

Study of the effect of the addition of ash from artisan brick kilns in the stabilization of clay soils for pavements

Guillermo Ayala, Bachiller¹, Aldo Rosadio, Bachiller¹ y Gary Durán, Magister¹
¹Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201213989@upc.edu.pe,
u201515134@upc.edu.pe, gary.duran@upc.edu.pe

Abstract— This article presents the results of the stabilization of a subgrade clayey soil using an available and untapped residual material such as artisanal brick ash. 10%, 20%, 30% and 40% ash were added to the soil in relation to the dry weight, the soil being a clay with low plasticity. The following were carried out: a) X-ray diffraction analysis for the chemical characterization of both materials. b) Modified Proctor compaction test. c) California bearing ratio (CBR) test on pure soil and mixtures to determinate the characteristics of compaction and strength. The results showed an improvement of the mechanical and expansive properties of the soil stabilized with ash.

Keywords— Subgrade, Stabilization, Ash, CBR, Expansion.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.115>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Estudio del efecto de adición de ceniza proveniente de ladrilleras artesanales en la estabilización de suelos arcillosos para pavimentos

Guillermo Ayala, Bachiller¹, Aldo Rosadio, Bachiller¹ y Gary Durán, Magister¹

¹Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201213989@upc.edu.pe, u201515134@upc.edu.pe, gary.duran@upc.edu.pe

Resumen— Este artículo presenta los resultados de la estabilización de un suelo arcilloso de subrasante utilizando un material residual disponible y no aprovechado, como la ceniza de ladrilleras artesanales. Se adicionó, en el suelo, 10%, 20%, 30% y 40% de ceniza en relación al peso seco, siendo el suelo una arcilla de baja plasticidad. Se realizaron: a) Análisis de difracción de rayos X para la caracterización química de ambos materiales. b) Pruebas de compactación Proctor modificado. c) Pruebas de relación de resistencia de California (CBR) en el suelo puro y las mezclas para determinar las características de compactación y resistencia. Los resultados mostraron una mejora de las propiedades mecánicas y expansivas del suelo estabilizado con ceniza.

Palabras clave— Subrasante, estabilización, ceniza, CBR, expansión

Abstract— This article presents the results of the stabilization of a subgrade clayey soil using an available and untapped residual material such as artisanal brick ash. Were added 10%, 20%, 30% and 40% of ash to the soil in relation to the dry weight, the soil being a clay with low plasticity. The following were carried out: a) X-ray diffraction analysis for the chemical characterization of both materials. b) Modified Proctor compaction test. c) California bearing ratio (CBR) test on pure soil and mixtures to determinate the characteristics of compaction and strength. The results showed an improvement of the mechanical and expansive properties of the soil stabilized with ash.

Keywords— Subgrade, stabilization, ash, CBR, expansion

I. INTRODUCCIÓN

Los gobiernos de países en vías de desarrollo tienen como deber satisfacer las necesidades de los pueblos y ciudades menos favorecidos con infraestructura, salud y educación. Atendiendo a esta demanda, se ha venido incrementado la construcción de carreteras, tanto en su forma asfaltada como afirmada. Estas últimas se realizan en mayor proporción debido a la facilidad constructiva, bajo costo y uso de mano de obra poco especializada. Sin embargo, durante la etapa de ejecución de los proyectos viales, se encuentran problemas

con los tipos de suelos presentes en la zona de construcción, ya que cada tipo de suelo posee un comportamiento característico asociados a sus propiedades físicas y químicas. En particular, la construcción de carreteras sobre suelos arcillosos significa un alto grado de dificultad dentro de la ingeniería civil ya que estos muestran una baja resistencia al corte y alto potencial expansivo, siendo esta una situación común en muchas partes del mundo. En base al comportamiento, anteriormente mencionado de suelos arcillosos, aquellos que tienen valores de California Bearing Ratio (CBR) menores a 6% y expansiones considerables necesitan ser estabilizados especialmente cuando estos serán destinados en estructuras de pavimento [1].

La remoción del terreno y el reemplazo con un material de mayor resistencia, tal como roca triturada o afirmado, son propuestos como solución práctica para construir carreteras sobre suelos arcillosos [2]. El alto costo de reemplazo obliga a las administraciones de los proyectos a evaluar métodos alternativos y nuevas técnicas de estabilización. Uno de estos métodos es utilizar cenizas como un agente estabilizante. Chang et al. [3] en su investigación indican que las cenizas volantes son un residuo finamente graduado resultante de la combustión de carbón pulverizado en una caldera y transportado por los gases de combustión, especialmente durante la generación de electricidad en las centrales térmicas. Las partículas poseen generalmente la forma de esferas de óxidos de silicio, aluminio y hierro. El tamaño de partícula varía de 0,01 micras a 100 micras.

En relación a la generación de cenizas, en Perú se tiene registro que la industria ladrillera artesanal es una de las principales productoras de cenizas industriales, ya que cuenta con 1548 microempresas ladrilleras de producción artesanal [4]. Debido a la categoría artesanal de esta industria, la disposición final de estos residuos no es ambientalmente adecuado, resultando en impactos negativos en la salud de las poblaciones cercanas a los centros de producción. Ante esto nace la importancia de que los residuos originados de la actividad ladrillera deban ser correctamente desechados [5]. Ante ello, la posibilidad de poder reutilizar las cenizas obtenidas en la quema del carbón y la madera en los hornos

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.115>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

artesanales, que anualmente generan 53,500 toneladas de ceniza, es viable y cumple con una de las obligaciones del Perú como miembro de la Coalición del Aire Limpio y el Clima (CCAC).

En este estudio se evaluó el efecto producido por la adición de cenizas, provenientes de la quema del carbón y la madera, en el comportamiento mecánico de un suelo arcilloso. En primer lugar, se realizó la caracterización física del suelo y la ceniza a través de los ensayos de granulometría, gravedad específica de los sólidos y límites de Atterberg. Posteriormente, se determinó la composición química de las muestras de ceniza y suelo. También se ejecutaron ensayos Proctor modificado para obtener los valores de humedad óptima y máxima densidad seca en el suelo arcilloso y diferentes proporciones de mezcla. Por último, se efectuaron ensayos CBR sumergidos para calcular la resistencia a la penetración del suelo y de las diferentes mezclas, con la finalidad de identificar la mezcla óptima.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Después de determinar las características físicas del suelo y la ceniza, se procedió a realizar la caracterización química de los materiales por medio de la difracción de rayos X. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando un difractómetro marca Bruker con radiación de rayos X de $\text{Cu}\alpha$, que trabaja a 40kV y 400mA. La muestra pasante de la malla N° 400 fue la que se utilizó para los ensayos de difracción de rayos X. Para la identificación de las fases cristalinas se cuenta con la base de datos del International Centre for Diffraction Data. El contador de radiación X, contabiliza la intensidad del haz difractado, en cuentas por segundo, cuando forma un ángulo 2θ , comprendido entre los 5 y 70°, con la muestra y cumple con las condiciones de reflexión. El mecanismo de desplazamiento del contador está conectado al de desplazamiento de la muestra a doble velocidad.

Posteriormente, se desarrolló una serie completa de pruebas de laboratorio en las muestras de suelo arcilloso estabilizadas con diferentes combinaciones de ceniza de fondo de ladrillera artesanal (CFLA). Las pruebas realizadas incluyen el ensayo de compactación Proctor Modificado y el ensayo CBR. La Tabla I muestra un resumen de las mezclas suelo – ceniza. Los porcentajes utilizados de CFLA fueron 0%, 10%, 20%, 30% y 40% de la masa total de la mezcla.

De la misma manera, se menciona en la literatura que el retraso de la compactación después de mezclar las cenizas con el suelo da como resultado una considerable pérdida de resistencia [6], por lo que los ensayos Proctor Modificado se realizaron inmediatamente después de preparar cada una de las mezclas.

Para elaborar los especímenes de las mezclas compactados con 15, 24 y 56 golpes para el ensayo CBR, se tomaron los valores obtenidos de máxima densidad seca (MDS) y óptimo contenido de humedad (OCH) de cada una de las muestras, y se ensayaron después de estar sumergidas 4 días [7].

ESQUEMA DE LAS DIFERENTES MEZCLAS DE SUELO UTILIZADAS

Mezcla	Características
M1	Suelo + 0% de CFLA
M2	Suelo + 10% de CFLA
M3	Suelo + 20% de CFLA
M4	Suelo + 30% de CFLA
M5	Suelo + 40% de CFLA

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presente investigación, se utilizó un suelo arcilloso, con alto contenido de oligoclasa y cuarzo, recolectado de la periferia norte de la ciudad de Lima, Perú. Las muestras de suelo fueron extraídas a una profundidad de 2 m por debajo del nivel del suelo. La Fig. 1 muestra la distribución del tamaño de las partículas, obtenidas por medio del tamizado y análisis del hidrómetro, del suelo utilizado. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el suelo se clasifica como una arcilla de baja plasticidad. Los resultados de la caracterización del suelo se muestran en la Tabla II. Asimismo, se trabajó con CFLA proveniente del centro probado de Santa María de Huachipa. La CFLA es de tipo no plástico y posee una gravedad específica de 2.51. La ceniza posee propiedades puzolánicas, como las de tipo Clase F [8]. Además, se utilizó el material pasante de la malla N° 200 para el proceso de estabilización, puesto que era necesario eliminar los residuos del proceso de fabricación de ladrillos. Por ello, en la Fig. 1 solo se muestra la distribución del tamaño de las partículas obtenidas por medio del hidrómetro, ya que el análisis por tamizado no proporciona información relevante. La composición y propiedades físicas de CFLA se enumeran en la Tabla III. Se puede apreciar que la gravedad específica de los sólidos de la ceniza es menor que la que posee la arcilla.

La influencia de CFLA en las características mecánicas del suelo arcilloso se investigó mediante la realización de ensayos de compactación Proctor Modificado y pruebas de CBR, mientras que la difracción con rayos X nos muestra la estructura laminar de los materiales. La discusión detallada y el análisis de los resultados obtenidos se dan en las siguientes secciones.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO

Gravedad específica	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad	OCH (%)	MDS (kN/m3)
2.643	29.1	18.6	10.5	12.7	1.922

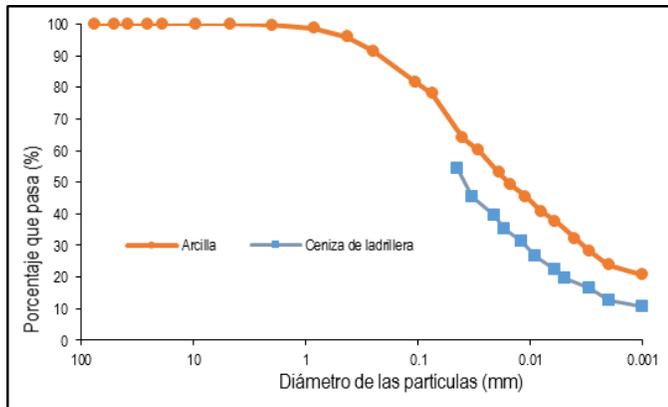


Fig. 1 Comparación entre el tamaño de las partículas de arcilla y ceniza

B. Ensayo de compactación Proctor modificado

Los ensayos se llevaron a cabo en muestras no curadas de acuerdo con el Método A [9], es decir, se elaboraron los especímenes inmediatamente después de preparar las mezclas. Los resultados de las pruebas de compactación Proctor modificado se utilizaron en la preparación de muestras para los ensayos CBR. Dado que la ceniza es un material liviano y fino en forma de polvo, se percibe un decremento de la MDS acorde al aumento de la cantidad de ceniza presente en la mezcla. Esta disminución en la máxima densidad seca se observa hasta alcanzar un 20% de ceniza en la mezcla, ya con 30% y 40% de ceniza la máxima densidad seca tiene una tendencia a aumentar.

TABLA III
CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA DE LA CENIZA

Composición química (%)							Propiedades físicas		
Cuarzo (SiO ₂)	Mullita (Al ₆ Si ₂ O ₁₃)	Oligoclasa ((Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈)	Muscovita (KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂)	Actinolita (Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂)	Otros	Amorfo	Color	Gravedad específica	Índice de plasticidad
30	25	6	5	2	3	29	Gris claro	2.51	N.P

A. Difracción de Rayos X

Por un lado, del análisis realizado a la CFLA (Fig. 2), se comprueba su naturaleza como material con propiedades puzolánicas o que tiene potencial para reaccionar con hidróxidos alcalinos y conformar compuestos cementantes, ya que presenta SiO₂ en su composición. De la misma manera, el difractograma presenta picos asociados a la mullita, la cual es un silicato de aluminio que puede estar asociada a la arcilla utilizada como materia prima para el proceso de fabricación de los ladrillos. Además, se tiene un porcentaje elevado de estructura amorfa obtenida de la combustión del carbón y la madera a temperaturas entre los 400 y 760 °C. Esto garantiza que la CFLA tiende a reaccionar al no presentar una estructura cristalina en su totalidad. Por último, se concluye que la CFLA es bastante contaminada, ya que es resultado del barrido de la ceniza remanente en los hornos luego de realizada la quema de los ladrillos frescos. Por otro lado, la sílice como la oligoclasa presentes en la arcilla están asociadas a los óxidos de silicio y de aluminio con microestructura cristalina que no presenta propiedades de plasticidad, siendo éstos de gran abundancia en la corteza terrestre (Fig.3).

Por otro lado, se observa que el OCH aumenta conforme se adiciona mayor cantidad de ceniza a la mezcla, debido a la absorción de humedad de la ceniza. Finalmente, se puede constatar gráficamente la tendencia seguida por la MDS y el OCH en la Fig. 4.

C. Ensayo CBR

Los resultados obtenidos de los ensayos de relación de soporte para 2.54 mm (0.1") de penetración fueron menores que los de 5.08 mm (0.2") de penetración, por lo que se utilizaron estos últimos para el estudio. Los tiempos de curado y sumersión de las muestras fueron 0 y 4 días, respectivamente. Asimismo, se trabajó con los resultados al 95% de MDS.

Se tiene una muestra de suelo natural con un CBR de 2.2% que se encuentra dentro de la categoría de sub-rasante insuficiente [10]. Sin embargo, se puede apreciar que el valor de CBR va incrementándose hasta un límite luego del cual disminuye (Fig. 5). El valor óptimo para estas combinaciones es del 20% de CFLA, puesto que permite un incremento de 2.2% a 9.5%, es decir aumenta 4.3 veces su capacidad de soporte y convierte el suelo en una subrasante apropiada para la construcción de pavimentos. Además, se produce una disminución de la expansión del material desde 4.6%, valor que corresponde a M1, hasta un valor de 0.74%, el cual se produce cuando se adiciona 40% de CFLA (Fig. 6).

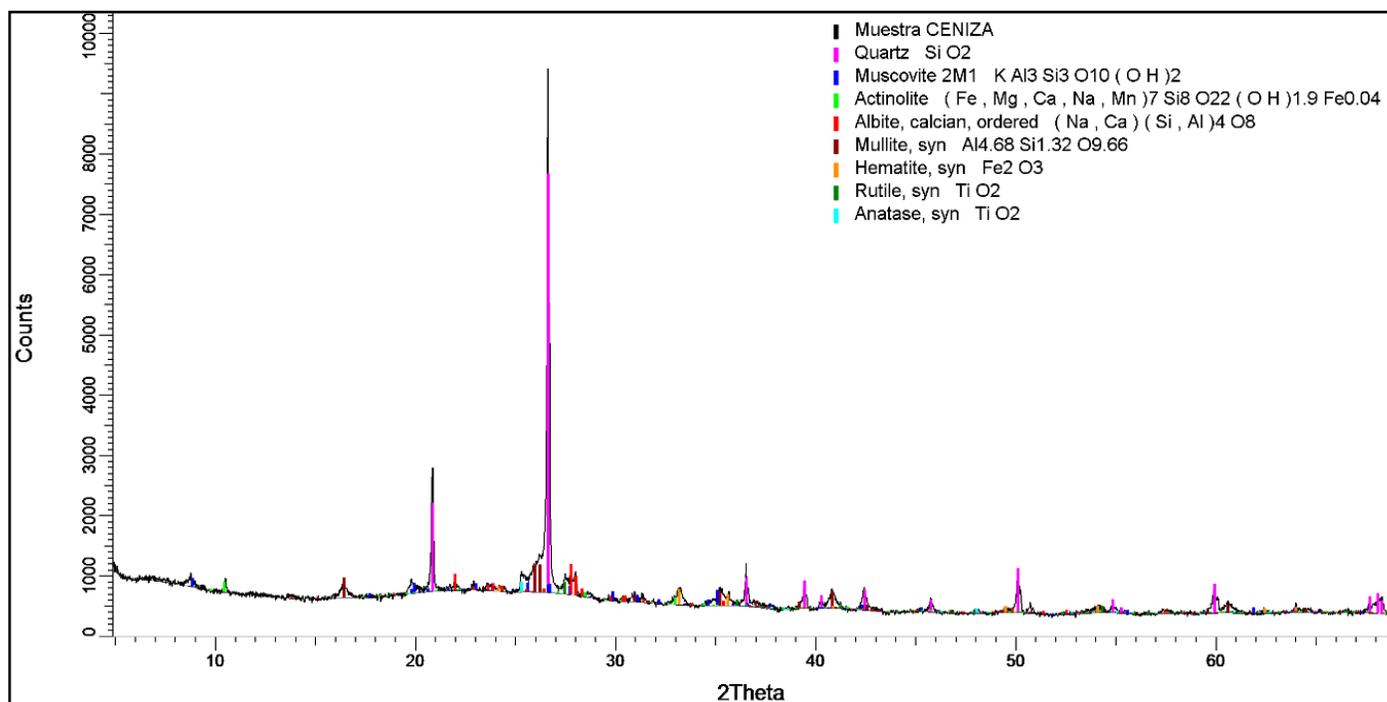


Fig. 2 Difractograma de la muestra de CFLA

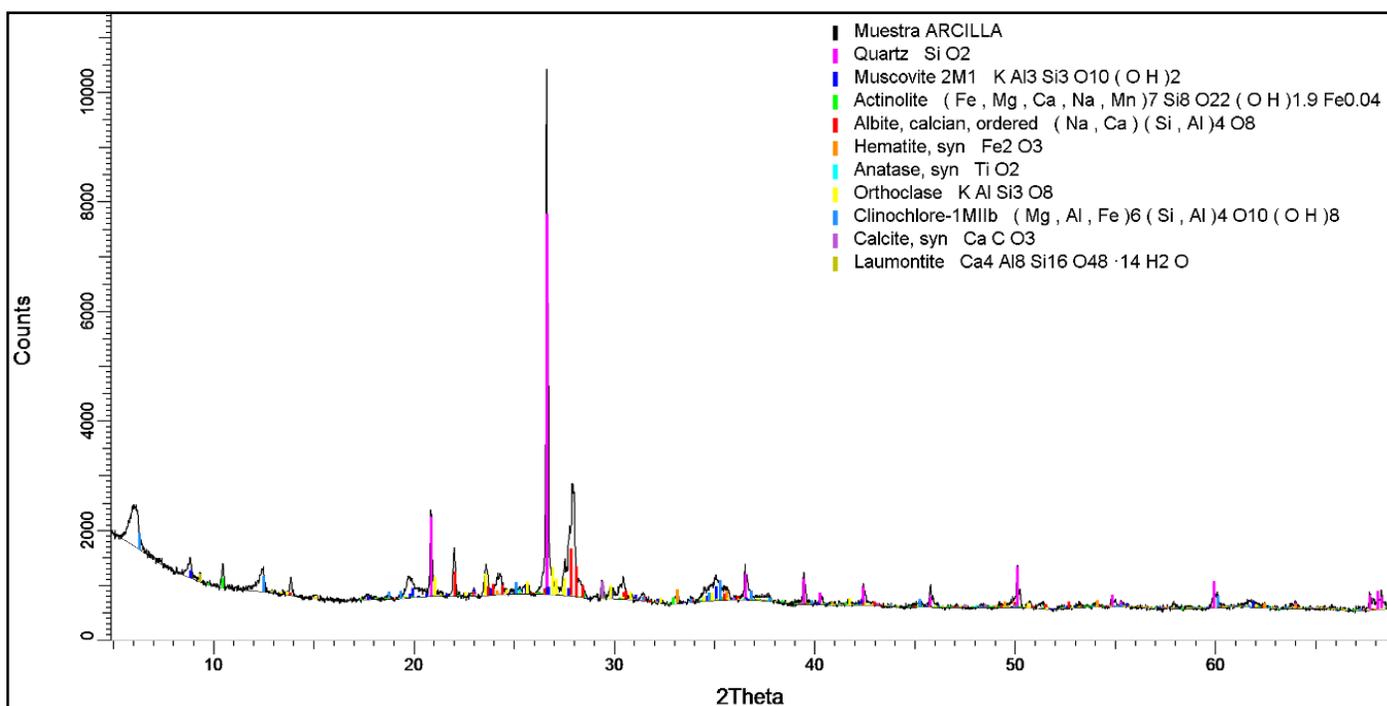


Fig. 3 Difractograma de la muestra de arcilla

En los resultados de CBR y expansión se observa una tendencia común, hasta 20% de presencia de ceniza en la mezcla, se observa una tendencia a aumentar el CBR y una tendencia a disminuir de la expansión. A partir de este porcentaje estas tendencias se invierten para posteriormente volver repetir la tendencia inicial. Este comportamiento peculiar para 30% de ceniza en la mezcla, puede deberse a que la excedencia de ceniza que posiblemente no reaccionó con el suelo pero sí se hidrató perjudica la interacción de los granos de suelo y los elementos sólidos productos de la reacción puzolánica. Por otro lado, cuando la presencia de ceniza alcanza el 40% en relación al peso seco, nuevamente el comportamiento mejora. Esto se puede deber a que la arcilla excedente que no reacciona con el suelo ni tampoco se hidrata se comporta como un material de relleno que completa los vacíos entre las partículas de la mezcla, lo cual tendría relación con la mayor densidad seca máxima registrada para la mezcla M5 en comparación con la mezcla M3.

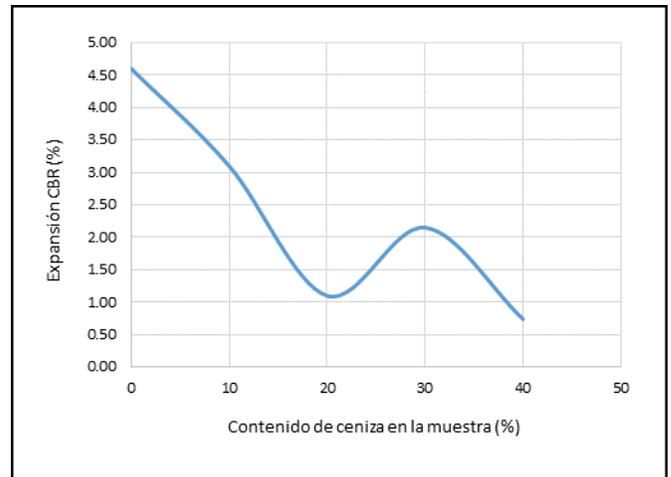


Fig. 6 Curva Expansión CBR vs Contenido de ceniza en la muestra

En la Fig. 7 se aprecia el comportamiento de la expansión de las mezclas (10, 25 y 56 golpes) conforme el contenido de CFLA aumenta. Se puede comprobar que las muestras M2, M3 y M4 presentan una tendencia a reducir el porcentaje de expansión del espécimen y la muestra M5, a pesar de tener el menor porcentaje de expansión (para 95% de la MDS), comienza adquirir una tendencia comportamiento parecido a la muestra de suelo puro. Por ende, se opta por elegir como valor óptimo el 1.1% alcanzado en la mezcla M3, ya que corresponde al porcentaje de CBR máximo obtenido y que no tiende a seguir el comportamiento del suelo natural. Cabe indicar que en las mezclas M2, M3 y M4 ocurre un comportamiento de expansión, aparentemente inconsistente con la densidad de los especímenes, siendo que lo común es que la expansión sea menor conforma la densidad alcanza mayores valores.

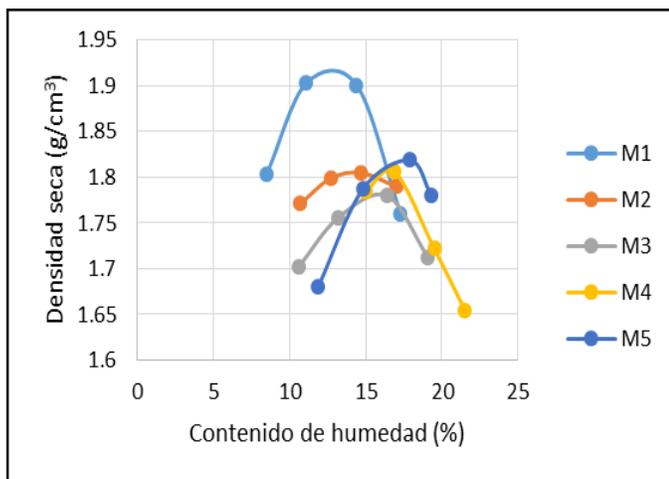


Fig. 4 Relación existente entre las diferentes curvas de compactación obtenidas para cada muestra

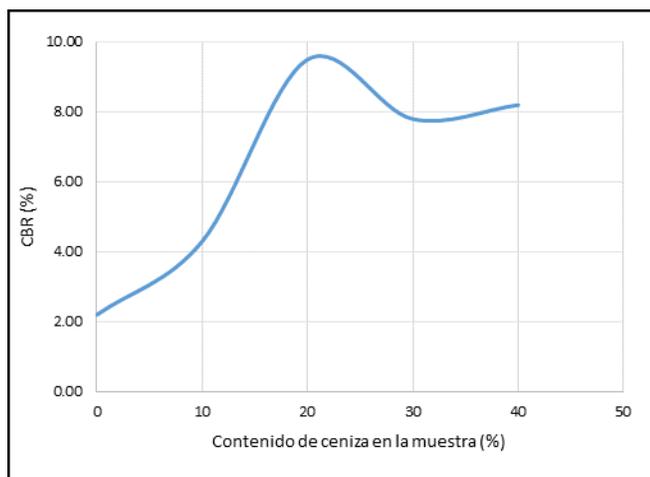


Fig. 5 Curva CBR vs Contenido de ceniza en la muestra

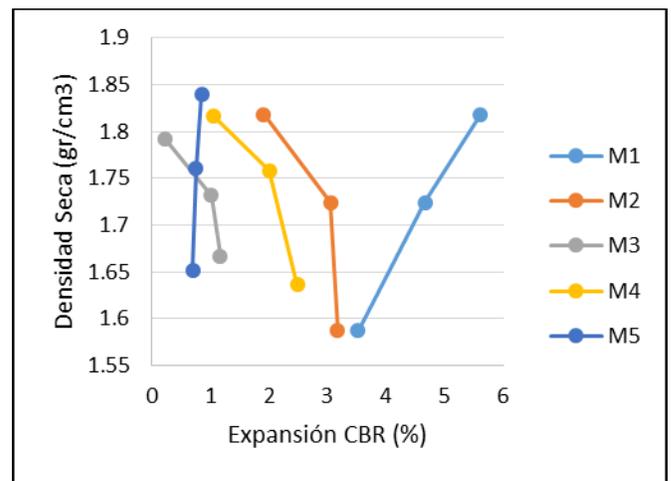


Fig. 7 Relación existente entre los valores de expansión CBR para los diferentes tipos de muestras ensayadas

IV. CONCLUSIONES

Del ensayo de caracterización química mediante la difracción de rayos X, se tiene que la arcilla presenta estructuras cristalinas correspondientes al cuarzo y a la oligoclasa, ambos de baja plasticidad, lo cual se verificó con los ensayos de límites de consistencia. De la misma manera, la muestra de ceniza estudiada presenta características puzolánicas, ya que posee SiO₂ en forma de cuarzo. Además, posee una cantidad considerable de estructura amorfa, lo que facilita la reactividad de la ceniza en contacto con la arcilla. Se puede concluir que es factible el empleo de CFLA como estabilizador de la arcilla extraída de la periferia norte de la ciudad de Lima y su uso en el mejoramiento de subrasantes para pavimentos, puesto que conforme se aumentó la presencia de ceniza, la muestra de arcilla natural elevó su CBR de 2.2% hasta alcanzar un porcentaje del 9.5% correspondiente a la adición de 20% de CFLA. No obstante, para porcentajes de ceniza mayores a 20% el valor del CBR comienza a decrecer. Por lo tanto, se establece que para este tipo de suelo el porcentaje de ceniza óptimo para alcanzar el mejor comportamiento mecánico está alrededor de 20%. Asimismo, los resultados obtenidos del ensayo CBR sumergido también indican un descenso en la expansión de la muestra. Este valor decrece de 4.6% para la muestra sin adicionar hasta un valor de 1.1% para un porcentaje de 20% de CFLA. Sin embargo, al adicionar un porcentaje mayor de ceniza, el valor de la expansión aumenta y, finalmente, disminuye para un porcentaje de 40% de CFLA, alcanzando un valor de 0.74%

El uso de estos residuos para fines ingenieriles se convierte en una alternativa viable para agregar valor a la ceniza y se considerada como opción de disposición final ambientalmente adecuada. Por otro lado, la estandarización de las cenizas generadas durante la quema de carbón y madera en las ladrilleras artesanales permitiría obtener un material con características químicas y físicas constantes de tal manera que este producto podría ser considerado de uso estándar en diversos proyectos de estabilización de suelos que carecen de las propiedades mecánicas especificadas. Esta estandarización debe ser promovida por el Estado a través de programas de apoyo a la empresas que producen ladrillos artesanales, capacitándolas e incentivando la modernización de sus instalación a través de políticas de incentivos tributarios o préstamos de organizamos internacionales.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al Ph. D. Ing. César Augusto Morales Velasco por su asesoría académica y apoyo en la elaboración del presente artículo científico. De la misma manera, agradecemos a los laboratorios IngeoTest Ingenieros y BizaLab por brindarnos sus instalaciones para la realización de los ensayos.

REFERENCIAS

- [1] B. M. Das, *Advanced Soil Mechanics*. Taylor & Francis Publishers, 1997
- [2] A. Şenol, T. Edil, M. S. Bin-Shafique, H. Acosta and C. H. Benson, "Soft Subgrades Stabilization by Using Various Fly Ashes", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 46, no. 4, pp. 365-376, 2006
- [3] A. C. Chang, J. L. Lund, L. A. Page and E. Warneke, "Physical Properties of Fly Ash Amended Soils", *J. Environmental Quality*, Vol. 6, no. 3, pp. 267-270, 1977
- [4] Ministerio de la Producción (PRODUCE), *Estudio diagnóstico sobre las ladrilleras artesanales en el Perú*. Lima: PRODUCE, 2011 [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2FTb26H>. [Accedido: 20-nov-2018]
- [5] Ley N° 26842: Ley general de salud del Perú. Decreto de 1997 en Diario oficial El Peruano
- [6] A. Şenol, M. S. Bin-Shafique, T. Edil and C. H. Benson, "Use of Class C Fly Ash for the Stabilization of Soft Subgrade", *ARI, The Bulletin of the Istanbul Technical University*, Vol. 53, pp. 89-95, 2003
- [7] Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. Standard ASTM D1883-99
- [8] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use in Concrete. Standard ASTM C618-12
- [9] Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. Standard ASTM D1557-09
- [10] Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), *Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima: MTC, 2013