

# Experimental study of the geotechnical behavior of sandy soil with wood and coal ash from artisan brick kilns

José Aponte, Bachiller<sup>1</sup>, Julio Gálvez, Bachiller<sup>1</sup>, Gary Durán, Magister<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201120905@upc.edu.pe, u201310224@upc.edu.pe, gary.duran@upc.edu.pe

*Abstract– The ashes generated from the burning of organic matter present an environmental problem due to their inadequate final disposal, contaminating the air and the populations. An adequate reuse mechanism would have a positive impact on reducing the environmental impact and would add value to a waste that is produced in large quantities. So, in recent years the use of waste in various infrastructure works has been studied more frequently.*

*An experimental study of the geotechnical behavior of a well graded sand mixed with ash from the wood and coal burning of the artisanal brick industry was carried out. Likewise, it was sought to demonstrate the improvements in the geotechnical characteristics of the soil-ash mixture and contribute to the study of the benefits of the reuse of this residual material. In particular, physical characterization tests were performed, Standard proctor, direct cut and triaxial consolidated not drained (CU). In addition, direct cutting tests were carried out with specimens made with 0, 10, 20, 30 and 40% ash in relation to the dry weight of the soil. The direct cut results showed that the mixture with 10% ash achieved higher cut resistance, compared to the resistance of the pure soil. To confirm, the results of the triaxial CU test indicated that the shear strength and modulus of elasticity for the mixture is greater than that of the soil.*

*Keywords— Wood ash, Coal ash, Sandy soil, Shear strength, Triaxial.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.116>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Estudio experimental del comportamiento geotécnico de suelo arenoso con ceniza de madera y carbón proveniente de ladrilleras artesanales

José Aponte, Bachiller<sup>1</sup>, Julio Gálvez, Bachiller<sup>1</sup>, Gary Durán, Magister<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201120905@upc.edu.pe, u201310224@upc.edu.pe, gary.duran@upc.edu.pe

**Resumen-** Las cenizas generadas de la quema de materia orgánica presentan un problema medioambiental debido a su inadecuada disposición final, contaminando el aire y a las poblaciones. Un adecuado mecanismo de reutilización impactaría positivamente en disminuir el impacto ambiental y agregaría valor a un residuo que se produce en grandes cantidades. Así que, en los últimos años se viene estudiando con mayor frecuencia la utilización de los residuos en diversas obras de infraestructura.

Se llevó a cabo un estudio experimental del comportamiento geotécnico de una arena bien graduada mezclado con cenizas provenientes de la quema de madera y carbón de la industria ladrillera artesanal. Asimismo, se buscó demostrar las mejoras en las características geotécnicas de la mezcla suelo-ceniza y contribuir con el estudio de los beneficios de la reutilización de este material residual. Particularmente se realizaron ensayos de caracterización física, Proctor estándar, corte directo y triaxial consolidado no drenado (CU). Además, se realizaron ensayos de corte directo con especímenes elaborados con 0, 10, 20, 30 y 40% de ceniza en relación con el peso seco del suelo. Los resultados a corte directo mostraron que la mezcla con 10% de ceniza alcanzó mayor resistencia al corte, comparada con la resistencia del suelo puro. Para confirmar, los resultados del ensayo triaxial CU indicaron que la resistencia al corte y módulo de elasticidad para la mezcla es mayor que la del suelo.

**Palabras Clave-** Ceniza de madera, ceniza de carbón, suelo arenoso, resistencia la corte, triaxial

**Abstract-** The ash generated from the burning of organic matter is an environmental problem due to their inadequate final disposal, contaminating the air and populations. An adequate reuse mechanism would have a positive impact on reducing the environmental impact and would add value to a waste that is produced in large quantities. In this way, in recent years the use of waste in various infrastructure works has been studied more frequently.

An experimental study of the geotechnical behavior of a well graded sand mixed with wood ash and coal ash from artisanal brick industry was carried out. Likewise, it was sought to demonstrate the improvement of geotechnical characteristics soil-ash mixtures and contribute to benefit of the knowledge and the reuse of this residual material. Physical characterization and Proctor compaction tests were performed. In addition, direct shear tests were carried out with specimens with 0, 10, 20, 30 and 40% of wood and coal ash by dry weight of the soil. The direct shear test results showed that the mixture with 10% ash achieved higher shear strength, compared to the sandy soil. Triaxial test results indicated that the shear strength and modulus of elasticity for the mixture is greater than that sandy soil.

**Keywords-** Wood ash, coal ash, sandy soil, shear strength, triaxial.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha venido estudiando con mayor dedicación la utilización de residuos en aplicaciones para la industria de la construcción. Entre dichos estudios se encuentra el uso de las cenizas, las cuales tienen una elevada producción y requieren de un adecuado mecanismo de reutilización, como material adicionante para la elaboración de cementos [1]; sin embargo, esta alternativa en la actualidad no es suficiente para absorber la producción de cenizas. Por tal motivo en la investigación se presenta el uso de la ceniza como material estabilizador de suelo mediante la evaluación de las propiedades geotécnicas del suelo compuesto.

La industria de ladrillos artesanales ha venido generando un exceso de residuos, específicamente cenizas, tanto volantes como de fondo; las cuales son producidas por la quema de madera y carbón, usados como fuente de combustible para los hornos. En América Latina los centros de producción artesanal están entrando en contacto con las pequeñas nuevas urbanizaciones lo que demanda mayor cantidad de producción y mejoras en la calidad [2].

En la mayoría de estos países dichos residuos cuentan con procesos deficientes y poco sostenibles para su eliminación. Esto sumado a las deficiencias en infraestructura y a las políticas ambientales con las que los países cuentan, han venido acrecentando la situación. Se ha planteado que particularmente en el Perú existen aproximadamente 2000 hornos en la industria de ladrillos artesanales, los cuales generan aproximadamente 53,500 toneladas de cenizas de fondo al año [3]. La falta de investigación e innovación en el uso de las cenizas producidas por la quema de madera ha contribuido en el desconocimiento por parte de la población del potencial que se tiene con respecto a sus posibles aplicaciones para la industria de la construcción. Este desconocimiento ha generado que no se desarrollen procesos más sostenibles con un impacto ambiental más amigable. En relación con la contaminación ambiental el uso de leña y combustible quemado genera emisiones tóxicas que producen en las personas problemas de salud respiratorios, de piel y en el sistema nervioso central esto debido a la calidad del aire, la cual se encuentra perjudicada por las altas emisiones de residuos como los compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), entre otros [4]. Las causas de estos problemas son la falta de políticas estatales de inversión en investigación para el uso de los residuos industriales y la falta de iniciativas entre empresas y

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.116>

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

universidades en temas de investigación relacionada con los residuos.

Se ha venido utilizando la ceniza para mejorar las características geotécnicas del suelo obteniendo resultados favorables. Un estudio elaborado en Colombia propone la estabilización de suelos expansivos de San José de Cúcuta mediante el empleo de cenizas volantes provenientes de la empresa termoeléctrica Termotasajero S.A [5]. Un estudio similar se realizó con cenizas de carbón de la planta termoeléctrica ILO21-Moquegua-Perú para estabilizar suelo arcilloso [6]. En ambos estudios se mejoran las características geotécnicas de los suelos arcillosos que requerían ser estabilizados concluyendo que las mezclas con 20% y 30% de ceniza en relación al peso seco del suelo, proporciona los mejores resultados respectivamente. Por otro lado, en Brasil se han utilizado ceniza de cáscara de arroz como estabilizante de suelo arenoso, la mezcla con ceniza al 20% de su peso mostró mejores características geotécnicas [7]. En función a este resultado, se aprecia que las cenizas de origen orgánico consiguen mejorar las características mecánicas tanto de suelos cohesivos como de suelos predominantemente friccionantes como lo son las arenas.

A continuación se presentan los resultados de un estudio experimental del comportamiento geotécnico de un suelo arenoso mezclado con cenizas provenientes de la quema de madera y carbón de la industria de ladrillos artesanales de la ciudad de Lima, demostrando así los beneficios de la reutilización de este residuo.

## II. MÉTODO

En muchas ocasiones los suelos requieren mejoras en sus propiedades in situ para poder ser utilizados en la construcción: resistencia al corte, capacidad de carga, mejoras en la expansibilidad y contracción, permeabilidad y niveles de deformación, para lo cual se realiza una estabilización del suelo mediante aditivos [8]. La ceniza proveniente de la quema de madera y carbón de ladrilleras artesanales surge como una opción para la mejora de las propiedades geotécnicas del suelo. Este mecanismo genera alteraciones en el suelo que dependen de factores como el tipo de suelo, el tipo y cantidad de ceniza y cal, energía de compactación aplicada, tiempo de curado de la mezcla suelo-ceniza [9]. El uso de ceniza-cal como aditivo ha venido obteniendo buenos resultados. Las cenizas al estar conformadas por alúmina, sílice y otros compuestos como la cal libre, le confieren una naturaleza puzolánica, que al ser hidratada junto con el suelo puede reaccionar formando productos cementantes como silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH). Los hidratos que se forman mejoran la resistencia mecánica del suelo. Una vez iniciada la reacción, los geles de silicato que se van formando cubren y conectan los minerales arcillosos, llenando los vacíos. Conforme se va dando el proceso de cristalización de los geles para convertirse en silicatos o aluminio hidratado de calcio, el cual es un proceso lento pero continuo, se va aumentando más la resistencia mecánica de la mezcla [10]. Por medio de reacciones electroquímicas, se produce una reorganización de la estructura interna del suelo que ocasiona un cambio significativo en la composición de la mezcla suelo-ceniza.

**17<sup>th</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology:** "Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities", 24-26 July 2019, Jamaica.

En el caso de suelos cohesivos estabilizados con cal, esta llega a las partículas de arcilla mediante el medio acuoso que se forma al agregar agua a la mezcla, se producen las reacciones de intercambio catiónico y floculación-aglomeración en las que se da el reemplazo de cationes monovalentes asociados generalmente a las arcillas por iones de calcio divalentes.

Los materiales que se utilizaron en esta investigación son suelo arenoso y ceniza. Luego se procedió con el tamizado para las muestras de suelo y de ceniza con el fin de seleccionar material adecuado para realizar los ensayos de caracterización física, compactación y resistencia donde el tamaño de los materiales es un factor a tener en cuenta. En el caso del suelo, se separó las partículas que superaban la abertura de la malla N°4; por otro lado, en el caso de las cenizas se utilizó aquellas partículas menores el tamiz N°60 con la finalidad de obtener un material uniforme a ser usado en los ensayos.

Los primeros ensayos a realizar fueron los estudios de caracterización física como Límites de Atterberg, ensayos de granulometría y gravedad específica de los sólidos tanto para el suelo como para la ceniza. De esa manera se puede comprender con mayor detalle las características principales de los materiales y tener presente las particularidades de estos.

Obtenidos los resultados del ensayo de granulometría y límites de Atterberg se procedió a realizar la clasificación del suelo en base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Una vez realizado el ensayo de granulometría de la muestra de suelo y la muestra de ceniza, obtenidas sus correspondientes curvas granulométricas y clasificado el suelo a utilizar, se procedió con el tamizado de las muestras de suelo y ceniza con el fin de seleccionar material adecuado para realizar los ensayos de compactación Proctor estándar. El tamizado se realizó en función a los tamices N°4 para el suelo y N°60 para la ceniza.

Los ensayos de compactación Proctor Estándar fueron realizados en el suelo puro (S100) y mezclas del suelo con ceniza a diferentes proporciones. Los porcentajes de ceniza que utilizados, con respecto al peso del suelo seco, fueron de 10%, 20%, 30% y 40% (S90-C10, S80-C20, S70-C30 y S60-C40). Los resultados que obtenidos, a partir de las curvas de compactación, fueron la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo. Esta información fue usada para elaborar los especímenes del análisis de resistencia al corte. Para los ensayos de corte directo, se utilizaron especímenes de suelo puro y mezclas suelo-ceniza, anteriormente indicadas, considerando un tiempo de cura de 7 días en los que con la presencia del agua se generarán reacciones que contribuirán en la resistencia geotécnica de la mezcla. El ensayo proporcionó los parámetros de resistencia de cohesión y ángulo de fricción, de esta manera se comparó el comportamiento mecánico en relación con la resistencia al corte para cada caso, el ensayo de resistencia permitió establecer el porcentaje óptimo de ceniza que se requiere para maximizar las características geotécnicas de la muestra de suelo-ceniza.

Finalmente se realizó el ensayo triaxial con el suelo en estado puro y con la mezcla de suelo con porcentaje de ceniza óptima, aquella mezcla que mostró mejores resultados en sus características geotécnicas obtenidas previamente mediante los ensayos de corte directo. Cabe mencionar que la mezcla de suelo-ceniza fue curada por 7 días previo ensayo, tal como fue considerado en los ensayos de corte directo. A partir de los resultados del ensayo triaxial se obtuvo el módulo de elasticidad de las muestras de suelo puro y mezcla óptima, con la finalidad de verificar la influencia de la ceniza en la deformabilidad del suelo. Realizado los ensayos triaxiales y analizados sus resultados se estará en condiciones de presentar las conclusiones del comportamiento mecánico geotécnico del suelo con la adición de ceniza como una nueva alternativa de estabilización de suelo, mostrar las mejoras obtenidas de las características del suelo y los beneficios en su aplicación.

### III. RESULTADOS

Preliminarmente, los resultados de caracterización física necesarios para definir el material y los de resistencia al corte para determinar su capacidad geotécnica deben compararse. De esa manera con fundamento en los resultados tanto el suelo puro y la mezcla de suelo-ceniza optima son ensayados en pruebas triaxiales.

En primer lugar, la muestra de suelo pasante por el tamiz N°4 obtuvo un valor de gravedad específica de 2,68 a una temperatura de 30,2°C. El límite líquido del suelo puro fue de 22, asimismo el ensayo de límite plástico no arrojó resultados, ya que la muestra no presentaba características plásticas por lo que el índice de plasticidad (IP) fue de 22. Con respecto a su granulometría se determinó que el suelo presenta valores de Cu y Cc de 48,46 y 1,1 respectivamente; asimismo a partir de este resultado y del IP se determinó que el suelo es una arena bien graduada SW según clasificación SUCS.

En segundo lugar, para el análisis de resistencia al corte de las muestras de suelo puro y mezclas se utilizaron los valores de densidad seca máxima y contenido de humedad óptima obtenido de los ensayos Proctor estándar, con la finalidad de elaborar los especímenes y homogeneizar las condiciones entre estos. Para las muestras de suelo puro y suelo-ceniza el contenido de humedad óptimo fue de 8 a 12% sin mostrar una variación definida con respecto al contenido de ceniza de la mezcla; la densidad seca máxima disminuyó conforme aumentaba la presencia de ceniza, los valores variaron entre 1.68 al 2.15 gr/cm<sup>3</sup>. En la Tabla I se detallan los valores de densidad seca máxima y humedad óptima para cada dosificación de muestra de suelo; asimismo la Figura 1 presenta las curvas de compactación, donde se visualiza la disminución de la densidad seca máxima debido a la adición de ceniza, la cual posee menor densidad que los granos de suelo, y un incremento del contenido de humedad óptimo, debido a la capacidad de la ceniza a absorber agua.

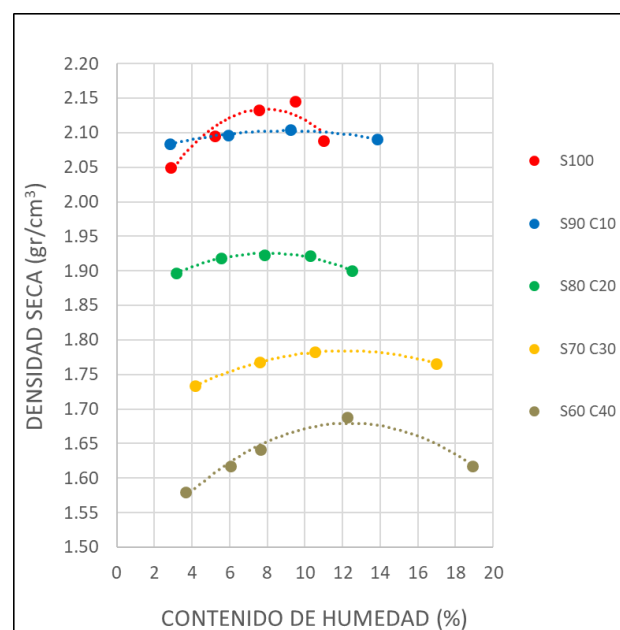


Fig. 1 Curvas de compactación ensayo Proctor estándar.

TABLA I  
DENSIDAD SECA MÁXIMA Y CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO

Dosificación	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
S100	2.14	8.00
S90 + C10	2.15	9.30
S80 + C20	1.93	8.00
S70 + C30	1.79	10.50
S60 + C40	1.68	12.00

A partir de los resultados de los ensayos de compactación se prepararon las muestras con los contenidos de humedad óptimos para ser sometidos al ensayo de corte directo. En relación con los parámetros geotécnicos obtenidos del corte directo, el ángulo de fricción tendió a bajar al agregar ceniza a la mezcla, el suelo puro obtuvo un valor de 31.3° mientras que el menor valor lo obtuvo la mezcla de 40% de ceniza con un resultado de 25°; por otro lado, el parámetro de cohesión mostró dos picos máximos tanto en la mezcla de suelo-ceniza al 10% y 30% en relación al peso seco, con los valores de 0.97 y 0.96 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. En la Tabla II se muestran los valores de los parámetros de resistencia de cada muestra de suelo ensayado con un tiempo de cura de 7 días.

TABLA II  
PARÁMETROS DE RESISTENCIA – TIEMPO DE CURA 7  
DÍAS

Muestra	Días de cura	Parámetros de resistencia	
		Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción (Ø)
S100	0	0.84	31.3
S90 + C10	7	0.97	29.7
S80 + C20	7	0.76	28.7
S70 + C30	7	0.96	25.7
S60 + C40	7	0.90	25.0

Analizados los parámetros geotécnicos se determina a la muestra de suelo-ceniza al 10% en relación al peso seco como la mezcla óptima, por lo que se realiza el ensayo triaxial CU tanto a la mezcla como al suelo puro; los parámetros hallados son de igual manera la cohesión y el ángulo de fricción efectivos. Según la Tabla III se observa que ambos parámetros son mayores para la muestra de suelo-ceniza óptima reafirmando que posee mejores características geotécnicas, cabe señalar que la muestra de suelo-ceniza tuvo un tiempo de cura de 7 días por lo que los valores presentados podrían alcanzar valores mayores para tiempos de cura posteriores.

TABLA III  
PARÁMETROS DE RESISTENCIA EFECTIVOS DEL  
SUELO PURO Y MEZCLA ÓPTIMA - ENSAYO  
TRIAxIAL CU

Muestra	Días de cura	Parámetros de resistencia	
		Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción (Ø)
S100	0	0.6	35.53
S90 + C10	7	0.98	35.93

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo y triaxial se elaboran gráficos esfuerzo-deformación para diferentes niveles de esfuerzo de confinamiento representados por la numeración I, II y III cuyo valor es de 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm<sup>2</sup> para el corte directo y 1.0, 2.0 y 4.0 kg/cm<sup>2</sup> para el triaxial respectivamente. Asimismo, se muestran las envolventes de falla al 3% de deformación para el suelo puro y la mezcla óptima.

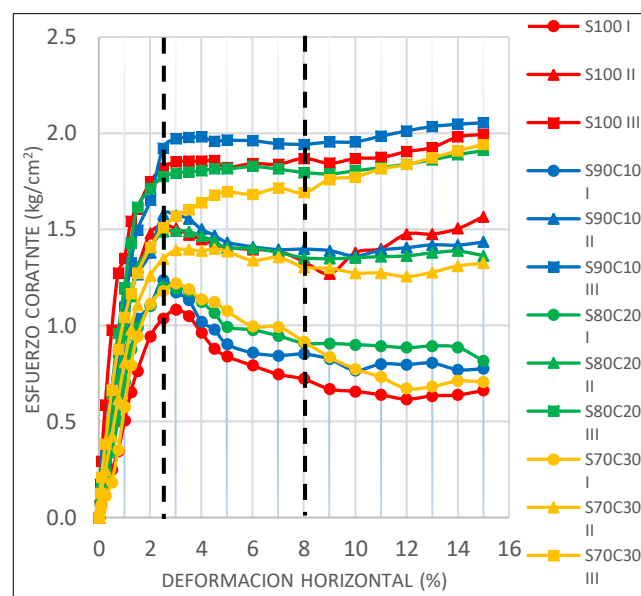


Fig. 2 Grafica esfuerzo-deformación de muestras en corte directo

En la Figura 2 se observa que para los niveles de confinamiento II y III la mezcla de S90C10 alcanza esfuerzos de corte mayores a las otras muestras, y para el confinamiento nivel I todas las mezclas suelo-ceniza presentan resultados superiores al suelo puro. Asimismo, analizando la resistencia al corte para deformaciones horizontales en el intervalo de 2.5 y 8 % se aprecia que todas las mezclas presentan un mejor comportamiento geotécnico que el suelo puro, esto para esfuerzos de confinamiento menores a 1 kg/cm<sup>2</sup>; sin embargo, las mezclas a partir de 20% de ceniza muestran que a medida que se incrementa el esfuerzo de confinamiento la tendencia cambia, mientras mayor es la cantidad de ceniza presente en la mezcla menores la resistencia la corte disminuye. Para deformaciones menores al 2.5% todas las muestras obtienen resultados similares sin ninguna diferencia considerable, asimismo para mayores a 8% los resultados muestran que no se conservan las tendencias expuestas inicialmente. Esto se debería a cambios considerables en la estructura original del espécimen por rotura y reacomodo de partículas.

A partir de los resultados obtenidos del ensayo triaxial del suelo puro y la mezcla óptima de 10% se presenta la Figura 3 que muestra las curvas esfuerzo-deformación para esfuerzos de confinamiento 1.0, 2.0 y 4.0 kg/cm<sup>2</sup> representado por I, II, y III, respectivamente. Se observa que la mezcla S90C10 posee un mejor comportamiento al ser sometida a esfuerzos de confinamiento de 1.0 kg/cm<sup>2</sup> y 2.0 kg/cm<sup>2</sup>. Por el contrario, para 4.0 kg/cm<sup>2</sup> de esfuerzo de confinamiento el escenario cambia debido a que probablemente los geles que se forman a partir de la presencia de ceniza y agua llegan a romperse, caso diferente ocurre con las partículas del suelo puro que al estar constituidos minerales presentan una mayor rigidez y resistencia para la estructura. En base a los resultados presentados en la Figura 2 y 3, se puede concluir que la ceniza proveniente de la quema de madera y carbón de ladrilleras artesanales posee gran potencialidad para ser aplicada como estabilizador de suelos no cohesivos.

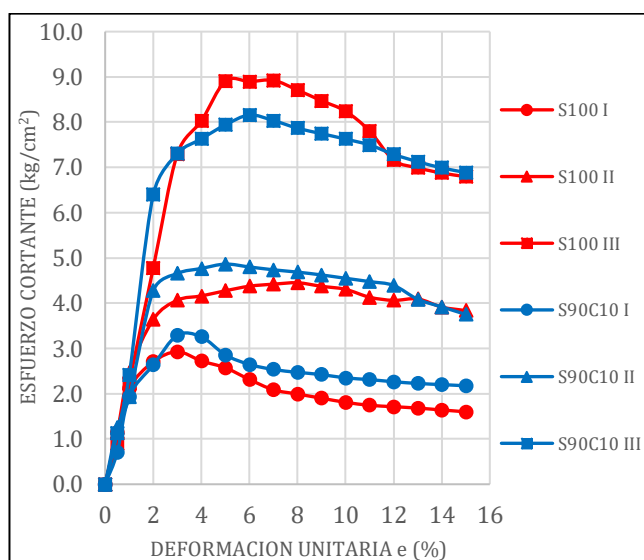


Fig. 3 Gráfica esfuerzo-deformación de suelo puro y mezcla óptima en triaxial CU

Asimismo, en la Figura 3 se observa que el valor del esfuerzo cortante a partir de la deformación al 3% con confinamiento de nivel III, supera el valor de la mezcla óptima. Por lo que se grafica la envolvente de falla en ese punto de deformación.

Se analiza la envolvente de ambas muestras representada por la Figura 4, se aprecia que para confinamientos bajos la mezcla con 10% de ceniza presenta mayores valores de resistencia al cortante, asimismo se denota que, al incrementar el confinamiento, el esfuerzo cortante se iguala para ambas muestras, resultado una pendiente mayor de la envolvente de falla para los suelos puros lo que evidencia una vez más el efecto de pérdida de resistencia al corte de la mezcla, posiblemente, debido al rompimientos de los elementos cementantes formados al ser hidratados así como a la falta de reacción de los mismos ya que se debe considerar que el tiempo de cura para que den lugar las reacciones fue de solo 7 días.

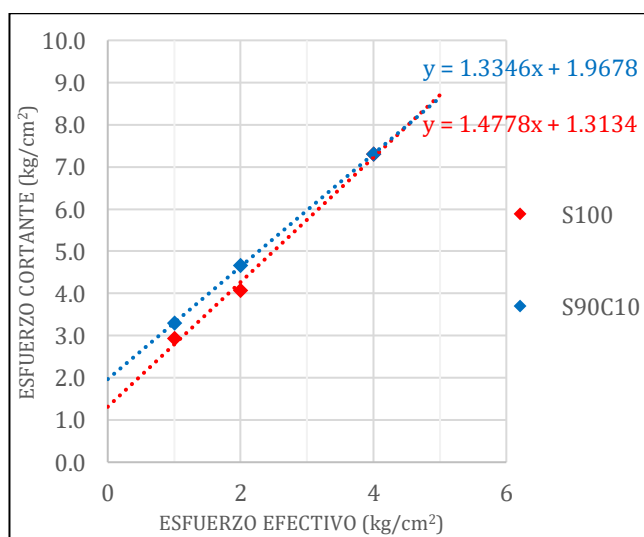


Fig. 4 Envolvente de falla para suelo puro y mezcla óptima para deformación de 3%

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación permiten concluir que, al analizar los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de fricción, la mezcla con presencia de 10% ceniza en relación al peso seco, muestra valores favorables en comparación con el suelo puro para los diferentes niveles de confinamiento principalmente en esfuerzos de confinamientos menores.

Asimismo, puede observarse que las muestras de suelo-ceniza presentan mayores valores de esfuerzo cortante en confinamientos bajos; sin embargo, a medida que el confinamiento va aumentando el valor del esfuerzo cortante se iguala con el suelo puro; esto se debe a que mientras el suelo-ceniza reacciona se forman cristales que hacen que el compuesto sea más sólido a esfuerzos cortantes y al ser sometido a esfuerzos de confinamientos más elevados como esfuerzos de 4kg/cm² terminan por romperse las formaciones de cristales; cabe señalar que el proceso de cristalización de geles no concluye con 7 días de cura, su resistencia mecánica aumenta de manera lenta pero continua [10].

Por lo expuesto se puede pensar en la utilización de la ceniza como adicionante estabilizador en los suelos arenosos si la demanda requiere cargas pequeñas a medianas como aquellos aplicativos en subrasantes y pistas de bajo a mediano tránsito, así como también en edificios dependiendo de la carga a la que será sometido el terreno; es importante considerar que para estos fines se requerirá realizar ensayos adicionales que cumplan con el propósito de dar directamente una aplicación a la mezcla de suelo-ceniza al 10% de su peso ya que este punto escapa del alcance de la presente investigación, como por ejemplo analizar los valores de CBR cuando el suelo forma parte de la estructura de un pavimento.

Se debe tener en cuenta que las mezclas de suelo-ceniza ensayadas en los ensayos de resistencia son curadas a solo 7 días por lo que se debe analizar el efecto estabilizador en tiempos de cura prolongados en posteriores investigaciones y así comprender mejor el comportamiento.

Es necesario realizar estudios químicos que complementen los ensayos físicos realizados en la investigación para entender a mayor detalle las reacciones producidas en las partículas de suelo y ceniza al ser hidratadas, así como determinar su composición y los cambios que se generan; es importante mencionar que en anteriores investigaciones los suelos arcillosos requirieron una cantidad superior de ceniza y no solo el 10% en relación al peso seco como resultó en la presente investigación para suelo arenoso, esto puede deberse a la composición química de la ceniza, la cual posiblemente contiene alto contenido de silicatos, aluminatos y óxido de calcio, compuestos que participan en la reacción puzolánica, siendo que la cal actúa como agente activador para que se produzca esta reacción [11].

Esta ceniza proveniente de madera y carbón resultó en poseer importantes propiedades puzolánicas, sin la necesidad de adicionar cal externa a las mezclas. La adición de cal podría conllevar a obtener mejores resultados en la resistencia al corte lo cual sería tema de una investigación posterior. Es así que, este residuo posee un valor agregado inherente, el cual podría ser explotado por esta industria

artesanal, siempre y cuando consigan generar una ceniza estandarizada para lo cual necesitarían modernizar sus instalaciones de tal manera que puedan controlar la presión y temperatura en el horno. Debido al tipo de industria, la inversión en tecnología para conseguir optimizar sus procesos de quema de biomasa resulta inviable, por lo que la intervención estatal se hace necesaria. Incentivos tributarios y de formalización para acceder a créditos financieros serían una herramienta importante que a la vez de traer impactos positivos en esta industria, resultaría en un impacto positivo en el medio ambiente porque no solo se reutilizaría la ceniza de fondo si no también la ceniza volante, presente en los gases que se liberan al medio ambiente. Normalmente la ceniza volante posee mayores propiedades puzolánicas que las cenizas de fondo, siendo utilizadas incluso en la industria cementera.

Al usar un compuesto como la ceniza que normalmente es desechado directamente en el medio ambiente, darle un nuevo uso beneficiaría la disminución de la contaminación que produce este residuo. Para corroborar este resultado, con mayor exactitud, y tener estadísticas más objetivas, es necesario realizar una investigación del impacto ambiental.

## 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, a la carrera de Ingeniería Civil por los conocimientos brindados durante los años de estudio.

## REFERENCIAS

- [1] B. Carrasco, N. Cruz, J. Terrados, F.A. Corpas, L. Pérez (2013). "An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks". Jaén, España. 22 de octubre del 2018, sitio web: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- [2] Caso de Estudio - Iniciativas Ladrillos: Políticas públicas implementadas en el sector ladrillero en América Latina (CCAC). 2014
- [3] Durán, G. (2016). Mejoramiento de un Suelo Arcilloso con Ceniza de Madera: agregando un valor a los residuos de la industria de ladrillos artesanales en el Perú.
- [4] Huayta, Freddy (2014). Indicadores de gestión empresarial en la producción de ladrillo artesanal en la región Junín (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- [5] C.H. Flórez G, R. Zarate C., Z.K. Caicedo O., B. A. Contreras (2008). Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. 17 de agosto del 2017, Sitio web: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825/39307>
- [6] Pérez Collantes, Rocío (2012). Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada. 18 de agosto del 2017, Sitio web: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1313/1/perez\\_cr.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1313/1/perez_cr.pdf)
- [7] Behak Leonardo, Peres Washington (2008). "Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación". 17 de agosto de 2017, sitio web: <http://revistas.ufps.edu.co/ojs/index.php/respuestas/articulo/view/536/543>.
- [8] Das, Braja M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. México, D.F.: Cengage learning, pp. 239-241.
- [9] Dalla Rosa, Amanda (2009). Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal (Tesis de titulación).
- [10] O. G. Ingles and J. B. Metcalf (1972). Stabilization of Pavement Subgrade by Using Fly Ash Activated by Cement
- [11] Misra, A., Utilization of Western Coal Fly Ash in Construction of Highways in the Midwest, Mid-America Transportation Center, Lincoln, Nebraska, 2000