con 2% de cal se logró a los 7 días 2.91 Kpas y a los 28 días 11.88 Kpas, la muestra de 6% de cal obtuvo una cohesión de 17.73 a los 7 días y 16.68 a los 28 días [25].

Concordando con los trabajos de Khemissa en el 2014 en su artículo «Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay,» el cual realizó los ensayos de próctor estándar, pruebas de azul de metileno, pruebas de relación de soporte de California y pruebas de cizallamiento directo no drenado sus resultados de estas pruebas muestran que los valores de los parámetros geotécnicos son concordantes y confirman la mejora de la capacidad portante de esta arcilla natural, que se traduce en un aumento significativo de la resistencia del suelo y su durabilidad. Sin embargo, los mejores rendimientos se obtienen con un tratamiento mixto correspondiente a un 8% de cemento y un 4% de cal [26].

En el caso de suelos arcillosos de caolín contaminados con petróleo crudo, Oluwatuyi en el 2019 en "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay,» realizó una investigación experimental donde simuló derramamientos de petróleo de 5%, 10%, 15% y 20%, y las estabilizó con una combinación de cal y cemento en proporción 1:2, sus resultados obtenidos indicaron que arcilla de caolín estabilizada con cemento-cal al 15% en diferentes periodos de curado aumenta la resistencia a la compresión de 185 kPa a 350 kPa y de 785 kPa a 1160 kPa [27].

Sin embargo, estabilizaciones de suelo arcilloso se puede realizar con cal ya que esta al solidificarse provocaría un intercambio iónico produciendo cristales en forma de aguja haciendo que las partículas del suelo se adhieran químicamente y se estabilicen fuertemente, aumentando la resistencia al cizallamiento del suelo [28]. Los plafones de yeso también pueden ser usada como estabilizante de suelos arcillosos, en la investigación "The effect of gypsum plafond waste on shear strength of soft clay soil.," de Kurniawan en el 2019 realizo pruebas de resistencia al corte antes de ser mezclado con el componente desechos de plafón de yeso y obtuvo como resultado 16.42 kPa y al ser añadido el componente aumentó la resistencia al corte del suelo de arcilla blanda con un porcentaje 5%, 10% y 15% a 16.75 kPa, 25.67 kPa y 26.57 kPa [29]

La estabilización de suelos arcillosos se puede también lograr mediante el uso de cemento, como demostró Sato en el 2014 en su trabajo que se llevó a cabo en Japón, donde los suelos son blandos, el utilizo suelos reciclados ya estabilizados con cemento y uso el ensayo de compresión uniaxial para el suelo tratado estable con cemento (suelo tratado sin triturar) y para suelo tratado triturado, compactado y comprobó que después de realizar el ensayo de compactación la hidratación vuelve a progresar y se recupera la resistencia [30]. Otro trabajo se realizó en el alto Egipto por Zidan en el 2020 quien realizo ensayos de resistencia al corte sin drenado e indico que su resistencia mejora de 152 a 625 veces la del suelo no tratado y el índice de compresión disminuyo de 92% a 37%, concluyendo que el cemento es buen insumo para estabilizar suelos arcillosos [31].

Un estudio realizado por Le Runigo en el 2017 en «Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions,» evaluó la durabilidad de los suelos limosos estabilizados con cal en condiciones hidráulicas a largo plazo debido a que hay ciertas incógnitas, y menciona que el comportamiento de suelos limosos estabilizados con cal disminuye sus propiedades mecánicas debido a la permeabilidad del suelo [32].

En el caso de suelos arenosos y fangosos como están presentes en Arabia Saudita en las regiones costeras Sabkha, estos suelos son duros para soportar vehículos, pero se vuelven débiles en presencia de agua, generando baja resistencia al corte comprensibilidad creciente, concentración de sales y presencia de sedimentación de grava. En la investigación de Al-Homidy en el 2017, el realizo pruebas de estabilización de suelos arenosos incorporando cemento portland (CP) y polvo de horno de cemento (PHC) usando métodos mecánicos y/o químicos, la evaluación de ensayos (CBR, UCS, microscopio electrónico barrido, análisis de rayos X), se observó que en el proceso de compactación Proctor estándar en el vacío entre partículas al agregar agua se endurece y aumenta el peso unitario del suelo, la resistencia al corte y la capacidad de carga, después de la estabilización la permeabilidad del suelo disminuye, en el ensayo de rayos X se observa la presencia de 75 % de cuarzo, 12% de yeso y 10% de halita, donde refleja la baja resistencia y concluyeron que al ser incorporado al 2% de (CP) y el 30% de (PHC) podría usarse como material de sub base en pavimentos rígidos [33].

La estabilización de suelos arenosos se puede llevar a cabo con el uso de emulsiones asfálticas y estas también sirven de aplicación para mejorar los parámetros de resistencia al corte para estructuras geotécnicas como son las presas de tierra. Dantas en 2020 en su investigación "Stabilization of Sandy soil with high content of asphalt emulsion.," el realizo muestras que contenían 13 a 28% de emulsión asfáltica y concluyo mediante los ensayos de corte directo drenado consolidado que el alto contenido de emulsiones asfálticas contribuye a la uniformidad

de la mezcla, disminución en el ángulo de fricción, para suelo natural se obtuvo un ángulo de fricción de 38.5 y en la muestra M1 saturado se consiguió un ángulo de fricción de 10.9 con una cohesión de 8.7 y en la muestra m-24 instaurado se consiguió 13.6 con una cohesión de 14.2 kpas cabe resaltar que la M24 tuvo un contenido de emulsión asfáltica de 22% [34].

Los suelos orgánicos se pueden estabilizar con materiales cementantes a base de calcio. Cong Ma con sus colaboradores en el 2016 demostró que la resistencia a la compresión disminuyo notablemente a medida que el ácido húmico aumenta la descomposición de la materia orgánica y la manera más conveniente de aumentar su resistencia es incorporando cemento [35]. Mientras para suelos de turba orgánicos se puede estabilizar con cal y cemento, el cual fue planteado por Mohd en el 2018 en su trabajo "Peat Soil Stabilization using Lime and Cement," quien hizo mezclas de cal y cemento en proporciones de 10% y 20% de peso seco el cual indico que la resistencia al corte incremento a un 14% también se realizaron pruebas con las adiciones de cal y cemento separadas donde la cal con suelo de turba rinde más dando como resultado una resistencia al corte en comparación con el cemento en un 14.07% y 13.5% respectivamente [36].

Los suelos contaminados con gasolina pueden ser estabilizados con la cal, el cemento y el asfalto en concentraciones de 10% a 20% como sostuvo Quiñones y sus colaboradores en el 2020 en su trabajo «Geotechnical Properties and Stabilization of Well-graded Sand with Clay and Gravel Soils Contaminated with Gasoline,», el indico que se puede estabilizar los suelos contaminados con concentraciones inferiores al 10% de gasolina para construir la subrasante y las capas de subbase en los pavimentos, el cemento es el estabilizador que presentó mayores mejoras generales en las propiedades mecánicas del suelo de grava arcillosa y arena [37].

## 5. Estabilizaciones Mixtas en suelos (tradicionales y no tradicionales.)

Los suelos arcillosos expansivos se distribuyen por todo el mundo causando daños en la infraestructura, cimientos de edificios y carreteras debido a su baja resistencia, alta compresibilidad y alto nivel de cambios volumétricos, estos tipos de suelos pueden ser mejorados con estabilización enzimática del cemento con el hormigón reciclado, Karami con sus colaboradores en el 2020 demostró que los materiales de desecho se pueden utilizar eficazmente, en sus mezclas utilizo suelos in situ con 20% de hormigón triturado, 3% de cemento mezclado y 1% de capa de enzima y en sus resultados probo que este diseño baja permeabilidad e hinchamiento y alta resistencia a la compresión no confinada de suelos estabilizados indican que el enfoque de construcción adoptado sería muy adecuado [38]. El trabajo que realizo Firoozi y sus colaboradores en el 2017 realizaron diseños de estabilización de suelos arcillosos haciendo uso de agentes cementantes como cal, cemento y subproductos industriales como cenizas volantes y escoria, este diseño mejoro las propiedades geotécnicas sin embargo se han reportados casos que los suelos ricos en sulfatos y estabilizados con cal o cemento sufrieron fallas en el pavimento [39].

Actualmente el uso del cemento como estabilizante de suelos arcillosos ha mejorado las propiedades geotécnicas de los suelos. Mousavi en el 2017 incorporo cemento y humo de sílice a sus diseños para verificar si sus propiedades geotécnicas mejoran con su uso, en su investigación preparo 120 muestras de suelos estabilizados y sin tratar remplazando el cemento Portland ordinario con humo de sílice. El analisis la influencia del reemplazo parcial

del cemento con humo de sílice sobre la capacidad de carga, la resistencia al corte y a la compresión del suelo compactado y estabilizado. En la prueba de compresión uniaxial no confinada a los 28 días, el suelo estabilizado con 2% de sustitución parcial de cemento con humo de sílice es casi 3,5 veces mayor que el del suelo sin tratar, el diseño de mezcla óptimo para el suelo estabilizado es 6% de cemento y 2% de humo de sílice [40]. El uso de humo sílice no está completamente estudiada sin embargo el estudio de Firat y sus colaboradores en el 2019 realizó un diseño aplicando cal, humo de sílice y las cenizas volantes que son aditivos eficaces para mejorar los parámetros de resistencia al corte de los suelos y encontraron que el humo de sílice y las cenizas volantes tienen un efecto negativo en porcentajes mayores al 20% mientras que la cal da mejores resultados en porcentajes altos al 20% [41].

En el Perú en la región de Oxapampa, Pasco, presentan suelos altamente cohesivos, o arcillas de alta plasticidad que dificulta la construcción de carreteras o estos tipos de suelos son los responsables de que el pavimento falle. Castro en el 2020 realizó un trabajo "Analysis of high plasticity clayey soil improvement at subgrade level through Portland cement added to decrease volumetric.," donde adiciono aditivo como cemento superfino a base de escoria, cemento mezclado con fibras de polipropileno, cal y cemento Portland, con la finalidad de mejorar las características geotécnicas del suelo, resistir la carga vehicular y reducir los cambios volumétricos, recomendando que a mayor cantidad de cemento mayor cantidad de agua a administrar [42].

En la provincia de Bangka Belitung, donde el tipo de suelo es arcilloso con baja estabilidad. Apriyanti en el 2019 incorporo yeso y estaño en diferentes proporciones para estabilizar suelos arcillosos, sus muestras que evaluó contenía 8% de yeso y 20 % de relaves de estaño; 8% de yeso y 30% de estaño, la última muestra tuvo 8% de yeso y 40% de relaves de estaño, de las cuales la mezcla que contenía 20% de estaño llegó a 33.51 kn/m<sup>2</sup>; mientras que para un 40% de estaño se logró 49.45 kn/m<sup>2</sup> de resistencia al corte e indica también que el yeso es útil como aglutinante de modo que el suelo se vuelve más rígido [43].

Actualmente han surgido nuevas metodologías para estabilizar suelos como el uso de bioenzimas que es una nueva esperanza para mejorar las características geotécnicas de los suelos y amigables con el medio ambiente. Las bioenzimas son formulaciones enzimáticas líquidas naturales, no tóxicas, no corrosivas y fermentadas de extractos vegetales que mejoran las propiedades de ingeniería del suelo. Aswathy y sus colaboradores en el 2020 realizó un trabajo «Effect of Bio-enzyme—Chemical Stabilizer Mixture on Improving the Subgrade Properties,» donde utilizo bioenzima terrazyme combinado con cal y cenizas volantes y a través de sus ensayo observo que estos insumos aumenta considerablemente el valor a la resistencia a la compresión no confinada y prueba de relación de soporte de California, en su trabajo comparo el suelo tratado con el suelo sin tratar e indico que la dosis optima fue de 0.1 ml/kg y la cal de 8% y al aumentar el contenido de cenizas volantes en suelo estabilizado con terrazyme, mejora la resistencia a la compresión no confinada, mientras que no hubo mejora en la prueba de relación de soporte de california. Por lo tanto, la combinación de terrazyme y cal es un método eficaz para estabilizar el suelo de subrasante caolinítico [44].

Para el caso de suelos orgánicos de turba en el área de Rimbo Panjang provincia Riau del país de Indonesia, estos suelos presentan 75% de contenido orgánico, baja capacidad de carga, alta compresibilidad y baja resistencia al corte, estos suelos en épocas de lluvia se expanden y en épocas de sequía se comprime. Ekai en el 2019, en su trabajo "stabilization of rimbo panjang

peat soil using lightweight materials mixed with cement as subgrade for road pavement.,” incorporo materiales livianos como cenizas de bagazo, ceniza de aserrín mezclados con cemento Portland tipo I y comprobó que este diseño cumple condiciones establecido a nivel de subrasante como capa del pavimento de la carretera [45].

## 6. Casos de Estabilizaciones de suelos en obras civiles.

En la actualidad ya se vienen usando diferentes insumos para la estabilización de suelos arcillosos como se presentan en Taman en el área de humedales en el estado de Putrajaya, donde se usó arena de sílice para estabilizar suelos arcillosos los cuales ocasionan asentamientos viales, generando grietas y deformaciones. Esmaeil en el 2017 extrajo 10 muestras de suelo a una profundidad de 2 m, para evaluar la permeabilidad, resistencia y la relación de CBR vs la estabilización con CBR plus y arena de sílice en laboratorio indico que el diseño optimo fue 1 % CBR PLUS y 9% arena de sílice, con esta combinación se puede lograr que el índice de plasticidad disminuye de 31% a 14%, también se notó que el pH del suelo estabilizado es alcalino (7.3), también menciono que el CBR PLUS altera significativamente la conductividad hidráulica, en cuanto al ensayo de corte directo se encontró que el suelo estabilizado con CBR PLUS tuvo una cohesión de 103 kpas y ángulo de fricción de 26 siendo así que mejora la resistencia a cizallamiento a 1.9 veces con respecto a la muestra no tratada [46].

La estabilización de suelos blandos también se pudo realizar en suelos contaminados con derrames de petróleo, como ocurrió en la ciudad costera de china donde sus suelos tienen bajas propiedades geológicas, Chuang Yu y sus colaboradores en el 2018 aplicaron 12% de cemento portland y haciendo uso de los ensayos de límites de Atterberg, la resistencia a la compresión confinada, la resistencia al corte directo y la microestructura de suelos estabilizados con cemento indicaron que el cemento mejora las propiedades mecánicas de estos suelos, del ensayo de corte directo se demostró que el ángulo de fricción interno del suelo disminuyeron y van mejorando respecto al tiempo [47].

## 7. Ventajas de aplicar la estabilización de suelo.

Se pueden lograr estabilizar suelos arcillosos con uso de cal, el cual trae como ventaja la reducción de plasticidad de los suelos, mejora la resistencia a la compactación hasta en un 60%, aumenta significativamente la cohesión del suelo y una ligera mejora en el ángulo de fricción interna, estos hallazgos fueron demostrados por Taha en el 2014 [48].

Los suelos turbios estabilizados con yeso sintético y cloruro de sodio no mejoran las propiedades geotécnicas de los suelos, no aportando resistencia al corte ni disminuyendo el asentamiento. Esta estabilización fue demostrada por Silmi y sus colaboradores en el 2019 y sugiere que no es la mejor opción para los casos de asentamientos en suelos turbios presentes en la Isla de Java central [49].

La ventaja de utilizar insumos reciclables para la estabilización suelos arcillosos es que son amigables para el medio ambiente genera menor consumo de energía y menor emisiones de CO<sub>2</sub> y son fáciles de conseguir como son las cenizas volantes y escoria, estos insumos reduce la plasticidad, aumento la resistencia de corte y la aplicación de cal es más ventajosa que

la aplicación de cemento, volviéndolas útil para la estabilización de taludes, estas ventajas fueron reportadas por Vukicevic en el 2019 en su trabajo "The Alternatives to Traditional Materials for Subsoil Stabilization and Embankments.," que utilizó ensayos de gravedad específica, distribución del tamaño de grano, relación humedad-densidad (prueba de compactación Proctor), resistencia a la compresión inconfiada (UCS), pruebas de edómetro y de hinchamiento, cortante directo y la relación de carga de California (CBR) para probar las ventajas que ofrece la estabilización de suelos arcillosos con cenizas volantes y la estabilización con cal [50].

## 8. Conclusiones

Se concluyó que la estabilización no tradicional se puede utilizar cenizas volantes, cenizas de carbón, cenizas de madera, aserrín kerving, cenizas de bagazo, residuos de ladrillera, cenizas de hojas de bambú y PET, todos estos insumos mejoran el ángulo de fricción y resistencia al corte.

Insumos orgánicos como la cascara de huevo pueden ser usados para estabilizar arcillas blandas, existen también innovadores trabajo como son el uso de bioenzimas y el uso de bacterias como bacillus subtilis que han probado ser útiles para la estabilización de suelos arcillosos.

Se concluye que es una solución sostenible para el medio ambiente es la aplicación de microorganismo como bacillus subtilis para el mejoramiento del suelo su aplicación de 6 ml a 12 ml mejora así la cohesión siendo así para 6 ml de bacillus subtilis se logra una cohesión de 0.4132 kg / cm<sup>2</sup> y la aplicación de 12 ml mejora aún más con una cohesión de 0.6155 kg / cm<sup>2</sup>. De manera general los estabilizadores no tradicionales sean de origen orgánico e inorgánico o con el uso de bacterias son mejores que los tradicionales porque son amigables con el medio ambiente y se consigue resistencias y ángulos de fricción similares.

Para suelos que han sido contaminados con derrames de petróleo o sub productos de estos pueden ser estabilizados con la mezcla de insumos tradicionales usando cal y cemento. El uso de cal como estabilizador es ideal para taludes y mejorar la subrasante y es más amigable con el medio ambiente en comparación con el cemento.

Se concluyó que la aplicación de cal puede mejorar la resistencia a la compactación de los suelos hasta un 60% aumentando significativamente la cohesión del suelo y una ligera mejora en el ángulo de fricción. Se concluyó que el yeso sintético + (NaCl) no contribuye ya que no mejora la capacidad de soporte y de comprensibilidad.

El cemento es útil para estabilizar suelos arenosos, mientras que el asfalto puede ser usado para estabilizar suelos arenosos que conforman estructuras de presas de tierra. CBR PLUS en un 1% y arena sílice en un 9% reduce el índice de plasticidad de 31% a 14%, la cohesión de 103 Kpas y ángulo de fricción de 26° siendo muy efectivo para estabilizar suelos arcillosos.

Los diseños con 8% de yeso y 40% de relaves de estaño mejora significativamente la resistencia al corte, la cohesión con 49.5 kn/m<sup>2</sup> mientras que la mezcla de 8% de yeso con 20% de estaño solo logra 33.51 kn/m<sup>2</sup>, estos resultados indican que este diseño es muy útil para estabilizar suelos arcillosos.

## Referencias

- [1] V.Svalova, "Landslide risk: Assessment, management and reduction" Moscú, Federación Rusa: Instituto Sergeev de Geociencia Ambiental RAS., 2017, pp. 1-211.
- [2] M. Castro, J. Navarro, G. Aybar and G. Duran, "Analysis of high plasticity clayey soil improvement at subgrade level through Portland cement added to decrease volumetric.," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 758, pp. 1-6, 2020.
- [3] S. Akhilesh , G. Khushbu and S. Shruti, "Behavior of Industrial Waste Bagasse Ash and Blast Furnace Slag-Treated Expansive Clay for Pavement Subgrade" de Indian Geotechnical Conference,IGC 2018, 2020.
- [4] F. Ali Akbar, O. Guney, B. Ali Asghar and M. Shojaei, "Fundamentals of soil stabilization.," International Journal of Geo-Engineering, pp. 16, 2017.
- [5] A. Ekinçi, M. Hanafi and E. Aydin, "Strength, Stiffnes and Microstructure of Wood-Ash Stabilized Marine Clay," Minerals, pp. 1-23, 2020.
- [6] G. Ayala, A. Rosadio and G. Durán, "Study of the effect of the addition of ash from artisan brick kilns in the stabilization of clay soils for pavements," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas., pp. 7, 2019.
- [7] J. Aponte, J. Gálvez and G. Durán, «Estudio experimental del comportamiento geotécnico de suelo arenoso con ceniza de madera y carbón proveniente de ladrilleras artesanales,» Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, pp. 2-7, 2019.
- [8] A. Alvarez, J Sosa, G Duran and L. Pacheco, "Improved mechanical properties of a high plasticity clay soil by adding recycled PET.," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, pp. 7, 2019.
- [9] E. Seyrek, «Engineering behavior of clay soils stabilized with class C and class F fly ashes,» Gruyter, pp. 15, 2018.
- [10] E. Coudert, M. Paris, D. Deneele, G. Russo and A. Tarantino, «Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution,» Construction and Building Materials, vol. 265, pp. 539-552, 2019.
- [11] K. Gandhi and S. Shukla, «Performance evaluation of optimum mix of different waste materials for bagasse ash stabilized expansive soil,» Journal of Green Engineering, vol. 10, n° 10, pp. 8985-8998, 2020.
- [12] M. Simatupang, L. Kano, R. Suryaningrat, A. Ade, M. Thahir, H. Aswad, W. Mustika and M. Simatupang, "The Mechanical Properties of Fly-Ash-Stabilized Sands," geosciences, pp. 1-19, 2020.
- [13] W. Wijaya, S. Ismanti and A. Rifa, «Soft Clay Improvement Using Bamboo Leaf Ash on CBR Values,» de 2nd International Conference on Sustainable Infrastructure, ICSI 2019, Yogyakarta; Indonesia, 2020.
- [14] J. Rivera , A. Guerrero, R. Mejia de Gutierrez y A. Orobio, «Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión),» Sena, pp. 1-10, 2020.
- [15] J. Alarcón, M. Jiménez y R. Benítez, «Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso,» Revista Ingeniería de Construcción, vol. 1, pp. 1, 2020.
- [16] F. Zhang, L. Zhang and W. Hong, "Stabilization of Expansive Soil with Polyvinyl Alcohol and Potassium Carbonate," Hindawi, pp. 13, 2019.
- [17] J. Niyomukiza, S R Wardani and B. Setiadji, "The influence of Keruing sawdust on the geotechnical properties of expansive Soils.," Earth and Environmental Science, p. 11, 2019.
- [18] M. Alzaidy, "Experimental study for stabilizing clayey soil with eggshell powder and plastic wastes.," Materials Science and Engineering., pp. 14, 2019.
- [19] E. Bensaifi, F. Bouteldja, M. Nouaouria and P. Breul, «Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl,» Transportation Geotechnics, vol. 20, pp. 1-20, 2019.
- [20] G. Thomas and K. Rangaswamy, «Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay,» Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 137, 2020.
- [21] S. Shahsavani, A. Vakili and M. Mokhberi, «The effect of wetting and drying cycles on the

- swelling-shrinkage behavior of the expansive soils improved by nanosilica and industrial waste,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 79, n° 9, pp. 4765-4781, 2020.
- [22] S. Gautam, L. Hoyos, S. He, S. Prabakar and X. Yu, «Chemical Treatment of a Highly Expansive Clay Using a Liquid Ionic Soil Stabilizer,» *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, n° 5, pp. 4981-4993, 2020.
- [23] V. Ramdas, P. Mandree, M. Mgangira, S. Mukaratirwa, R. Laloo and S. Ramchuran, «Review of current and future bio-based stabilisation products (enzymatic and polymeric) for road construction materials,» *Transportation Geotechnics*, vol. 27, pp. 1-55, 2020.
- [24] J. Widjajakusuma, M. Sugata, A. Changgrawinata, L. Jap, A. Zacharia and T TJ “Study on tropical organic soil stabilization based on biogrouting,» *Conferencia internacional de Sriwijaya sobre ciencia, ingeniería y tecnología IOP Conf. Serie: Ciencia e Ingeniería de Materiales 620 ( 2019)*, vol. 620, no. 012032, pp. 5-8, 2019.
- [25] L. Gomez, W. Güillín y R. Gallardo, «Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante,» *Tecnura*, pp. 1-13, 2016.
- [26] M. Khemissa and A. Mahamedi , «Cement and lime mixture stabilization of an expansive over-consolidated clay,» *Applied Clay Science*, pp. 104-110, 2014.
- [27] O. Oluwatuyi, O. Ojuri, and A. Khoshghalb “Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 160-167, 2019.
- [28] Takeda, H. Shigematsu and Keisei, «Mechanical Properties oh Lime- Stabilized Soil in Early Curing Period,» de *Journal of the Society of Materials Scienc, Japòn* , 2016.
- [29] R. Kurniawan, A. Resti, H. Purwanto, M. Firdaus, “The effect of gypsum plafond waste on shear strength of soft clay soil,» in *Materials Science and Engineering, Indonesia*, 2019.
- [30] Sato, T. Fujikawa and Kenichi «Mechanical properties and possibility of the repetitive use of cement stabilized Soil,» *Sociedad de Ciencia de Materiales*, pp. 1-6, 2014.
- [31] A. Zidan, “Strength and Consolidation Characteristics for Cement Stabilized Cohesive Soil Considering Consistency Index,» in *Geotechnical and Geological Engineering, Egipto*, 2020.
- [32] B. Le Runigo, V. Ferber, Y. Cui, O. Cuisinier and D. Deneele, «Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions,» *Engineering Geology*, vol. 118, n° 1-2, pp. 20-28, 2017.
- [33] A. Al-Homidy, M. Dahim and A. Abd El Aal, “Improvement of geotechnical properties of sabkha soil utilizing cement kiln dust,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-12, 2017.
- [34] S. Dantas, C. Farias, and A. Aragão, “Stabilization of Sandy soil with high content of asphalt emulsion,» *Civil Engineering Engenharia Civil*, pp. 1-7, 2020.
- [35] C. Ma, B. Chen, and L. Chen, «Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based composites,» *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 414-423, 2016.
- [36] N. Mohd and Z. Ghazaly, “Peat Soil Stabilization using Lime and Cement,» in *EDP Sciences, Malasia* , 2018.
- [37] E. Quiñones and C. Bustillo, «Geotechnical Properties and Stabilization of Well-graded Sand with Clay and Gravel Soils Contaminated with Gasoline,» *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 231, n° 10, 2020.
- [38] H. Karami, D. Robert, S. Costa, F. Tostovrsnik, B. O'donnel and S. Setung, «Construction of Working Platforms on Expansive Soils Using Recycled Concrete and Stabilizers: A Case Study,» de *ICSECM 2019 Proceedings of the 10th International Conference on Structural Engineering and Construction Management*, 2020.
- [39] A. Firoozi, C. Guney, A. Asghar and M. Shojaei, «Fundamentals of soil stabilization,» *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 8, n° 26, pp. 1-25, 2017.

- [40] S. Mousavi, "Utilization of Silica Fume to Maximize the Filler and Pozzolanic Effects of Stabilized Soil with Cement," in *Geotechnical and Geological Engineering*, Irán, 2017.
- [41] H. Firat and I. Develioglu, «Improvement of shear strength characteristics of İzmir Bay's dredged soil,» *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 12, n° 632, Octubre 2019.
- [42] M. Castro, J. Navarreo, B. Gay and G. Duran "Analysis of high plasticity clayey soil improvement at subgrade level through Portland cement added to decrease volumetric.," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Lima, 2020.
- [43] Y. Apriyanti, F. Fahrani and H. Fauzan, "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade," *Serie de conferencias IOP: Ciencias de la tierra y el medio ambiente*, pp. 3-6, 2019.
- [44] C. Aswathy, A. Raj and M. Sayida, «Effect of Bio-enzyme—Chemical Stabilizer Mixture on Improving the Subgrade Properties,» de *Indian Geotechnical Conference, IGC 2018*; Bangalore; India; 13 December 2018 through 15 December 2018; Code 245279, 2020.
- [45] E. Ekai, R. Yuliet, L. Elfina, and J. Makinda, "Stabilization Of Rimbo Panjang Peat Soil Using Lightweight Materials Mixed With Cement As Subgrade For Road Pavement.," *Geotechnique, Construction Materials and Environment.*, pp. 7, 19.
- [46] S. Esmaeil and A. Karamvand, "Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand.," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*, pp. 1-12, 2017.
- [47] C. Yu, R. Liao, C. Zhu, X. Cai and J. Ma, «Ensayo de estabilización de arcilla Wenzhou contaminada con aceite por cemento,» *Avances en ingeniería civil*, pp. 7-10, 2018.
- [48] I. Taha, M. Raihan, Z. Hameed and T. Khan, "Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.*, pp. 1-11, 2014.
- [49] N. Silmi, N. Djarwanti, G. Prasetyo and F. Erianto «Estabilización del suelo de turba en La Pluma Rawa Salatiga Central Java utilizando Yeso Y,» *Facultad De Ingeniería, Universidad Sebelas Maret*, pp. 6, 2019.
- [50] M. Vukicevic, M. Marjanovic, V. Pujevic and S. Jockovic, "The Alternatives to Traditional Materials for Subsoil Stabilization and Embankments.," *materiales*, vol. 12, pp. 17-21, 2019.