

FACTIBILIDAD DE USO DEL CEMENT – KILN - DUST (CKD) EN EL MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS GRANULARES Y COHESIVOS

Rhenzel HERNÁNDEZ SATURNO ¹

RESUMEN

Para cimentar edificaciones, obras de tierra y pavimentos, en ocasiones se requiere mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos sobre los cuales se apoyan dichas estructuras, con frecuencia se recurre a técnicas de modificación química y físico-química de la matriz natural de estos mediante adiciones como el Cemento Portland y la cal. El presente trabajo de compilación y análisis se basa en tres estudios publicados por los siguientes autores: Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012), Mohie Eldin Mohamed Afify E,(2011), El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015), versa sobre el uso de un desecho industrial del proceso de elaboración de cemento, conocido usualmente por sus siglas en inglés CKD (Cement – Kiln – Dust), que podría traducirse como: Polvo del Horno para Cemento, este puede llegar a alcanzar en peso hasta del 20% del total del cemento producido. El CKD es un polvo, de similar apariencia al cemento ordinario, colectado en los filtros del ducto de escape de vapores de la calcinación de materia mineral para la producción del Clinker. El CKD por su condición de ser una mezcla de materia mineral cruda y de calcinación incompleta posee una composición y proporción de los componentes con sensibles variaciones respecto al cemento portland obtenido en la misma planta y proceso. Aun así, se conservan ciertas propiedades como los es, generalmente, la capacidad de fraguar al ser hidratado y a tomar resistencia a medida que envejece. Por poseer capacidad aglomerante se puede pensar como una probable adición para la estabilización de granulares, y debido a que se ha reportado contener cal libre se supone una opción viable para tratar arcillas. De acuerdo a resultados obtenidos de ensayos, el CKD fue encontrado como una alternativa efectiva para mejorar propiedades mecánicas de los suelos arenosos y arcillosos respectivamente, por otra parte, la plasticidad fue sustancialmente reducida y la textura fue optimizada o corregida.

ABSTRACT

Cement use feasibility – kiln - dust (CKD) in the improvement and stabilization of granular and cohesive soils

To cement buildings, earth works and pavements sometimes requires improving the Engineering properties of soils on which these structures are supported, chemical and physique-chemical modification techniques of their natural matrix are often used through additions, such as Portland Cement and Lime. This compilation and analysis work is based on three published studies by the following Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012), Mohie Eldin Mohamed Afify E,(2011), El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015) authors and concerns the use of an industrial waste from the cement production process, usually known by its acronym CKD (Cement – Kiln – Dust), which can reach up to 20% of the total cement produced by weight. CKD is a powder, similar in appearance to ordinary cement, collected in the vapor exhaust duct filters of mineral calcination for Clinker production. The CKD for its condition of being a mixture of raw mineral matter and incomplete calcination has a composition and proportion of components with sensitive variations from portland cement obtained in the same plant and process. Even so, certain properties are preserved as is generally the ability to set when hydrated and to take strength as it ages. By possessing agglomerating capacity it can be thought of as a likely addition to granular stabilization, and because it has been reported to contain free lime it is supposed a viable option to treat clays. According to test results, CKD was found as an effective alternative to improve mechanical properties of sandy and clay soils respectively, on the other hand, Plasticity Index was substantially reduced and the texture was optimized or corrected.

Palabras clave: cement – kiln - dust, estabilización, mejoramiento, suelos, cohesivos, granulares.

Keywords: Cement – kiln - dust, stabilization, soil improvement, cohesive soils, granular soils.

INTRODUCCIÓN

Para poder aprovechar espacios físicos para la ejecución de obras de ingeniería civil con frecuencia el terreno sobre el cual

se edificarán presenta problemas intrínsecos a su naturaleza, que podrían afectar la estabilidad, el buen desempeño y la durabilidad de la construcción. En estos casos, entre las

¹ Director de Saturnia Ingeniería, C.A. San Felipe, Edo. Yaracuy, Candidato a Doctor en Arquitectura FAU – UCV, Caracas. Correo-e.: saturnia.ingenieria@gmail.com

alternativas técnicas comúnmente consideradas, se puede mencionar la necesidad y posibilidad de modificar comportamientos de los suelos generando modificaciones en la granulometría o en la físico – química de los mismos, como también, una opción en ciertas condiciones, es recomendable aglutinar o cementar sus partículas. Para este propósito se han establecido una amplia gama de opciones basadas en darle aplicación a productos de uso ordinario en construcción u otras industrias, en base a adicionar sustancias o compuestos, tales como: el cemento portland, bitumen, cal y tensoactivos. De todos ellos, algunos generan cambios físicos por aglutinamiento o cementación; otros cambios físico – químicos y, un tercer grupo, genera cambios químicos con incidencia en lo físico. Prácticamente todos los agentes estabilizantes comúnmente conocidos son sustancias útiles en otros propósitos en las obras civiles, a los cuales se les ha encontrado una utilidad adicional y unos pocos han sido desarrollados de forma específica para ese objetivo; rara vez se ha aceptado por la comunidad académica y profesional el uso de desechos industriales como una adición o aditivo que resulte confiable, en especial, por ofrecer resultados invariables en el tiempo.

En este trabajo, el cual es de compilación (Eco. 1977), y análisis se basa en tres estudios publicados de los siguientes autores: Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012), Mohie Eldin Mohamed Afify E,(2011), El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015). Se tiene por objetivo general presentar un conjunto de estudios realizados en laboratorios de diversas instituciones de investigación y rectoras de obras públicas en diversas partes del mundo y sobre esta base experimental, más allá de describir los resultados, más bien, sobre estos realizar un examen con el propósito de plantear teorías que sirvan para explicar los resultados obtenidos y aportar los fundamentos que sirven de base para describir los fenómenos asociados al proceso de modificación del suelo, siendo los objetivos específicos los siguientes: a) describir y explicar cómo es el mecanismo de estabilización en caso de suelos granulares y de suelos cohesivos; b) demostrar de forma inductiva y cuantitativamente la potencialidad del CKD como estabilizador para suelos y exponer cuán efectivo y eficiente es el uso del CKD en esta función, en ambas tipologías de suelos mencionados anteriormente mediante ejemplos específicos en un marco epistemológico positivista – post positivista; c) establecer una ruta a la predicción de resultados, entendido de forma general, con el CKD como modificador del comportamiento de los suelos en obras civiles.

EL CKD: PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS

El agente estabilizador seleccionado es muy poco conocido en su forma de comportarse en aplicaciones industriales, en especial en obras civiles por su condición de desecho industrial que lo estigmatiza. Dicho potencial estabilizador de suelos es una sustancia en polvo, denominada en lengua inglesa como Cement-Kiln-Dust o CKD, por sus siglas, que se podría traducir como Polvo del Horno del Clinker (más no del cemento) que es un desecho de la producción de cemento (específicamente del Clinker) al cual por razones ambientales, financieras y técnicas se le pretende dar un valor de

subproducto o derivado, a través de la determinación de al menos una utilidad que le otorgue valor técnico, económico y de oportunidad para aplicaciones de consumo masivo. En la búsqueda de soluciones técnicas y alternativas de menor costo para la estabilización de suelos, se ha considerado por su origen industrial vinculado a la producción del cemento, evaluar al CKD para conocer su capacidad de satisfacer o cumplir con dicha función en el mejoramiento o estabilización del terreno, para ello se evalúa su efectividad en suelos de diversas características, estableciendo tres condiciones básicas potenciales de uso, que son las siguientes: a) suelos granulares, y b) suelos cohesivos. No se consideró suelos dispersivos, colapsables, de alta sensibilidad o licuables u otros de factible pérdida de estabilidad ante exigencias químicas, físicas o mecánicas.

Como es conocido, el proceso para la producción del cemento consiste en la trituración y mezcla de diversos componentes minerales que una vez sometidos a un proceso de calcinación extrema en un horno rotatorio se obtiene un compuesto al que denominamos universalmente como Clinker; el cual, una vez pasado por un proceso de molienda y adicionado con sulfato de calcio obtenemos el Cemento Portland, siendo un proceso semejante al de otros cementos como el siderúrgico y puzolánico, por mencionar algunos. En el proceso de calcinación de la materia mineral molida se requiere de un sistema de escape de gases, el cual consiste en complejo de tuberías con dispositivos para filtrar partículas sólidas, que por ser muy finas pueden estar en suspensión en los gases de combustión, el material sólido retenido en esos filtros es el denominado CKD. (Ver figura1). En conclusión, el CKD es una mezcla de material mineral (M.M) cruda, materia mineral (M.M) de calcinación incompleta y partículas de Clinker. Aunque por lo general tiene aspectos semejantes al cemento ordinario es frecuente la posibilidad de tener coloraciones diversas, a veces con tonos marrones a semejanza de las arcillas o gris carbón y cualquier tonalidad posible entre estos, debido a que sus tres compuestos principales: M.M. cruda + M.M. de calcinación incompleta + Clinker, pueden estar en proporciones diferentes de acuerdo a la planta que produce el cemento, ya que las mismas pueden diferir entre sí en equipos, procesos y materia mineral utilizada, lo que se traduce en cambios sustanciales en las proporciones de los compuestos químicos que son parte del polvo, estos resultados fueron obtenidos mediante ensayos de refracción de Rx, (Ver figura 2). En la tabla1, se puede apreciar de forma comparada la composición típica del Cemento Portland, el CKD y la cal hidratada. Las reacciones generales y productos asociados con la reacción del CKD con el agua no están totalmente conocidas y forman parte de la investigación doctoral del autor, es posible que estos puedan variar dependiendo del compuesto bajo estudio. El CKD tiene cierta capacidad cementante y aglomerante debido a la presencia de material original del Clinker y por la presencia de cal libre en forma de CaO,. El CKD tiene marcadas diferencias en su composición química respecto al cemento ordinario también conocido como OPC (Ordinary Portland Cement). En su composición química es una constante la presencia de potasio soluble y compuestos sódicos que podrían ser la razón de su marcada alcalinidad (pH

entre 12 y 14), por lo tanto, al hacer contacto con el agua, estos compuestos, son los responsables de una reacción exotérmica con el resultado de la evaporación de una fracción del agua. Los valores de densidad típicos del CKD están comprendidos entre 2,42 y 2,96 g/cm³, la cual es sustancialmente menor a la del cemento ordinario. Una característica que es sumamente importante es la superficie específica que está comprendida en un rango amplio (4.000 a 14.000 cm²/g) superior en todo caso a la del OPC. Una de las líneas de investigación estudia al CKD como un activador de sustancias o ingredientes con propiedades cementantes que no parecen existentes en ellos. Estos aglomerantes alcalino – activados podrían ser utilizados en la estabilización de suelos en geotecnia.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ESTABILIZACIÓN MEDIANTE EL USO DEL CKD

Se estima que el CKD sin modificar puede ser un agente estabilizante competente en un amplio rango de tipologías de suelos. Los mecanismos centrales de estabilización que se dan con la adición de CKD a los suelos serían uno o más de los indicados a continuación:

- a. Intercambio iónico: por presencia de cal libre.
- b. Cementación o aglutinamiento; por fraguado y toma de resistencia con la edad de la lechada de CKD obtenida con el añadido del agua de mezcla e hidratación.

Y los subsiguientes considerados como secundarios:

- a. Deseccación, por decrecimiento de la hidratación.
- b. Sílica reactiva (Reacción puzolánica).

El propósito inicial del uso del CKD como agente estabilizador de suelos es contar con una sustancia, compuesto o producto de menor costo y con un beneficio ambiental añadido por el aprovechamiento de un descartado industrial; se pretende determinar su efectividad y eficacia en incrementar los valores de resistencia mecánica, mejorar la textura, y reducir o controlar la sobre hidratación y el Índice de Plasticidad I.P asociado, basado en los dos principales mecanismos de estabilización: intercambio iónico y cementación.

Tabla 1. Comparación entre la composición típica de OPC , CKD y Cal Hidratada. (Lizarazo J.M.-Claisse, P., 2009)*

Prd.	SiO ₂	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	LOI
OPC	19,7	----	63,3	0,6	----	4,9	2,4	2,7	2,1	0,2	2,7
CKD	12,9	0,02	58,3	1,71	0,06	3,5	2,12	6,75	2,5	0,3	10,23
Cal Hidratada	1,16	----	62,6	0,27	0,01	0,10	1,40	----	1,90	0,55	32,0

*Los valores presentados representan promedios, en el caso del CKD corresponde a rangos amplios.

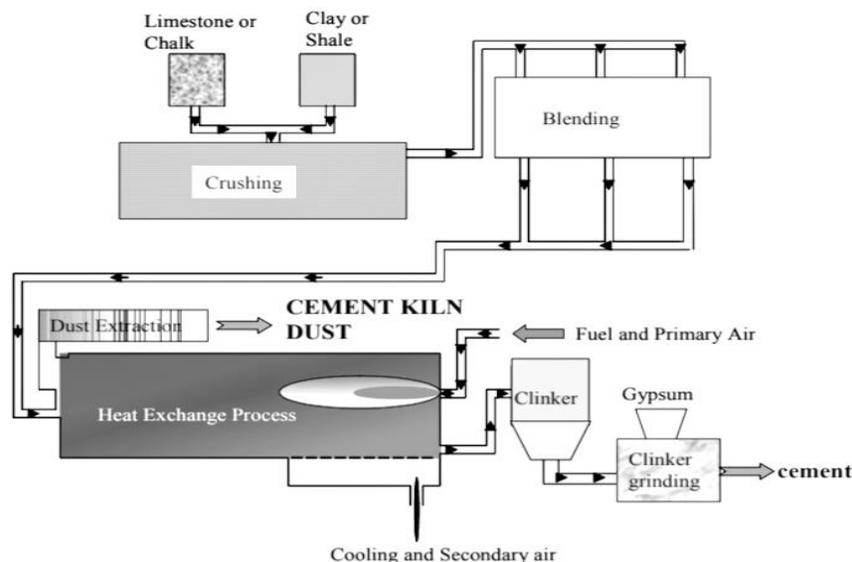


Figura 1. Esquema de la producción del cemento y del CKD. Fuente: El-Mohsen, M., Anwar M.A, Adam, I. (2015)

Descripción de los mecanismos fundamentales de acción del CKD en la matriz del suelo:

- a) Intercambio iónico.

Por la presencia en su contenido químico de Ca en dos condiciones: (1) soluble o reactivo, (2) el de menor aporte por su estado cristalino amorfo de muy baja solubilidad en agua; en todo caso la disponibilidad de calcio soluble permite pensar en la capacidad de intercambio iónico con los cristales de ciertos

tipos de arcilla, y puede generarse cambios granulométricos por floculación de la arcilla, lo cual generaría un cambio en la estructura de la fracción fina asemejándola a una arena fina y a su vez podría corroborarse cambios en la físico química del suelo, entendiéndose de la fracción arcillosa principalmente. En el CKD la disponibilidad del calcio (Ca) depende de las sustancias o compuestos que lo contienen, ya que a su vez depende de la estructura del compuesto. Es fundamental para la estabilización iónica la existencia de Ca soluble en agua, aunque el potasio también tiene capacidad de minimizar la actividad en suelos sódicos, el Ca por su condición de menor radio iónico, menor complejo de absorción y doble valencia provee de mayores cambios favorables, desde la óptica de la geotecnia, a

la físico - química de las arcillas y en general en suelos con partículas en estado coloidal. La presencia y proporción de Ca soluble en agua está disponible en las formas químicas indicadas a continuación:

- a. CaO ----- Alto
- b. Ca(OH)₂ ----- Alto a muy alto
- c. CaCO₃ ----- Muy bajo

Por lo antes expuesto, se considera al CKD como un estabilizador de suelos cohesivos y controlador de excesivas expansiones y contracciones en las arcillas expansivas - contractivas

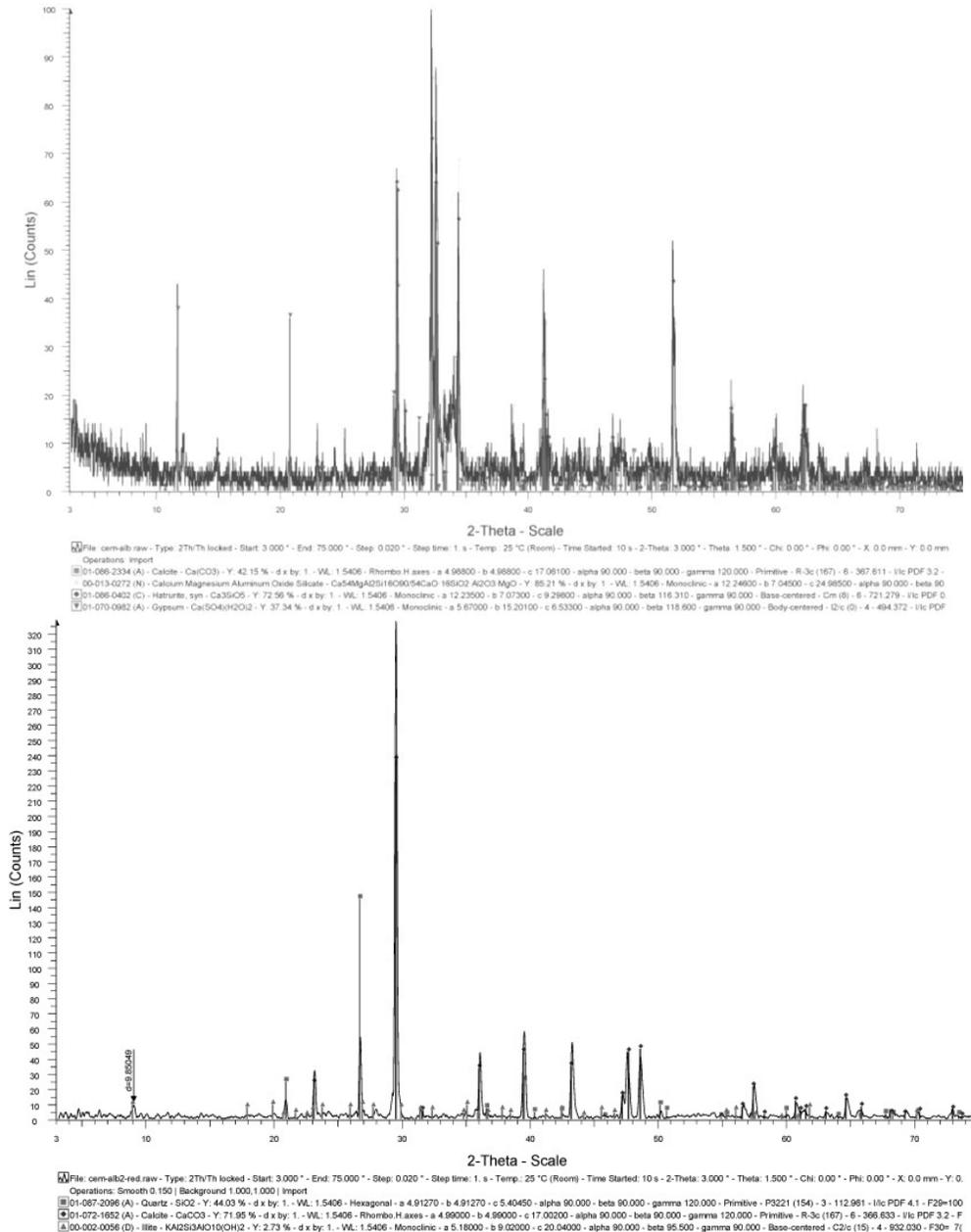


Figura 2. Patrones De Difracción Rx Correspondiente Al Cemento OPC Y Al CKD. Fuente: J. Markus, I. Dumi, E. Lijo T. Dilo, O. Cakaj(2012)

b) Cementación directa o aglutinamiento.

El CKD en su composición granulométrica, presenta partículas de Clinker que le proporcionan una cierta capacidad para tomar resistencia de acuerdo avanza la edad (a semejanza del OPC) en presencia de agua de amasado, debido a que se forman compuestos cementantes tales como hidrosilicatos de calcio, hidroaluminato de calcio y otros compuestos menores, por la presencia en importantes proporciones de materia mineral sin calcinar en totalidad y materia mineral cruda, resulta que el las partículas de Clinker están presentes en menores proporciones a las necesarias para generar valores de resistencia similares al OPC. Entiéndase que el Clinker está contaminado con la materia mineral (cruda y de calcinación incompleta) y residuos del combustible para la ignición. Todo ello afecta la capacidad de fraguado y toma de resistencia a niveles aprovechables para preparar mezclas de concreto. Esta débil formación de hidrosilicatos que afecta la rigidización de la pasta se piensa que se compensa en cierto grado con el contenido de una importante fracción de cal. Esta propiedad de cementar, aglutinar, ligar y endurecer en presencia del agua para el amasado permite pensar su utilidad para estabilizar suelos con presencia dominante de granulares, en especial arenas.

Existe la posibilidad de ocurrencia de dos procesos secundarios, con bases teóricas íntimamente vinculadas a los dos primeros indicados, los cuales son: c) la desecación, por decrecimiento de la tasa de hidratación por agua vinculada electroquímicamente, y d) sílica reactiva (reacción puzolánica). En el caso de la desecación, el fenómeno deriva como un efecto en los cambios de la base iónica catiónica (que implica cambios tanto de valencias, como de radio iónico del catión involucrado y del radio del complejo de absorción del mismo) que permite liberar agua atrapada por causa de enlaces electrovalentes y de la disminución de la tensión superficial existente entre el agua y las partículas finas del suelo, sujetas a las leyes e hipótesis planteadas para partículas en estado coloidal; y se evidencia el fenómeno físico – químico en la deshidratación parcial de la partícula y del conjunto de éstas. El segundo caso es el denominado sílico-reactivo, el mismo tiene afinidad al fenómeno de cementación con una diferencia fundamental: en el caso del mecanismo de cementación en que el CKD, solo o modificado con la presencia de aditivos o adiciones, una vez mezclado con el agua forma una lechada que es capaz de fraguar y endurecer mientras se forman nuevos compuestos a base principalmente de hidrosilicatos, que son productos de la reacción del CKD y el agua y en caso dado con la participación de alguna adición, siendo un ligante entre partículas sueltas principalmente granos; pero en el sílico-reactivo se inicia una sucesión de reacciones de cementación, que son de carácter directo, inmediato y progresivo, por reacción del CKD con el suelo de forma franca, seguramente en presencia de agua, formando nuevos compuestos criptocristalinos que cementan las partículas del suelo, este fenómeno puede darse con arenas producto de la desintegración de areniscas silíceas, suelos y rocas de origen volcánico, y cenizas volcánicas principalmente . Estos se estiman como secundarios porque el primero generalmente

ocurre simultáneamente en la estabilización iónica y se ve reflejado en la caída del L.L y del I.P, pero el segundo es de baja posibilidades de ocurrencia ya que aplica solo para suelos con capacidad puzolánica en presencia de un agente reactivo (CKD) y, porque igualmente, al caso indicado en el apartado (b) el CKD una vez hidratado formará productos de reacción propios. Para evitar que éste mecanismo se dé solo de forma accidental se deben hacer estudios de reactividad del CKD con el suelo para determinar si es factible la ocurrencia de la cementación directa.

FASE EXPERIMENTAL:

Valoración de los efectos del CKD sobre los suelos.

Se desarrolló esta fase mediante experimentación con ensayos tipificados y descritos en la normativa vigente. Se recurrió al estándar ASTM, según se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Ensayos utilizados y normativa que los rige

Ensayo Utilizado	ASTM
Análisis granulométrico	D422
Límites de Atterberg*	D4318
Gravedad específica	D854
Compresión sin confinar	D1633 / 5102

*Los Límites de Atterberg del suelo modificado con CKD se hizo de acuerdo a las directrices de la PCA para suelos modificados con cemento.

Caso I: Suelo granular

Se usó para el estudio una arena natural de utilidad en la construcción, extraída de mina. Se deseaba saber si hay mejoras en el material cementado en cuanto su compactación una vez el CKD adicionado a diversas relaciones; también se esperaba determinar, mediante el ensayo de probetas a compresión, el nivel de resistencia alcanzado de acuerdo a la variación de la tasa de aplicación de la adición indicada anteriormente.

- A) Características del material: arena fina a media, con prevalencia de media. Por ser una característica de este tipo de arena se tiene un importante nivel de vacíos y una baja densidad seca. (Mohie. 2011).

Gravedad específica de la arena = 2,72.

Gravedad específica del CKD = 3,11.

Diámetro efectivo D10 = 0,13.

El CKD tiene una granulometría congruente con la de los limos.

- B) De acuerdo a los ensayos se determinó que la máxima densidad seca de la arena SIN MODIFICAR es de 1,77 g/cm³ y la humedad optima correspondiente de 8,84%. Con la adición del CKD la densidad máxima seca aumenta, siempre y cuando se adicione mínimo 10% de CKD para obtener densidades secas superiores al caso de la arena sin adición. Para la relación arena 70% y CKD 30% la densidad máxima seca alcanza 2,01 g/cm³ y una humedad optima de compactación 9,6%, siendo estos valores mayores al caso sin modificar, y los maximos

alcanzados ya que a partir de 30% de adición de CKD comienza una disminución de la máxima densidad seca. Véase la figura 3.

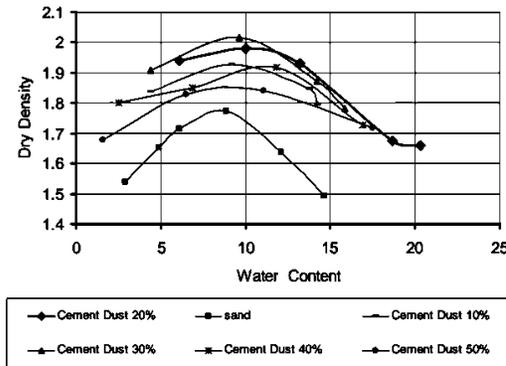


Figura 3. Ensayo Proctor Modificado sobre la muestra natural y modificada a varias relaciones de adición de CKD. Fuente: Mohie Eldin Mohamed Afify E, (2011)

C) El ensayo de resistencia a compresión sin confinar se realizó a los 7, 28, 90 y 180 días. Se obtuvo un incremento de la resistencia hasta los 90 días, ya que a partir de ese tiempo se apreció una ligera caída que puede observarse en la figura 4. La relación arena-CKD: 50%-50% proporcionó los mejores resultados, 1,0; 2,1; 4,3 y 3,9 kg/cm² respectivamente a los días indicados. Los menores valores corresponden a una adición del 20% de CKD con los siguientes valores alcanzados: 0,4; 0,6; 1,2 y 1,1 para los tiempos señalados anteriormente. A partir del día 90 se apreció una ligera caída de la resistencia en todas las proporciones. Se obtuvieron menores valores en la adición de CKD al 40% respecto a la de 30%, y se piensa que este resultado se puede explicar por las características micro-estructurales de la matriz compuesta. Se debe considerar que si la máxima densidad seca se obtuvo a esta última relación es porque el CKD es capaz de ocupar todos los espacios vacíos en la matriz arenosa y cementar entre sí las partículas del suelo, sin que se pierda necesariamente el contacto directo entre ellas, mientras que con una relación del 40% comienza una etapa de distanciamiento de los granos, por ende de pérdida de contacto entre ellos y habrá un encapsulamiento de estos, siendo esta fase estructuralmente insuficiente, la cual posiblemente en la pasta es la zona de inicio de la falla de la probeta, en cambio con 50% esa zona es más robusta y por tanto más resistente.

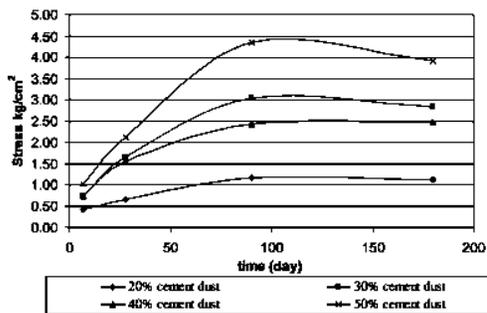


Figura 4. Ensayo de Compresión Sin Confinar a diferentes relaciones de CKD y distintas edades Fuente: Mohie Eldin Mohamed Afify E, (2011)

A pesar de que los valores resistentes a una alta tasa de adición de CKD al suelo no son significativamente elevados, hay que considerar otros efectos favorables y que están directamente asociados a la presencia del posible estabilizador aquí estudiado en la matriz del material. Estos beneficios son: la inmovilidad de los granos, la segura disminución de la permeabilidad y la posibilidad de agregar fibras sintéticas o adiciones con contenido de puzolanas.

Caso II. Suelo Expansivo – Contractivo

Los suelos expansivos – contractivos se caracterizan por estar constituidos por micro partículas, de elevada superficie específica y una alta capacidad de intercambio iónico (catiónico). Por este motivo, y previendo que el CKD es de características similares, y con la capacidad de aportar principalmente iones de calcio que inducen una reducción en el complejo de absorción del cristal de arcilla y por consiguiente una deshidratación parcial y la incapacidad de absorber agua a los niveles naturales u originales con el consiguiente cambio físico – químico que se ve reflejado en modificaciones en los valores de los Límites de Atterberg y del Índice Plástico (I.P) favorablemente desde el punto de vista de la geotecnia. Pero el CKD aporta un segundo mecanismo de estabilización que en todo caso actúa en combinación con el catión calcio y genera un efecto cinético y es aquel que deriva de la presencia de partículas de Clinker en la composición del CKD y el cual una vez hidratado genera compuestos de carácter puzolánico conocidos también como productos de hidratación; en este caso, combinados con la arcilla que contiene en sí misma la presencia de ion sílice y aluminio, siendo este el origen de la formación de los hidrosilicatos e hidroaluminatos en el cemento. La afinidad física y química contribuye a la degradación del cristal de arcilla para formar estos compuestos con el cemento hidratado, en la versión del CKD con polvillo de Clinker ya que no se le considera cemento aún por no haberle adicionado a esta etapa sulfato de calcio o yeso, que es parte complementaria en la formulación del Cemento Portland. Las propiedades del material para los ensayos se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del suelo cohesivo expansivo. Fuente: Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012)

Propiedades del Suelo Expansivo	Valores
Gravedad Específica (g/cm ³)	2,78
Límite Líquido (%)	50,3
Límite Plástico (%)	26,1
Índice Plástico (%)	24,2
Clasificación del Suelo	
USCS	CL
AASHTO	A-7-6
Contenido de Humedad Óptima (%)	18,6
Densidad Máxima Seca (Mg/m ³)	1,77
Resistenc. Compresión sin confinar (kN/m ²)	182
Contenido de arena	20
Contenido de limo	49

Propiedades del Suelo Expansivo	Valores
Contenido de arcilla	31
Porcentaje de pasa #200	85
CBR % (24 h de inmersión)	2
Expansión Libre (%)	48
Contenido de Humedad Natural (%)	25,8
Color	Gris oscuro

Los resultados obtenidos de los ensayos están representados gráficamente en las figuras 5 a 9:

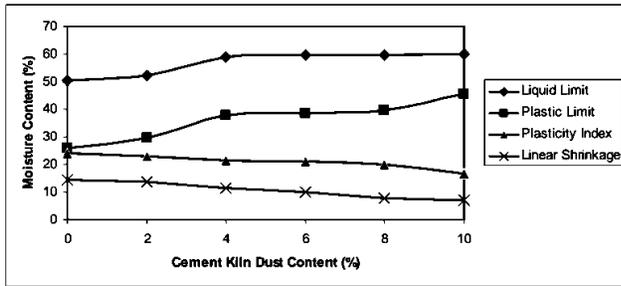


Figura 5. Variación de los Límites de Atterberg e Índice Plástico con la Adición de CKD. Fuente: Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012)

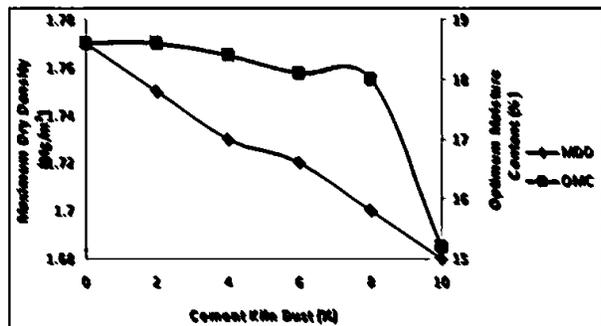


Figura 6. Variación de la Máxima Densidad Seca en función de la variación de contenido de CKD Fuente Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012)

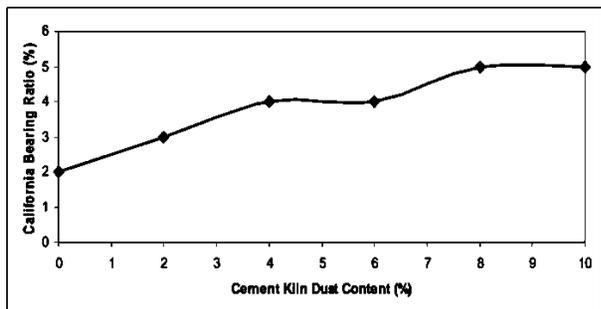


Figura 7. Variación del valor de CBR por la presencia de CKD (0 al 10%). Fuente Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012)

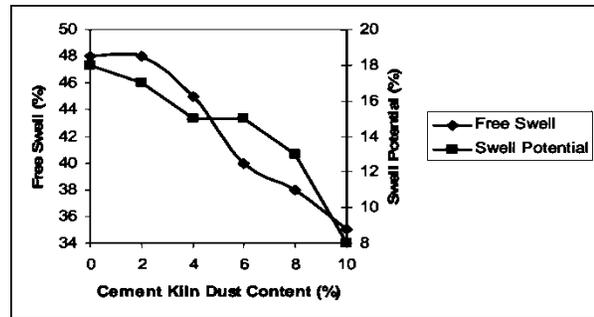


Figura 8. Pérdida del Valor de Expansión Libre y Potencial por la adición de CKD. Fuente: Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012)

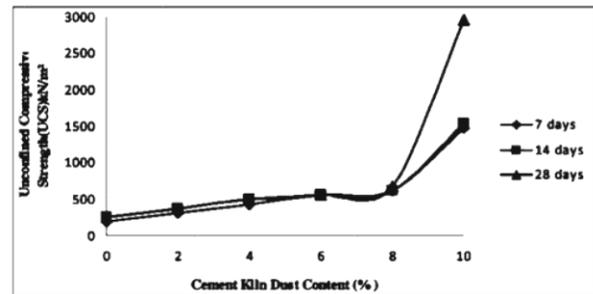


Figura 9. Incremento de la Resistencia a Compresión Sin Confinar a medida que se incrementa la adición de CKD. Fuente: Iorliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012)

Caso III: Suelos cohesivos

En la tabla 4, están resumido los valores característicos y de las propiedades del suelo que sirven para la descripción del material para el ensayo.

Tabla 4. Características y Propiedades del suelo. Fuente: El-Mohsen, M., Anwar M.A., Adam, I. (2015)

Característica o Propiedad	Valor
% Pasa #200	91,6
% Arcilla (<0,002 mm)	34,51
Gravedad Específica	2,71
Límite Líquido L.L (%)	39,4
Límite Plástico L.P (%)	21,6
Índice de Plasticidad I.P (%)	17,8
Peso Unitario Seco Máx. (Gs/Cm3)	1,81
Humedad Óptima (%)	15,4
USC clasificación	ML
AASHTOO Clasificación	A-6(17)
Descripción	Limo Arcilloso Marrón

A continuación, se presentan gráficamente los resultados obtenidos de los ensayos y un análisis de los mismos:

a) Límites de Atterberg e Índice plástico, ver figura10:

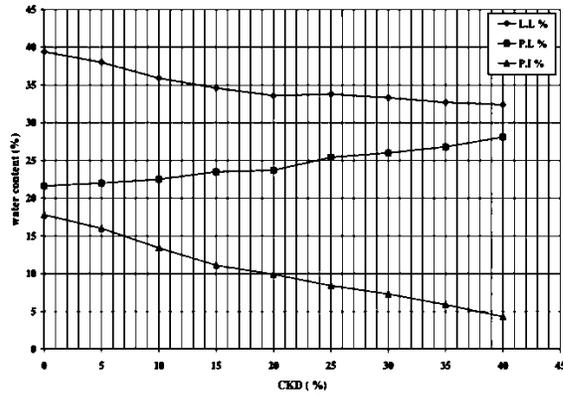


Figura 10. Límites de Atterberg e Índice plástico en función de la variación del porcentaje de CKD adicionado al suelo. Fuente: El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015)

En el gráfico anterior se aprecia cómo es capaz la presencia del CKD de modificar los Límites de Atterberg, se incrementa el Límite Plástico mientras disminuye el Límite Líquido en la medida que se incrementa la adición de CKD al suelo. Esto podría ser debido esencialmente por la presencia de Ca soluble (cal libre) en el CKD, la existencia de iones que inducen un incremento del pH causan la disolución del enlace del sílice y del aluminio con el catión base (generalmente Na) y se establece un nuevo enlace con el Ca, formando así nuevos compuestos CSH, CAH y CASH, y otros menores. Este cambio de base catiónica hace que la capacidad de absorción de agua por parte del cristal de arcilla se ve disminuida por el calcio Ca++, por su condición bi-valente sustituye dos cationes monovalentes de sodio Na+, adicionalmente, el complejo de absorción y el radio atómico del calcio es menor al de sodio. Todo lo antes expuesto, se traduce en una disminución del Límite Líquido y por consiguiente del Índice de Plasticidad; el incremento del Límite de Plasticidad se explica de forma análoga y contribuye a la reducción del I.P.

También se debe mencionar que la presencia del CKD mueve la curva Próctor a la derecha, es decir hay incrementos de la Humedad Óptima de Compactación, y esto se debe en parte por el proceso de deshidratación parcial y reducción de la capacidad del suelo de absorber agua por lo que se requiere mayores cantidades para hidratarlo a niveles semejantes a cuando no había sido modificada su físico – química; y porque al CKD presente en la matriz del suelo también es necesario hidratarlo. Pero la reducción del L.L es el fenómeno de mayor incidencia e importancia. El Índice de Plasticidad se ve reducido en función del incremento del porcentaje de CKD añadido a la matriz del suelo, puede verse los resultados en la tabla 5; luego en la tabla 6 puede notarse como el suelo puede ser reclasificado de acuerdo al cambio de los valores en el Índice de Plasticidad I.P. En la misma se hace evidente como a mayores porcentajes de CKD hay una reducción significativa en estos valores.

Tabla 5. Variación del I.P en función del Incremento en la adición del CKD. Fuente: El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015)

Porcentaje (%) de CKD adicionado	Índice de Plasticidad I.P
0	17,8
5	16,0
10	13,4
15	11,1
20	9,90
26	8,4
30	7,3
35	5,9
40	4,3

Tabla 6. Reclasificación del suelo de acuerdo a los cambios en el I.P. Fuente: El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015)

Porcentaje de CKD	Clasificación AASHTO	Clasificación USCS
0	A-6(17)	CL
5	A-6(15)	CL
10	A-6(12)	CL
15	A-6(10)	CL
20	A-4(9)	CL
25	A-4(8)	ML
30	A-4(7)	ML
35	A-4(6)	ML
40	A-4(4)	ML

b) Compactación Próctor.

En este ensayo se pudo determinar que a medida que se incrementa el porcentaje del CKD hay una disminución de la densidad y un incremento de la Humedad Óptima de compactación.

La relación entre el contenido de humedad y la densidad máxima para el suelo sin modificar y con adiciones de CKD a diferentes porcentajes está representada por las curvas mostradas en las figuras 11 y 12.

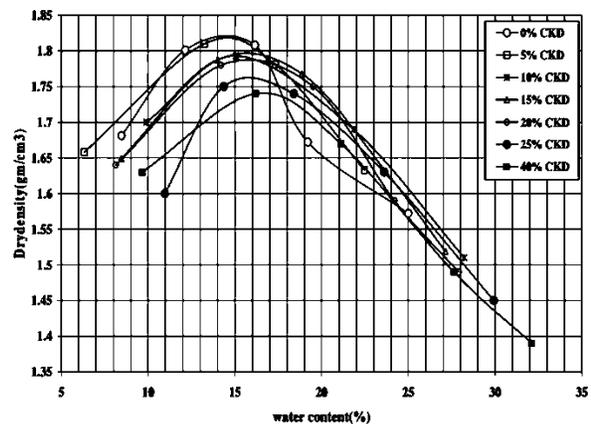


Fig 11. Curvas Próctor para suelo natural y con CKD a Varias relaciones. Fuente: El-Mohsen, M.,Anwar M.A., Adam, I. (2015)

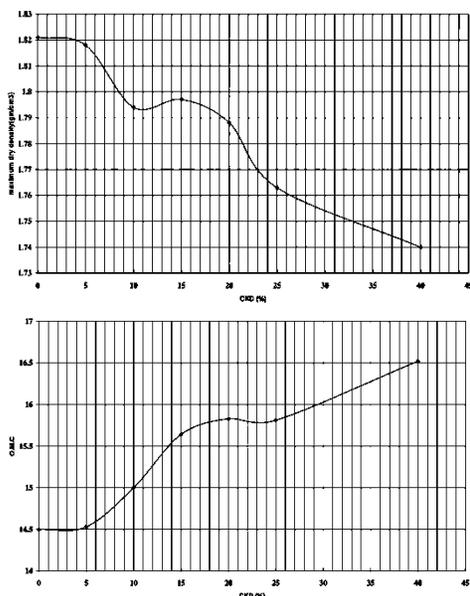


Figura 12. Variación en la compactación y de la Humedad Óptima en función del porcentaje de CKD adicionado. Fuente: El-Mohsen, M., Anwar M.A., Adam, I. (2015)

CONCLUSIONES

Los resultados anteriormente presentados indican que el CKD es un estabilizador efectivo en suelos granulares, cohesivos y expansivos – contractivos. No parece ser eficiente en el caso de suelos granulares ya que se requieren cantidades excesivas del agente estabilizador y los resultados obtenidos, si bien es cierto que adicionarlo mejora el comportamiento del suelo, no son óptimos. En este caso se podría hablar de mejoramiento más no de estabilización.

El CKD tiene capacidad de estabilizar suelos cohesivos y en especial a las arcillas, optimiza los valores de Límites de Atterberg e Índice de Plasticidad, por consecuencia provoca una disminución importante del hinchamiento en caso de suelos expansivos.

RECOMENDACIONES

- Ensayar si los aditivos para cemento son efectivos con el CKD.
- Realizar ensayos previos antes de ejecutar cualquier obra de estabilización con CKD.
- Investigar si adicionar cemento, o puzolanas o cemento con puzolanas al CKD se pueda aumentar la eficiencia del CKD en el caso de suelos granulares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- El-Mohsen, M., Anwar M.A., Adam, I. (2015), "Mechanical Properties Of Self-Consolidating Concrete Incorporating Cement Kiln Dust", HBRC Journal Volume 11, Issue 1
- Torliam, A.Y., Agbede, O., Manasseh J. (2012), "Effect Of Cement Kiln Dust (CKD) On Same Geotechnical Properties Of Black Cotton Soil (BCS)", EJGE Vol.17, Bund, H.
- Lizarazo, J.M., Claisse, P. (2009). "Resistencia a la compresión y Reología de cementantes ambientalmente amigables", Revista Ingeniería E Investigación, Vol. 29 N°2.
- Marku, J., Dumi, I., Liço, E., Dilo, T., Çakaj, O. (2012), "The Characterization And The Utilization Of Cement Kiln Dust (CKD) As Partial Replacement Of Portland Cement In Mortar And Concrete Production"
- Mohie Eldin Mohamed Afify E, (2011), "Soil Improvement Using Cement Dust Mixture" World Academy Of Science, Engineering And Technology, International Journal Of Civil, Environmental, Structural Construction And Architectural Engineering, Vol5, N°10
- Umberto Eco. (1977). Come Si Fa Una Tesi Di Laurea, Milano, Italia.